

*На правах рукописи*

Александров Антон Юрьевич

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К КОМПЛЕКСНОЙ ОЦЕНКЕ  
ДИНАМИКИ ЭМОЦИОНАЛЬНЫХ СОСТОЯНИЙ

03.03.01 – Физиология

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата биологических наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена на кафедре высшей нервной деятельности и психофизиологии биологического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

**Научный руководитель:**

**Александров Александр Алексеевич,**  
доктор биологических наук, профессор,  
профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»,  
г. Санкт-Петербург

**Официальные оппоненты:**

**Пономарев Валерий Александрович,**  
доктор биологических наук,  
ведущий научный сотрудник, ФГБУН  
«Институт мозга человека им. Н. П.  
Бехтеревой» РАН, г. Санкт-Петербург.

**Суворов Николай Борисович,**  
доктор биологических наук, профессор,  
заведующий лабораторией нейрoэкологии  
ФГБУН «Институт экспериментальной  
медицины» РАН, г. Санкт-Петербург.

**Ведущая организация:**

**ФГБУН «Институт физиологии  
им. И. П. Павлова» РАН,**  
г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «24» мая 2018 г. в 16 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета Д 212.232.10 по защите докторских и кандидатских диссертаций на базе ФГБОУ «Санкт-Петербургский государственный университет» по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9, ауд. 3011 (90).

С диссертацией можно познакомиться в Научной библиотеке им. А. М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9 и на сайте Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: <http://disser.spbu.ru/files/disser2/1631/disser/mXt18C4dtp.pdf>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор биологических наук, профессор

Н. П. Алексеев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследования.**

Проблема автоматизации объективной оценки изменений эмоционального состояния имеет целый ряд аспектов теоретического и практического плана. К числу первых относятся задачи, связанные с построением адекватных моделей исследования, позволяющих воспроизводить в экспериментальной среде изменения эмоционального состояния и одновременно оценивать параметры вызываемых аффективных реакций. Решение второй группы задач требует разработки и дальнейшего развития методов регистрации и анализа психофизиологических параметров, отвечающих, в том числе, и специфическим требованиям прикладных применений среди которых обычно встречаются технологичность использования, портативность, возможность скрытого и дистанционного выполнения регистрации исследуемых характеристик.

Принципиальная возможность комплексной автоматизируемой оценки динамики эмоциональных состояний посредством психофизиологических методов исследования обычно не подвергается сомнению (Picard, Vyzas, Nealy, 2001), несмотря на это, практически значимых решений, получивших признание научного сообщества, до настоящего момента, предложено не было. Исследования в данной области, в последние десятилетия, приобрели широкое распространение и оформились в такие отдельные направления как *affective computing* (Or, 2008) и *emotion recognition* (Abhang, 2016).

Вместе с тем, несмотря на серьезное внимание, большое количество предложенных подходов и практически реализуемых моделей проблема далека от своего теоретического и практического разрешения. Даже заявляемая создателями эффективность методов оценки эмоциональных состояний (Gouizi et. al., 2011; Katsis et. al., 2008; Torres et. al., 2013; Kherzi, Firoozabadi, Sharafat, 2015; Rukavina et. al., 2016) не оставляет сомнений в том, что ключевые задачи пока не решены.

Широко исследуемой проблемой, возникающей в связи с господствующим многофакторным подходом к оценке эмоциональных состояний, является задача интеграции в системах, построенных на оценке нескольких параметров (Huang et.al., 2007; Castellano, Kessous, Caridakis, 2007). Решение этой задачи находится в основном русле развития теории систем искусственного интеллекта, связанных с ней разделов прикладной математики и нормативного направления статистической теории принятия решений (Longford, 2013).

В широком понимании, проблема объективизации исследования эмоциональных состояний является одной из важнейших в психофизиологии. Принимая во внимание значение аффективных механизмов в формировании поведения (Rolls, 1999), невозможно отрицать значение объективных методов оценки изменений эмоционального состояния как для базовых разделов нейронауки, так и для таких прикладных направлений как нейроэкономика (Nermend, Latuszynska, 2017) и психология потребительского поведения (Takemura, 2014).

Для формального представления изменений эмоционального состояния в работе используется стандартное градуальное двухфакторное пространство, подразумевается независимый характер изменений знака эмоционального состояния и степени выраженности аффективной реакции.

Особенностью предлагаемого методологического подхода является использование традиционных методов психофизиологического исследования, таких как ЭЭГ, в сочетании с акселерометрическим методом регистрации физиологического тремора при решении задач комплексной автоматизируемой оценки вызванных изменений эмоционального состояния. Это направление является новым и практически не представлено в литературе. Дополнительным преимуществом использования акселерометрической регистрации физиологического тремора является высокая, по сравнению с электрофизиологическими методами, технологичность и помехоустойчивость.

Принимая во внимание критические замечания в адрес имеющихся на сегодняшний момент методов моделирования эмоциональных состояний (Coan, Allen, 2007) в работе используется несколько вариантов формирования аффективных реакций. Наряду с традиционными, предлагается новый, для исследований в данной области, метод моделирования эмоциональных состояний - условная игровая реализация распространенной в прикладном полиграфическом тестировании парадигмы «знания виновного» (guilty knowledge test, concealed information test) (Granhag, Stromwall, 2004).

Вводимые в рамках этого подхода нерелевантные тестирующие стимулы позволяют осуществлять интраиндивидуальные сравнения вызванных реакций испытуемого и, тем самым, исключить влияние индивидуальных различий динамики и абсолютных значений регистрируемых параметров. Для исключения артефактов, связанных с неконтролируемым субъективным взаимодействием экспериментатора и испытуемого, все предложенные модели психофизиологического тестирования реализованы в виде полностью автоматизированного эксперимента.

Выбранный прикладной аспект задачи активно разрабатывается в интересах создания комплексных многопараметрических систем различения эмоциональных состояний, человеко-машинных интерфейсов, в медицинской диагностике, в сфере безопасности и правоохранительной практике для решения задачи выявления сокрытия информации, тестирования контингентов профессий особого риска и в профессиональном отборе.

### **Цели исследования**

1. Изучение возможности использования физиологического тремора и ЭЭГ для количественной оценки вызванных изменений психофизиологических характеристик, отражающих динамику развития эмоциональных состояний.

### **Задачи исследования**

1. Выявить особенности изменения амплитуды физиологического тремора связанные с формированием эмоциональных состояний, вызванных сокрытием информации.

2. Оценить изменения мгновенной частоты физиологического тремора, вызванные визуальным предъявлением семантических сигналов с различным уровнем эмоциональной значимости.
3. Сравнить вызванную динамику переходных характеристик физиологического тремора ведущей и не ведущей руки при переживании эмоциональных состояний различного генеза.
4. Оценить изменения фронтальной межполушарной асимметрии электрической активности мозга в диапазоне 8-13 Гц при предъявлении испытуемому звуковых сигналов с различным уровнем эмоциональной значимости.

