

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА

БИОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра физиологии человека и животных

Выявление электрографических коррелятов
субъективной значимости зрительных стимулов
Identifying electrographic correlates of subjective importance
of visual stimuli

Выпускная квалификационная работа бакалавра

Студентки 4 курса

Косиченко Е. А.

Научный руководитель:

к.б.н. Ганин И. П.

Рецензент:

к.б.н. Литвинова А. С.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ.....	8
1.1. Интерфейс Мозг-Компьютер.....	8
1.2. Интерфейс Мозг-Компьютер для детекции команд пользователя и для распознавания эмоционального фокуса.....	10
1.3. Стимулы в данной работе.....	10
1.4. Компонент P300.....	11
1.5. Компоненты N1 и P1.....	12
1.6. Трехстимульная одбол-парадигма.....	13
1.7. Парадигма пассивного внимания к стимулам.....	14
1.8. Процессы, связанные с вниманием.....	15
1.9. Непроизвольное внимание.....	17
1.10. Эмоционально окрашенные стимулы	18
1.11. ПСС при предъявлении эмоционально окрашенных стимулов...20	
1.12. Сравнение ПСС при предъявлении стимулов различной валентности.....	24
1.13. Компонент P200.....	26
1.14. Компоненты, специфичные для изображений лиц.....	26
1.15. Влияние положения частей лица на амплитуду компонентов....28	
1.16. Влияние выражения лица на амплитуду компонентов.....	29
1.17. Распознавание структуры и выражения лица.....	30
1.18. Компоненты N400 и N400f	31
1.19. Значение компонента P100 в процессировании лиц.....	33
1.20. Система распознавания эмоций на основе ЭЭГ.....	33
Глава 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ.....	36
2.1. Испытуемые.....	36
2.2. Процесс записи.....	36
2.3. Стимулы.....	37
2.4. Схема эксперимента.....	38

2.5. Анализ данных.....	39
Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ.....	41
3.1. Общий обзор ПСС	41
3.2 Сравнение потенциалов, вызванных эмоциогенными стимулами, в условиях активного и пассивного внимания.....	44
3.3. Сравнение компонента P200 в разных режимах.....	47
3.4. Сравнение компонента P300 в разных режимах.....	49
3.5. Сравнение амплитуд компонентов P200 и P300.....	51
3.6. Сравнение компонента N1 в разных режимах.....	53
3.7. Сравнение компонента P100 в разных режимах.....	54
3.8. Сравнение компонента N400 в разных режимах.....	56
3.9. Компоненты ПСС в системах ИМК для распознавания команд пользователя и эмоционального фокуса.....	58
3.10. Точность классификации.....	59
3.11. Корреляция точности классификации с амплитудами компонентов.....	62
3.12. Результаты психометрических тестов «Самочувствие, активность, настроение» и «Шкала дифференциальных эмоций».....	64
3.13. Результаты теста Люсина. Зависимость точности классификации от уровня эмоционального интеллекта.....	66
Глава 4. ОБСУЖДЕНИЕ.....	68
4.1. Сравнение потенциалов, вызванных эмоциогенными стимулами, в условиях активного и пассивного внимания.....	68
4.2. Сравнение компонента P200 в разных режимах.....	68
4.3. Сравнение компонента P300 в разных режимах.....	69
4.4. Сравнение амплитуд компонентов P200 и P300.....	70
4.5. Сравнение компонента N1 в разных режимах.....	70
4.6. Сравнение компонента P100 в разных режимах.....	71
4.7. Сравнение компонента N400 в разных режимах.....	72
4.8. Точность классификации.....	72

4.9. Корреляция точности классификации с амплитудами компонентов.....	73
4.10. Результаты психометрических тестов.....	74
Заключение.....	76
Выводы.....	77
Список литературы.....	79
Приложения.....	84
1. Примеры изображений из базы IAPS.....	84
2. Примеры изображений из базы PICS.....	85