### **Научная новизна исследования**

Впервые продемонстрировано двухфазное вызванное изменение амплитуды физиологического тремора в ответ на предъявление эмоционально значимых стимулов связанных с сокрытием информации.

В работе предлагается новый метод моделирования эмоциональных состояний, связанных с сокрытием информации, основанный на игровой реализации парадигмы «знания виновного».

С использованием звуковых стимулов, продемонстрировано изменение фронтальной межполушарной асимметрии электрической активности мозга в альфа-диапазоне, связанное с различным уровнем эмоциональной значимости.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Научная значимость данной работы обусловлена фундаментальным значением задачи формирования естественнонаучных подходов к оценке изменений эмоционального состояния с использованием психофизиологических методов исследования.

Практическая ценность работы связана с такими разделами прикладных исследований как создание систем комплексной многопараметрической оценки эмоциональных состояний, человеко-машинных интерфейсов, медицинской диагностикой и терапией с использованием обратной связи, созданием игровых систем виртуальной реальности.

Не менее значимая область потенциального прикладного использования результатов исследования лежит в сфере безопасности и правоохранительной деятельности, включая в себя задачи выявления фальсификации и сокрытия информации, профессионального отбора и тестирования контингентов профессий особого риска.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Амплитуда максимума усредненных вызванных изменений мгновенной частоты физиологического тремора ведущей руки в интервале 550 - 650 мс, от момента предъявления зрительного стимула, возрастает при увеличении его эмоциональной значимости.

2. Вероятность возникновения максимальных по амплитуде вызванных изменений физиологического тремора ведущей руки на частоте 8 – 12 Гц и 17 – 22 Гц, в интервале 450 – 750 мс, возрастает при предъявлении эмоционально значимых сигналов, связанных со скрываемой информацией.

### **Апробация результатов исследования**

Материалы диссертационного исследования были доложены на заседании экспертной группы 19.02.2018 г. и представлены на следующих конференциях:

XXIII съезд физиологического общества им. И. П. Павлова. Воронеж, Россия, 2017; IEEE International Conference «Video and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies» Saint-Petersburg. Russia. 2017; 12-й Международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии» Судак, Крым, Россия, 2016; 29-th European Conference of Visual Perception. Saint-Petersburg. Russia, 2006; XIII международное совещание и VI школа по эволюционной физиологии. Санкт-Петербург, Россия. 2006; 4-я конференция-школа «Физиология слуха и речи». Санкт-Петербург, Россия. 2005.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация изложена на 116 страницах, состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, результатов,

обсуждения, выводов и списка литературы, включающего 197 источников. Работа иллюстрирована 13 рисунками и 2 таблицами.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

### **Материалы и методы исследования**

**Исследование особенностей физиологического тремора обусловленных развитием эмоциональных состояний, связанных с сокрытием информации.** При проведении эксперимента, испытуемый располагался в кресле без подлокотников, в положении сидя, удерживая обе руки ниже локтя навесу, по возможности горизонтально и симметрично. Кисти рук и предплечья должны были находиться в безопорном и, насколько это возможно, комфортном для испытуемого положении. Тестирование выполнялось в экранированной звукоизолированной камере. Регистрацию физиологического тремора осуществляли трехкоординатными цифровыми акселерометрами ADXL345 (производство «Analog Devices», США), закрепленными на указательных пальцах правой и левой руки испытуемого.

В целях увеличения стабильности оцениваемых параметров физиологического тремора в эксперименте использовалась зрительная обратная связь по положению обеих рук в горизонтальной плоскости. Регулируемый с применением обратной связи параметр оценивался с использованием акселерометров в качестве датчиков положения. Монитор, на экране которого предъявлялись цифровые стимулы и индикаторы сигналов обратной связи, располагался по средней линии перед испытуемым на расстоянии 1 метр.

В первой серии экспериментов приняли участие 17 человек – учащихся 2-3 курсов в возрасте 19-22 года, пятеро мужчин и двенадцать женщин, из которых пятнадцать человек были признаны праворукими и двое - леворукими. (Annett, 1972; Oldfield, 1971).

Перед началом тестирования испытуемому предлагали загадать любую цифру из предложенного ему набора и скрывать свой выбор до окончания



выполнения задания. В условиях автоматизированного эксперимента испытуемому многократно, в случайном порядке предъявляли изображения цифр из тестового набора. Каждая цифра от 0 до 7 предъявлялась по восемь раз. Для непрерывного продолжения программы эксперимента от испытуемого требовалось удерживать ладони на весу горизонтально, руководствуясь сигналами обратной связи (рисунок 1). Размер прямоугольников соответствовал положению одного из акселерометров относительно горизонта. При одновременном увеличении размеров двух прямоугольников по высоте до максимально возможного (рисунок 1.Б), на экране возникал выбираемый в случайном порядке из тестового набора (цифра от 0 до 7) зрительный стимул (рисунок 1.В).

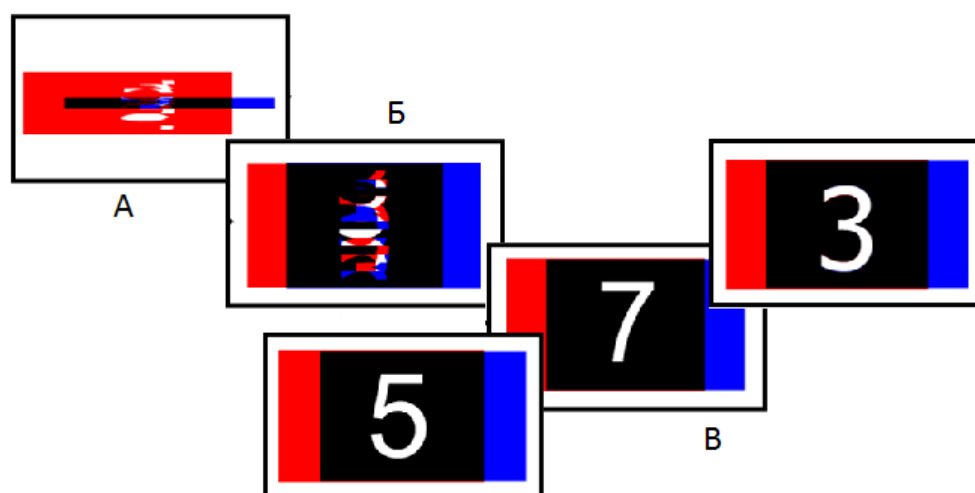


Рисунок 1. Внешний вид предъявляемых зрительных стимулов и индикаторов обратной связи в порядке их предъявления испытуемому.

А, Б - Изображения индикаторов обратной связи при недостаточно правильном положении рук относительно горизонта; В – Изображения тестирующих зрительных стимулов на фоне индикаторов обратной связи, отражающих правильное положение рук относительно горизонта.

Появившееся изображение экспонировалось в течение 2.5 с. Программа эксперимента представляла собой последовательность из 64 предъявлений тестирующих сигналов.

Данные регистрации физиологического тремора, получаемые с двух 3-х координатных акселерометров, оцифровывали посредством встроенных 12-и разрядных аналого-цифровых преобразователей. Частота дискретизации составляла 200 Гц, диапазон значений амплитуды -  $\pm 19.62 \text{ м/с}^2$ . Синхронизация регистрации психомоторных реакций с моментом начала демонстрации тестирующего зрительного стимула осуществлялась аппаратно.

Вызванные психомоторные реакции накапливались от момента демонстрации зрительного стимула и распределялись в соответствии с типом предъявляемого сигнала. По всем трехкоординатным реализациям, соответствующим единичному предъявлению зрительного стимула, вычислялась евклидова норма. В полученных одномерных временных рядах выделяли психомоторную активность в двух исследуемых частотных полосах – 8-12 Гц и 17-22 Гц с использованием полосовой фильтрации многократным рекурсивным применением сингулярного спектрального анализа (singular spectrum analysis, SSA) (Golyandina, Zhigljavsky, 2013).

Для оценивания динамики амплитуды физиологического тремора в выделенной полосе частот использовали построение огибающей сигнала. Вычисление огибающей сигнала осуществляли на основе преобразования Гильберта. Процедура вычисления преобразования Гильберта сводилась к следующим последовательным этапам: переход к Фурье-образу аналитического сигнала посредством вращения фазы в спектральной плоскости с последующим обратным преобразованием во временной домен и вычислением огибающей по амплитуде аналитического сигнала. Для проведения количественного оценивания максимальных изменений амплитуды сигнала, в исследуемом частотном диапазоне, амплитуда огибающей нормировалась к среднему значению во временном интервале 300 – 450 мс от начала предъявления тестирующего сигнала.

Статистическое оценивание достоверности полученных различий проводилось с использованием модифицированного критерия Колмогорова – Смирнова против нулевой гипотезы о равномерном распределении

относительных величин психомоторных реакций и одновыборочным критерием Вилкоксона против нулевой гипотезы о симметрии распределения относительных величин психомоторных реакций. Вычисление достигаемых уровней значимости осуществлялось с применением бутстреп-анализа. (Sprenst, Smeeton, 2001; Boos, Stefanski, 2013).

**Динамика мгновенной частоты физиологического тремора при изменениях эмоционального состояния, вызванных демонстрацией семантических стимулов с различной эмоциональной значимостью.** При проведении эксперимента, испытуемый располагался в положении сидя, удерживая обе руки ниже локтя навесу, по возможности горизонтально и симметрично. Кисти рук и предплечья должны были находиться в безопорном положении. Регистрацию физиологического тремора осуществляли трехкоординатными цифровыми акселерометрами ADXL345. Акселерометры закрепляли на внешней стороне указательных пальцев правой и левой руки испытуемого. В целях увеличения качества регистрируемых данных в эксперименте использовалась зрительная обратная связь по положению обеих рук в горизонтальной плоскости. Монитор, на экране которого предьявлялись цифровые стимулы из тестового набора и индикаторы сигналов обратной связи, располагался на расстоянии 1 метр.

В исследовании приняли участие 19 человек - учащихся 2-3 курсов в возрасте 19-22 года. Среди испытуемых было трое мужчин и шестнадцать женщин. По результатам тестирования все испытуемые оказались праворукими (Annett, 1972; Oldfield, 1971).

В условиях автоматизированного эксперимента испытуемому многократно, в случайном порядке, предьявляли четыре типа зрительных стимулов — его собственную фамилию, последовательности символов, полученные случайной перестановкой букв фамилии, записи элементарных арифметических равенств типа ( $3 + 2 = 5$ ,  $2 + 4 = 3$ ) половина из которых были истинными, половина - ложными.

Для продолжения программы эксперимента от испытуемого требовалось удерживать ладони на весу горизонтально, руководствуясь сигналами обратной связи (рисунок 2). Размеры эллипсов соответствовали положению акселерометров относительно горизонта. При одновременном уменьшении размеров обоих эллипсов до величины обозначенной прямоугольным маркером (рисунок 3.Б) и удержании в течение трех секунд начиналась демонстрация эмоционально значимого сигнала (рисунок 3.В). Экспонирование продолжалось в течение трех секунд.

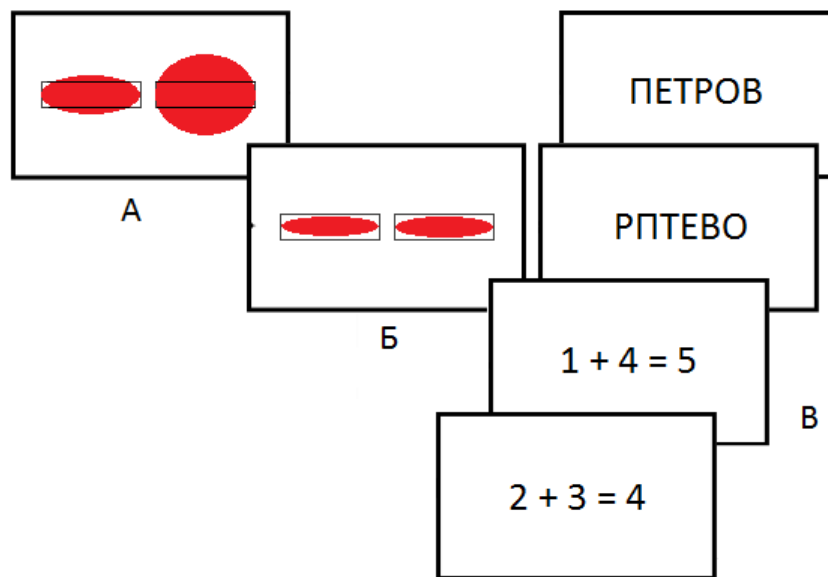


Рисунок 2. Внешний вид предъявляемых зрительных стимулов и индикаторов обратной связи

А - Изображение индикаторов обратной связи при недостаточно правильном положении рук относительно горизонта; Б - Изображение индикаторов обратной связи при правильном положении рук относительно горизонта; В – Изображения тестирующих зрительных стимулов

Программа эксперимента представляла собой случайную последовательность из 80 предъявлений тестирующих сигналов - по 20 для каждого типа.

Данные регистрации физиологического тремора оцифровывали посредством встроенных 12-и разрядных аналого-цифровых преобразователей. Частота дискретизации составляла 200 Гц, диапазон значений амплитуды -

$\pm 19.62 \text{ м/с}^2$ . Синхронизация акселерометрической регистрации с моментом начала демонстрации тестирующего зрительного стимула осуществлялась аппаратно.