Введение

Нейрокомпьютерные интерфейсы – область исследований в нейрофизиологии, стремительно развивающаяся как в теоретическом, так и в прикладном аспекте. Интерфейсы Мозг-Компьютер (ИМК) представляют из себя технологию, которая позволяет пользователю отдавать команды компьютеру без использования периферических нервов и мышц, как правило, за счет анализа его электроэнцефалограммы (ЭЭГ) (Wolpaw et al., 2002). Наиболее обширная область применения ИМК – это клиническая сфера, где данная технология может использоваться в качестве нейрокоммуникатора для печати текста, для управления мобильными роботами, нейроманипуляторами и протезами (Wolpaw et al., 2002; Каплан, 2016), а также для восстановления нарушенных двигательных функций, например, после инсульта (Do et al., 2012), и для тренажеров концентрации внимания и контроля двигательной активности (Blankertz et al., 2010). Один из самых широко изучаемых в лабораториях ИМК, основанный на выделении реакции внимания к целевому (значимому) стимулу на фоне предъявляемых незначимых стимулов, получил название ИМК-P300 (Farwell & Donchin, 1988). Для управления в нем анализируется волна P300 и другие компоненты потенциалов мозга, связанных с событиями (ПСС). Заинтересованность пользователя в том или ином стимуле (символе, букве) проявляется в увеличении амплитуды компонентов ПСС в ответе на подсветку именно этого, но не другого стимула и таким образом детектируется в ИМК в виде команды, например, для набора соответствующей буквы на экране.

Однако реакция внимания на внешний стимул в ЭЭГ может быть зарегистрирована даже в условиях отсутствия внешнего явного внимания к нему, что, по-видимому, объясняется какой-то значимостью этого стимула в контексте личного опыта или эмоционального статуса субъекта. Например, особая ЭЭГ-реакция может наблюдаться в ответ на стимулы с

изображением шоколада, по сравнению с изображениями другой еды, а также целевыми стимулами, т.е. теми, на которые и только на которые нужно было обращать внимание (Asmaro et al., 2012). Сходные по смыслу результаты можно найти и в других работах. Например, было показано различие уровня внимания к предъявлению изображений, связанных с наркотиками, между испытуемыми, имеющими зависимость от марихуаны и без такой склонности (Asmaro et al., 2014). Во многих подобных работах эффекты были получены именно на нецелевые стимулы, т.е. не были обусловлены контекстом инструкции, а потому не требовали от испытуемых активного внимания.

На электрофизиологическом уровне могут быть выявлены не только реакции, связанные с эмоциональным контентом окружения, значимостью, опосредованной личным опытом субъекта, но и опосредованные некоторым снижением когнитивных функций, например, при депрессивном состоянии (Pišljarić et al., 2013). Эмоциональные стимулы могут также по-разному влиять на направленность внимания у субъектов с выраженным тревожным расстройством (Wang et al., 2013).

Из литературы, в т.ч. приведенных выше некоторых примеров, следует, что смещение внимания к определенному стимулу, опосредованное эмоциональностью самого стимула, контекстуальной или даже биологической значимостью, а также психопатологией, во многих случаях может быть детектировано по ЭЭГ-реакциям (в ПСС). Можно предположить, что при доработке такого рода методик, можно построить системы, которые на основе анализа ПСС позволят диагностировать различные состояния, обусловленные психоэмоциональным статусом субъекта, а также значимостью для него конкретного стимула на основе личного опыта и, возможно, некоторыми нарушениями психики. Это, в свою очередь, является неким отвлечением от принципов ИМК в сторону классификации уже не явных намерений-команд пользователя, а «скрытых» фокусов внимания. Существенным вопросом здесь является

разработка соответствующей экспериментальной парадигмы, которая может включать предъявление стимулов, обладающих для пользователя особой значимостью, которые могут как обладать скрытым «подпороговым» эмоциональным или другим оттенком, так и не обладать им.