Данные психомоторной активности накапливались от момента демонстрации зрительного стимула и распределялись в соответствии с типом предъявляемого тестирующего сигнала. По всем трехкоординатным реализациям, соответствующим единичному предъявлению зрительного стимула, вычисляли евклидову норму. Полученный одномерный временной ряд подвергали дискретному преобразованию Гильберта в окне длительностью 1.5 секунды с последующим вычислением мгновенной частоты в следующей последовательности: вычисление дискретного преобразования Фурье; получение спектрального представления аналитического сигнала; обратное дискретное комплексное преобразование аналитического сигнала; разделение действительной и мнимой частей аналитического сигнала, вычисление мгновенной амплитуды и мгновенной фазы. Мгновенную частоту, вычисляли численным дифференцированием фазы аналитического сигнала. Единичные реализации на временном интервале 0 – 750 мс подвергали когерентному усреднению от момента начала демонстрации зрительного стимула. При усреднении, для получения оценок средних значений, использовали вычисление медианы.

Для статистического оценивания результатов был использован бутстреп-анализ с полной рандомизацией знаков парных разностей, предназначенный для связанных выборок. Вычисление достигаемых уровней значимости различий производилось по алгоритму подробно описанному в работе Манли (Manly, 2007). Для оценки однородности использовались попарные сравнения групп соответствующих типу сигнала и сравнения каждой группы с совокупностью остальных.

**Изменения фронтальной межполушарной асимметрии ЭЭГ при восприятии звуковых сигналов с различным уровнем эмоциональной значимости.** При проведении эксперимента испытуемые располагались в

положении сидя. В исследовании приняли участие 20 человек в возрасте от 19 до 32 лет. Среди участников оказалось 11 мужчин и 9 женщин. Все испытуемые были праворукими. Для формирования аффективных состояний с различным уровнем эмоциональной значимости были использованы фрагменты звуковых сигналов, полученных из довербальных гласноподобных вокализаций младенцев первого года жизни. Для подбора вокализаций и оценки их эмоциональной значимости было предварительно проведено специальное исследование. В ходе этого исследования, аудиторам предлагалось присваивать прослушиваемым вокализациям оценки по семибалльной шкале от -3 до +3 исходя из знака и интенсивности эмоциональных состояний, вызываемых данными вокализациями. На основании оценок аудиторов были отобраны три звуковых сигнала: наиболее отрицательный (длительность 3 с), наиболее положительный (длительность 1.3 с) и нейтральный (длительность 2 с). В качестве контрольного в группу тестовых стимулов был добавлен индифферентный сигнал, представлявший собой тональную посылку с частотой заполнения 1000 Гц (длительность 2 с).

Предъявление сигналов осуществлялось в случайном порядке, каждый звуковой сигнал предъявляли по 15 раз с интервалом 8 секунд в ходе автоматизированного эксперимента с параллельной регистрацией ЭЭГ. Запись ЭЭГ осуществлялась монополярно, хлорсеребряными электродами, располагавшимися по системе 10 – 20, в отведениях Fp1, Fp2, F3, F4, T3, T4, P3, P4. В качестве референтного использовалось отведение Cz. Параллельно с записью ЭЭГ, производилась запись электроокулограммы.

Для оценки индекса фронтальной межполушарной асимметрии использовали разность логарифмов спектральной плотности мощности альфа-ритма (8 – 13 Гц) в парных отведениях. В качестве вычитаемого использовали значение параметра для левого полушария. Вычисление спектров производили в скользящем окне длительностью 1 с. Для оценки средних величин использовали вычисление медианы.

Вызванные изменения межполушарной асимметрии оценивали по усредненным значениям в шести временных интервалах длительностью 1 с, начиная от второй секунды до предъявления сигнала и заканчивая четвертой секундой после. Статистическое оценивание достоверности и характера вызванных изменений производили с использованием многофакторного дисперсионного анализа по стандартной схеме MANOVA.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Работа включает в себя три независимых исследования связанных общим подходом и задачей разработки психофизиологических критериев оценки экспериментально вызываемых эмоциональных состояний. Основной акцент сделан на оценку переходных характеристик вызванных изменений эмоциональных состояний, позволяющий исследовать кратковременные и незначительные по степени выраженности аффективные реакции.

**Исследование особенностей физиологического тремора, обусловленных развитием эмоциональных состояний связанных с сокрытием информации.** Вызванные изменения амплитуды физиологического тремора рассматривались на временном интервале 0 – 1000 мс. В качестве приоритетных были выбраны два частотных диапазона: 8 – 12 Гц и 17-22 Гц. Оценка динамики физиологического тремора осуществлялась отдельно для ведущей и ведомой руки. Предварительный анализ показал, что выраженность исследуемых амплитудных различий возрастает с уменьшением количества используемых реализаций. Вследствие этого, для дальнейшей обработки отбирались первые три реализации, полученные после предъявления каждого тестового стимула.

На рисунке 3 представлены усредненные вызванные изменения амплитуды физиологического тремора в полосе 8 – 12 Гц для трех вариантов накопления реализаций. Во всех случаях можно видеть выраженное снижение амплитуды тремора во временном интервале 300 – 450 мс, часто сопровождающееся достижением локального (на интервале 250 – 500 мс) минимума амплитуды

тремора, которое, на коротком начальном промежутке, приобретает достоверный характер ( $p < 0.05$ ). Устойчивое поведение усредненной амплитуды в интервале 300 – 450 мс позволяет использовать его для нормирования значений амплитуды тремора.

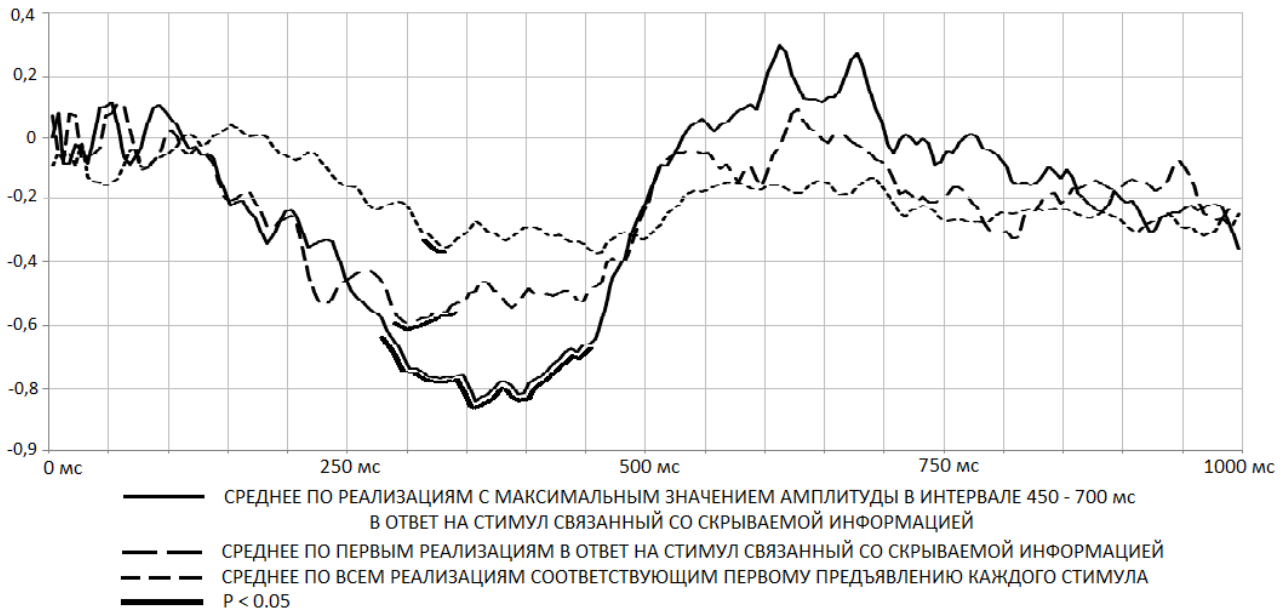


Рисунок 3. Усредненные ( $N = 17$ ,  $N = 17$ ,  $N = 136$ ) вызванные изменения амплитуды физиологического тремора ведущей руки в полосе частот 8 – 12 Гц. по оси абсцисс – время (мс), нулевое значение соответствует началу демонстрации зрительного стимула; по оси ординат – нормированные значения амплитуды (усл.ед); дополнительной чертой отмечены области временного ряда распределение значений в которых отличается от полученного в фоне.

Амплитуда усредненных вызванных изменений принимала максимальные значения после отметки 500 мс от момента предъявления сигнала. Для количественной оценки изменений амплитуды было выбрано максимальное значение нормированной амплитуды тремора во временном интервале 450 – 750 мс, полученное в ответ на первые три предъявления каждого тестирующего сигнала.

Аналогичные по характеру вызванные изменения амплитуды физиологического тремора получены при анализе данных в полосе частот 17 – 23 Гц (Рисунок 4). Вместе с тем, имеется ряд отличий наиболее заметное из



которых – симметричный относительно оси абсцисс характер вызванных реакций. Максимумы и минимумы изменений амплитуды вызванных реакций в ответ на предъявление стимула связанного со скрываемой информацией достоверно ( $p < 0.05$ ) отличаются от значений в фоне.

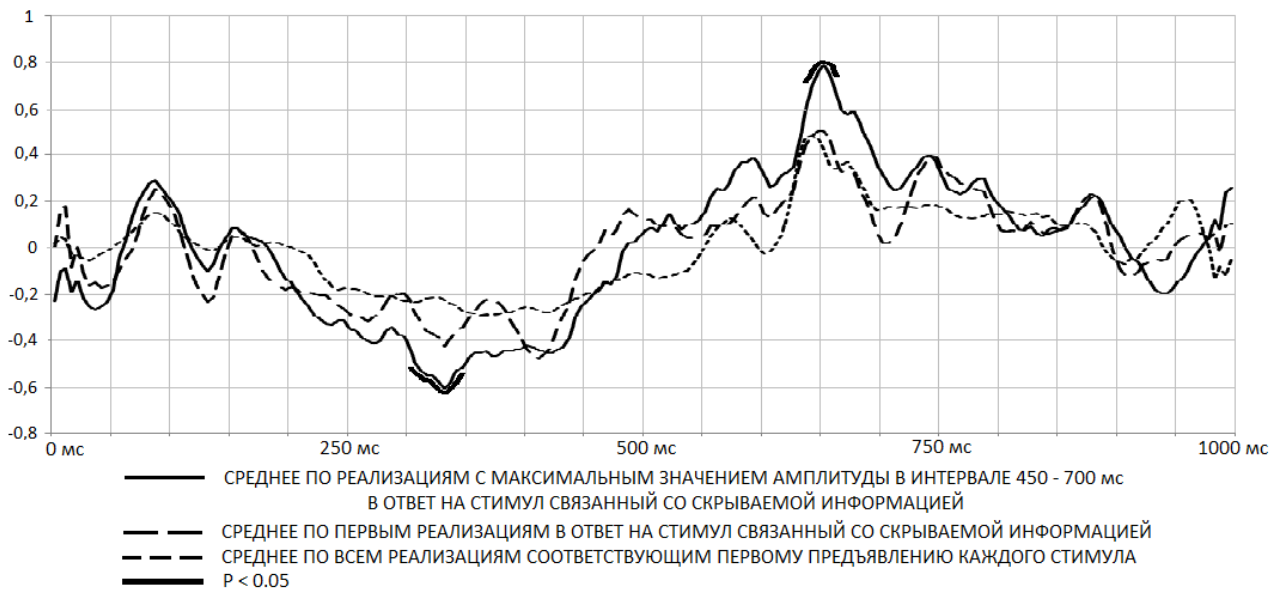


Рисунок 4. Усредненные ( $N = 17, 17, 136$ ) вызванные изменения амплитуды физиологического тремора ведущей руки в полосе частот 17 – 23 Гц.

по оси абсцисс – время (мс), нулевое значение соответствует началу демонстрации зрительного стимула; по оси ординат – нормированные значения амплитуды (усл.ед); дополнительной чертой отмечены области временного ряда распределение значений в которых отличается от полученного в фоне.

Психомоторная реакция, связанная с сокрытием информации, оценивалась по максимальному значению нормированной амплитуды тремора в интервале 450 – 700 мс. Статистическое оценивание обнаруженных различий показало достоверное увеличение вероятности возникновения максимальных положительных отклонений амплитуды физиологического тремора ведущей руки, в диапазонах частот 8 – 12 и 17 – 23 Гц, возникающих в ответ на предъявление сигналов, связанных со скрываемой информацией. Достижимый уровень значимости, при проверке гипотезы о равномерном распределении относительных величин психомоторных реакций в ответ на предъявление

стимула связанного с сокрытием информации, оказался равным 0.0004 для полосы 8 – 12 Гц и 0.0001 – для полосы 17 – 23 Гц. При проверке гипотезы о симметрии распределения относительных величин психомоторных реакций в ответ на предъявление стимула связанного с сокрытием информации достигаемый уровень значимости для отклонения нулевой гипотезы составил соответственно 0.0033 и 0.0018.

Установленные особенности распределения относительных величин вызванных изменений физиологического тремора позволяют утверждать, что вероятность возникновения максимальных по величине изменений амплитуды физиологического тремора ведущей руки в исследуемых диапазонах частот достоверно возрастает при демонстрации тестирующих стимулов, связанных со скрываемой информацией. Степень асимметрии распределения, при соответствующем ее направлении, можно считать количественной оценкой выраженности аффективно обусловленных изменений амплитуды тремора. Исследование физиологического тремора ведомой руки с использованием аналогичных вычислительных процедур не выявило достоверных различий.