Очевидно, что в подобной парадигме у испытуемого может не быть явного задания, либо имеющееся задание может быть не связано со специфическими стимулами, используемыми для детекции неявных фокусов внимания. Однако чтобы оценить возможность выделения ПСС-реакций в ответ на стимулы, несущие скрытый (для экспериментатора или даже для испытуемого) смысл, на первом этапе такого исследования было бы важно сначала изучить ПСС в задаче, где используемые стимулы обладают явной эмоциональной или иной выраженностью. Для этого в данной работе использовались стандартизованные базы изображений, включающие фотографии самого различного содержания, которые, согласно тестированиям на больших группах испытуемых, могут вызывать как положительные или отрицательные эмоции, так и быть нейтральными. Для оценки субъективной эмоциональной значимости стимула, особенно в небольшой группе испытуемых, важна индивидуальная оценка стимулов-изображений каждым испытуемым, поэтому в нашем исследовании для анализа ПСС группы целевых и нецелевых стимулов формировались на основе личных опросников. В нашем исследовании использовались две базы зрительных стимулов: одна состояла из фотографий различной тематики и сюжетов, другая включала только фотоизображения человеческих лиц. Показано, что использование лиц в качестве стимулов в ИМК-исследованиях может способствовать появлению более выраженной реакции в ПСС, а также появлению специфических компонентов, например N170 (Kaufmann et al., 2011; Jin et al., 2012), а эмоциональная коннотация стимула-лица может усиливать компоненты ПСС: например,

изображения злых лиц вызывают большее усиление ПСС, чем изображение счастливых лиц (Martens et al., 2010 – цит. по Jin et al., 2012).

Таким образом, остается в значительной мере открытым вопрос о том, в какой мере биологически или эмоционально значимый, но не актуальный в данный момент стимул может вызывать реакции в ЭЭГ по сравнению со стимулами исходно нейтральными, но к которым внимание привлекается согласно регламенту эксперимента.

В этой связи, **целью данной работы** было сравнительное исследование реакций ЭЭГ у человека в ответ на предъявление ему эмоционально окрашенных и нейтральных стимулов с привлечением и без привлечения внимания к последним.

Задачи исследования:

- Изучить и сравнить компонентный состав ПСС при предъявлении набора стимулов с фотоизображениями эмоциональных и нейтральных человеческих лиц без привлечения к ним активного внимания.
- Изучить и сравнить компонентный состав ПСС при предъявлении набора стимулов на основе фотоизображений различного эмоционального оттенка в условиях наличия и отсутствия активного внимания к нейтральным стимулам.
- Оценить эффективность классификации ПСС при предъявлении набора эмоциональных и нейтральных стимулов в условиях наличия и отсутствия активного внимания к нейтральным стимулам по показателям точности классификации.

Глава 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1. Интерфейс Мозг-Компьютер

Интерфейс Мозг-Компьютер (ИМК, в англоязычной литературе BCI – brain-computer interface) – система коммуникации, позволяющая управлять компьютером или другим устройством с помощью электрической активности головного мозга (Wolpaw, 2002). Существуют несколько разновидностей ИМК в зависимости от логики их работы и типа электрической активности, на основе анализа которой построено управление в них. Один из наиболее распространённых типов ИМК основан на анализе потенциалов, связанных с событиями (ПСС, в англоязычной литературе ERP – event related potentials).

ПСС – это специфические ответы на какие-либо мышечные, когнитивные или сенсорные события, которые можно выделить из целой электроэнцефалограммы (ЭЭГ). ПСС представляют собой колебания напряжения, время появления которых связывают со временем протекания некоторых психофизиологических процессов. ПСС могут быть зарегистрированы методом электроэнцефалографии и выделены из целой ЭЭГ фильтрованием и усреднением сигнала.

Возникновение ПСС связывают с экзогенными процессами (обязательный ответ на физические характеристики стимула или события во внешнем мире) и эндогенными процессами (обработка информации в мозге, которая может сопутствовать этому событию). Информация о том, в какой области коры и в какой момент после предъявления стимула возникают ПСС, используется во многих исследовательских программах и способствует диагностике различных заболеваний.

Компоненты ПСС обычно называют в зависимости от полярности (позитивный или негативный компонент) и латентности компонента (P300), либо его порядкового номера (N1). В некоторых случаях

обозначают характерный временной интервал (P300-500). Трудность заключается в том, что компоненты, отражающие характерные психофизиологические процессы, могут сильно варьировать во времени и порядке в зависимости от индивидуальных особенностей, возраста, условий эксперимента, клинического статуса испытуемого. Чтобы избежать неточности, целесообразно конкретизировать компонент в процессе работы (Picton, 2000).