**Динамика мгновенной частоты физиологического тремора при изменениях эмоционального состояния, вызванных демонстрацией семантических стимулов с различной эмоциональной значимостью.** Форма усредненного вызванного психомоторного ответа при анализе динамики мгновенной частоты физиологического тремора представляет собой пологую кривую с выраженным максимумом, расположенным во временном интервале 550 – 650 мс. В области максимальных положительных отклонений реакция демонстрирует достоверные отличия от значений в фоне (Рисунок 5).

При усреднении психомоторных реакций, полученных в ответ на предъявление наиболее эмоционально значимого сигнала (фамилия испытуемого), получен аналогичный по форме паттерн реагирования с более

выраженными статистическими отличиями от значений в фоне. Область

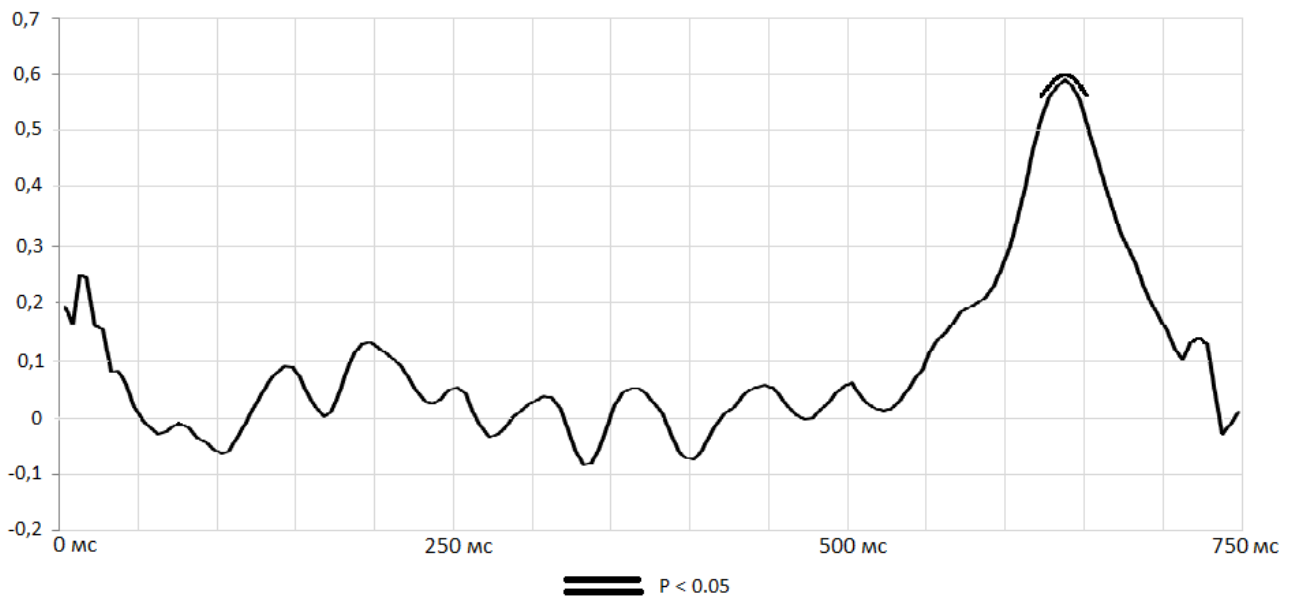


Рисунок 5. Усредненные ( $N = 608$ ) вызванные изменения мгновенной частоты физиологического тремора правой руки в ответ на предъявление зрительных сигналов с различным уровнем эмоциональной значимости.

по оси абсцисс – время (мс) нулевое значение соответствует началу демонстрации зрительного стимула; по оси ординат – нормированные значения мгновенной частоты физиологического тремора (усл. ед.); дополнительной чертой отмечены области временного ряда распределение значений в которых отличается от полученного в фоне.

достоверных различий в положительной фазе ответа значительно длиннее, в интервале 450 – 475 мс отмечается область снижения мгновенной частоты относительно фона с достигаемым уровнем значимости 0.1 (Рисунок 6).

Общий характер вызванных изменений оказался аналогичным для обеих рук. Несмотря на принципиальное сходство формы вызванных изменений для всех вариантов стимуляции, максимальная амплитуда изменений мгновенной частоты усредненного ответа продемонстрировала зависимость как от типа

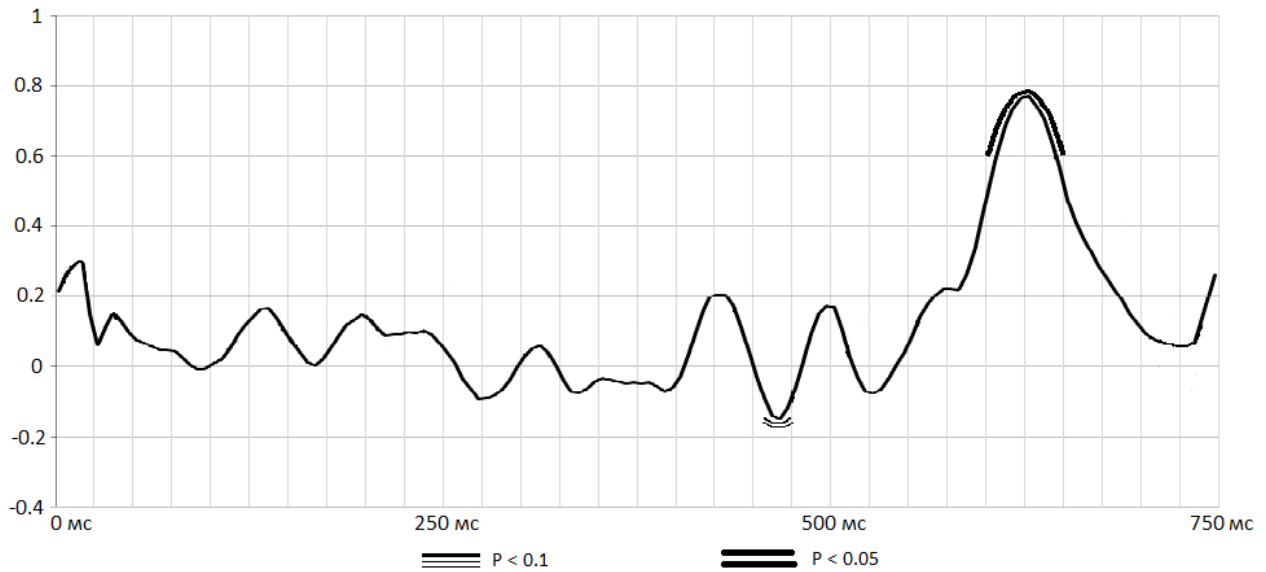


Рисунок 6. Усредненные ( $N = 152$ ) вызванные изменения мгновенной частоты физиологического тремора правой руки в ответ на предъявление фамилии испытуемого.

по оси абсцисс – время (мс) нулевое значение соответствует началу демонстрации зрительного стимула; по оси ординат – нормированные значения мгновенной частоты физиологического тремора (усл. ед.); дополнительной чертой отмечены области временного ряда распределение значений в которых отличается от полученного в фоне.

тестирующего сигнала, так и от стороны регистрации (рисунок 7).

Наиболее значительные изменения мгновенной частоты физиологического тремора правой руки вызывала экспозиция фамилии испытуемого. Нулевая гипотеза об однородности распределения полученных значений для случая демонстрации фамилии испытуемого отвергается при достигаемом уровне значимости – 0.009.

Для левой руки максимальные изменения вызывала экспозиция арифметического выражения с неверным результатом. Проверка гипотезы об однородности распределения максимальной амплитуды изменений мгновенной частоты физиологического тремора левой руки, для случая демонстрации ложных арифметических равенств, показала достоверные различия с достигаемым уровнем значимости 0,036.

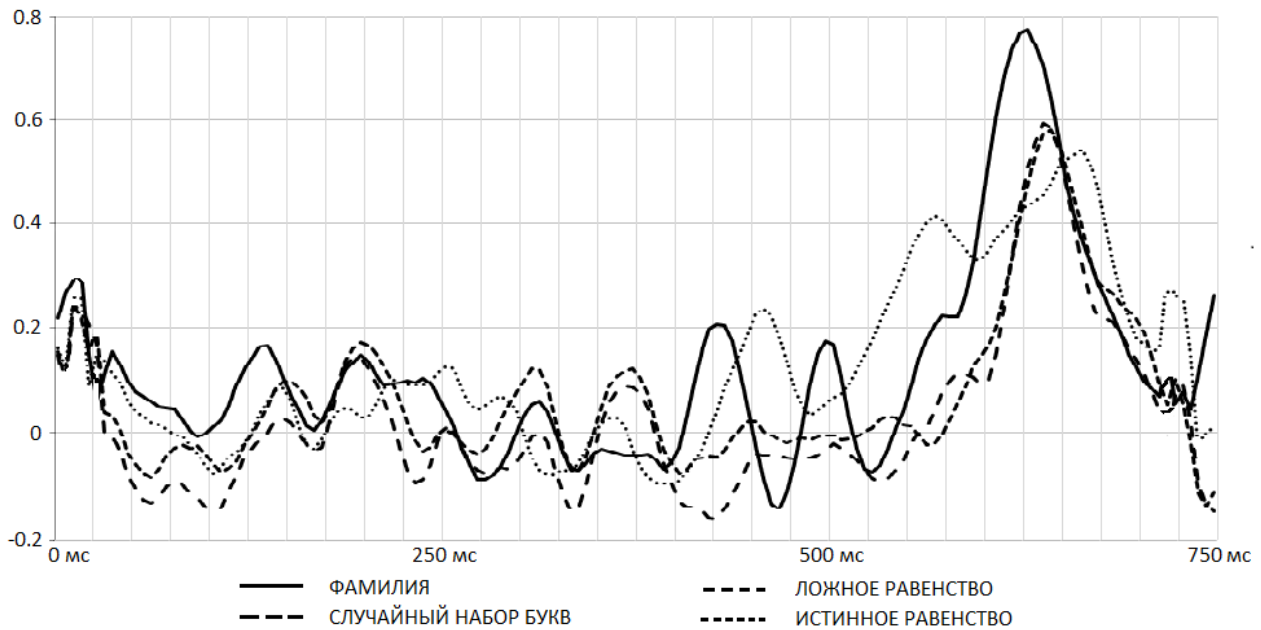


Рисунок 7. Усредненные ( $N = 152$ ) вызванные изменения мгновенной частоты физиологического тремора ведущей руки при экспозиции зрительных стимулов с различной эмоциональной значимостью.

по оси абсцисс – время (мс) нулевое значение соответствует началу демонстрации зрительного стимула; по оси ординат – нормированные значения мгновенной частоты физиологического тремора (усл. ед.).

Необходимо отметить дополнительные сходства временных характеристик усредненных вызванных психомоторных реакций полученных в двух различающихся но, сопоставимых моделях реализованных в первой и второй серии экспериментов. Несмотря на достаточно существенные различия в характере анализируемых параметров – амплитуды и мгновенной частоты в обоих случаях максимальные значения усредненных вызванных реакций оказались в интервале 550 – 650 мс. Также в обоих случаях демонстрируемым максимумам предшествовали локальные минимумы в интервале 300 – 450 мс.

**Исследование изменений фронтальной межполушарной асимметрии ЭЭГ при восприятии звуковых сигналов с различным уровнем эмоциональной значимости.** Развитие вызванных изменений функциональной межполушарной асимметрии при предъявлении звуковых стимулов с различной эмоциональной значимостью продемонстрировало специфическую

зависимость от знака формируемых эмоциональных состояний. Прослушивание эмоционально положительных вокализаций приводило к снижению спектральной плотности мощности ЭЭГ в альфа-диапазоне в левополушарных отведениях относительно фона до начала стимуляции. Напротив, предъявление эмоционально отрицательных вокализаций вызывало аналогичные изменения в правом полушарии. Таким образом, предъявление эмоционально положительных стимулов приводит к увеличению индекса межполушарной асимметрии, а предъявление эмоционально отрицательных – к снижению.

В наибольшей степени рассматриваемый эффект выражен во фронтальных отведениях и прежде всего в паре F3 – F4. Наибольшие вызванные изменения происходят в течение первой и второй секунд с момента начала предъявления сигнала, а наибольшие абсолютные различия связанные с характером предъявляемого стимула связаны со второй секундой предъявления сигнала.

Достигаемые уровни значимости для взаимодействия факторов сигнал – отведение и сигнал - латентный период – отведение оказались равны соответственно 0.015 и 0.031. Различия, полученные в других отведениях (T3-T4;P3-P4) носили недостоверный характер, изменения в височных отведениях имели обратную по направленности тенденцию, а изменения в теменных отведениях показали однонаправленный характер.

При анализе кратковременных вызванных изменений межполушарной асимметрии на первой секунде после начала предъявления сигналов обнаружены достоверные различия электрической активности в переднелобных отведениях Fp1 – Fp2 по отношению к значениям предшествовавшим предъявлению сигналов. Аналогично зависимости полученной в заднефронтальных отведениях предъявление эмоционально положительного сигнала приводило к увеличению индекса функциональной межполушарной асимметрии альфа активности. Предъявление эмоционально отрицательного сигнала, напротив, вызывало уменьшение индекса асимметрии.

Для статистического оценивания обнаруженных различий был использован бутстреп-анализ. В качестве нулевой гипотезы использовалось

утверждение об однородности распределения разности индексов фронтальной асимметрии альфа – активности в фоне до предъявления и в течение первой секунды предъявления эмоционально положительных и эмоционально отрицательных сигналов. Обнаружено достоверное ( $p < 0.016$ ) увеличение индексов межполушарной асимметрии в ответ на предъявление эмоционально положительного сигнала. В качестве контроля проводилось статистическое оценивание однородности распределения значений индекса межполушарной асимметрии в фоне.

Особенность данного исследования заключается в использовании переходных характеристик нескольких параметров физиологического тремора для автоматизируемой оценки изменений эмоционального состояния, вызванных демонстрацией эмоционально значимых стимулов. Отдельно рассматривается динамика тремора в диапазонах 8-12 и 17 - 22 Гц, механизмы возникновения которой, предположительно, имеют центральное происхождение.

Определяющей характеристикой вызванных аффективных психомоторных реакций, как продемонстрировано в данной работе, является их двухфазный характер. Развивающиеся последовательно разнонаправленные изменения параметров тремора в интервалах 300 – 450 мс и 450 – 700 мс с дальнейшим возвращением к фоновым значениям являются типичным паттерном реагирования на предъявляемые эмоционально значимые стимулы.

Описываемая последовательность протекания переходных процессов была характерна как для амплитуды, так и для мгновенной частоты физиологического тремора. Абсолютные значения параметров ведущей руки на завершающем интервале 450 – 700 мс могут быть использованы для автоматизируемого обнаружения изменений эмоционального состояния. Выявленные индикаторы возникновения аффективных реакций позволяют проводить обнаружение незначительных по интенсивности аффективных реакций моделирование которых осуществлялось посредством предъявления

семантических эмоционально значимых стимулов и стимулов, связанных со скрываемой информацией.

В проведенном исследовании рассмотрены некоторые существующие подходы к оценке знака вызываемых эмоциональных состояний. Продемонстрирована принципиальная возможность использования индекса фронтальной межполушарной асимметрии электрической активности мозга в альфа-диапазоне для оценки знака аффективных реакций, вызванных предъявлением звуковых стимулов. Предложен метод формирования эмоциональных реакций с использованием довербальных вокализаций младенцев, находящихся в различных эмоциональных состояниях.



## ВЫВОДЫ

1. При исследовании вызванных изменений нормированной амплитуды физиологического тремора ведущей руки в диапазонах 8 – 12 и 17 – 22 Гц обнаружено, что вероятность возникновения максимальных положительных отклонений в интервале 450 – 700 мс, от момента начала предъявления сигналов связанных со скрываемой информацией, достоверно ( $p < 0.0004$ ) возрастает.

2. Усредненные вызванные изменения мгновенной частоты физиологического тремора ведущей руки, обусловленные демонстрацией эмоционально значимых семантических стимулов, принимают максимальные значения в интервале 550 – 650 мс от начала демонстрации. Амплитуда вызываемых изменений достоверно ( $p < 0.009$ ) возрастает при предъявлении стимулов, обладающих более высокой эмоциональной значимостью.

3. Направление вызванных изменений фронтальной асимметрии электрической активности мозга в альфа-диапазоне, при прослушивании довербальных вокализаций детей, определяется эмоциональной значимостью соответствующих сигналов. Предъявление эмоционально положительных сигналов приводит к увеличению индекса фронтальной межполушарной асимметрии, вычисляемого как разность логарифмированных значений альфа индексов правого и левого отведений.

4. Полученные средства психофизиологической оценки изменений эмоционального состояния могут использоваться для оценки вызываемых аффективных реакций непосредственно или в составе комплексной многопараметрической системы.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. Александров А.Ю., Уплисова К.О., Попов О.С., Степанов А.В., Иванова В.Ю. Особенности динамики мгновенной частоты физиологического тремора при восприятии сигналов с различной эмоциональной значимостью // Рос. физиол. журн. им. И. М. Сеченова. – 2016. – Т. 102, № 10. - С. 1224 - 1232.
2. Иванова В.Ю., Александров А.Ю., Вайсертрейгер А.С-Р., Куликов Г.А. Влияние неосознаваемой сенсорной стимуляции на эмоциональное состояние человека // Сенсорные системы. – 2007. – Т. 21, №2. - С. 114 - 124.
3. Иванова В.Ю., Павликова М.И., Александров А. Ю., Рыженкова Ю.Ю. Особенности фронтальной асимметрии ЭЭГ взрослых auditors при восприятии гласноподобных звуков младенцев // Сенсорные системы. – 2004. – Т. 18, № 3. - С. 195 – 198.

### Тезисы конференций

1. Aleksandrov A. Y., Uplisova K. O., Ivanova V. Y. Visually evoked emotional reaction recognition based on physiological tremor acquisition // Materials of The IEEE International conference. «Video and Audio Signal Processing in the Context of Neurotechnologies» June 26 – 30, 2017, St. Petersburg, Russia, 2017. – P. 13.
2. Александров А. Ю., Уплисова К. О., Степанов А. В., Иванова В. Ю. Использование особенностей физиологического тремора и периферической гемодинамики для оценки эмоциональных реакций возникающих при сокрытии информации // Материалы XXIII съезда физиологического общества им. И. П. Павлова. 18 – 22 сентября 2017. Воронеж, Россия, 2017. - С. 1186 – 1188.
3. Александров А. Ю., Уплисова К. О., Попов О. С., Степанов А. В., Иванова В.Ю. Исследование взаимосвязи амплитудно-частотных характеристик физиологического тремора и ЭЭГ человека // Нейронаука для медицины и психологии: 12-й Международный междисциплинарный конгресс. Судак, Крым, Россия; 1 – 11 июня 2016 г.: Труды конгресса / Под ред. Лосевой Е.В., Крючковой А.В., Логиновой Н.А. – М.:МАКС Пресс, 2016. – 494 с.

4. Иванова В.Ю., Александров А.Ю., Вайсертрейгер А.С-Р., Куликов Г. А. Исследование возможности изменения эмоционального состояния человека под влиянием неосознаваемого сенсорного воздействия // Тезисы докладов 4 школы конференции «Физиология слуха и речи». С-Петербург, Россия. - 2005. - С.30.
5. Ivanova V.Y., Kulikov G.A., Vaissertreiguer A. S., Aleksandrov A. Y. Human emotional status dynamics under subliminal visual stimuli perception // Abstracts of the 13-th World Congress of Psychophysiology, “The Olympics of the brain”. Turkey, Istanbul. International Journal of Psychophysiology. – 2006. - V. 61. - P. 353.
6. Ivanova V.Y., Aleksandrov A.Y., Vaissertreiguer A. S., Kulikov G. A. The subliminal visual perception effects on human emotional status // 29-th European Conference of Visual Perception. Russia, Saint-Petersburg. Abstracts. Perception. – 2006. - V.35. - P. 104.
7. Вайсертрейгер А.С-Р., Александров А.Ю., Иванова В.Ю. Влияние неосознаваемого воздействия сенсорных стимулов на эмоциональное состояние человека // «XIII международное совещание и VI школа по эволюционной физиологии». Санкт-Петербург, Россия. - 2006. - С. 43.