В литературе отмечается, что в ИМК на основе ПСС наиболее часто используемым компонентом является P300 – позитивный пик, начинающийся развиваться через 300 мс после предъявления стимула. Чтобы подчеркнуть важность этого компонента, данную технологию Интерфейс Мозг-Компьютер часто обозначают ИМК-P300 (Farwell, Donchin, 1988). Однако другие компоненты ПСС также представляют значительный интерес, как для фундаментальной науки, так и для совершенствования технологии ИМК (Luck, 2005).

В настоящее время данный тип ИМК основан на том, что система способна распознавать, является ли стимул значимым или незначимым для пользователя. Таким образом, становится возможным, например, печатать текст или управлять механическим устройством, не задействуя мышцы и периферическую нервную систему.

Важной стадией в процессе использования ИМК является стадия классификации, когда система сравнивает потенциалы, возникающие при предъявлении значимых и незначимых стимулов. Эта стадия во многом определяет эффективность ИМК, поскольку позволяет в дальнейшем правильно интерпретировать намерение пользователя. После классификации становится возможной обратная связь – система становится способной определять, какой из стимулов является значимым (Nicolas-Alonso, Gomez-Gil, 2012).

В ИМК могут использоваться различные типы стимулов. Простейший вариант зрительных стимулов – буквы (буквенная матрица)

или геометрические фигуры. Стимулы могут предъявляться в виде матрицы или последовательно (одбол-парадигма). В случае матрицы значимые (целевые) и незначимые (нецелевые) стимулы разнесены в пространстве, в случае одбола – предъявляются в одной точке.

Концентрация внимания в классическом варианте одбола происходит в ходе счета значимых стимулов (пользователь мысленно отмечает появление или вспышку нужного символа-объекта).

1.2. Интерфейс Мозг-Компьютер для детекции команд пользователя и для распознавания эмоционального фокуса

При использовании Интерфейса Мозг-Компьютер для детекции намерений пользователь сознательно концентрирует внимание на определенном стимуле; в результате система способна распознать целевой стимул при помощи анализа потенциалов, связанных с событиями. Это классический вариант Интерфейса Мозг-Компьютер (ИМК-Р300). Однако возможно создание и другого типа ИМК – ИМК для распознавания эмоционального фокуса. В этом случае ставится противоположная задача – детектировать те стимулы, которые автоматически привлекли внимание пользователя в ходе анализа ПСС. Оба типа ИМК построены на схожих алгоритмах – на разнице в амплитудах ПСС различных классов (целевые/эмоциогенные и нецелевые). Таким образом, важнейшей задачей при разработке подобной системы является анализ и сопоставление ПСС при различных экспериментальных условиях (пассивное внимание к стимулам при детекции эмоционального фокуса и активное внимание к целевым стимулам при детекции команд) и различном стимульном материале.

1.3. Стимулы в данной работе

В данной работе в качестве стимулов мы использовали как изображения человеческих лиц, так и другие изображения различного

содержания. Многие стимулы в той или иной степени обладали способностью вызывать эмоции и привлекать автоматическое внимание испытуемых. В связи с этим следует подробно рассмотреть вопрос о влиянии на ПСС эмоций и процессов, связанных с пассивным вниманием. Лица представляют собой особый тип стимулов, способствующий появлению определенных характерных компонентов, поэтому следует также рассмотреть особенности ПСС при предъявлении лиц в качестве стимулов. Кроме того, важно обратить внимание на базовые компоненты ПСС, характерные для зрительных стимулов, а также на компоненты, чувствительные к активному вниманию.

1.4. Компонент P300

P300 – компонент ПСС, возникающий спустя 300 мс после предъявления стимула в ответ на значимый стимул. Это позитивный пик, наиболее выраженный в париетальных и центральных областях мозга. P300 является реакцией на значимые стимулы, на которых пользователь концентрирует внимание. Чем менее вероятно появление значимого стимула среди незначимых, тем выше амплитуда P300 (Donchin, 1977). Амплитуда P300 также выше в случае, когда пользователь не знает, когда появится значимый стимул. Показано, что P300 мало зависит от характеристик самого стимула, амплитуда и длительность P300 определяются реакцией индивида на стимул (Polich and Kok, 1995). P300 появляется как в случае, когда испытуемый получает задание концентрироваться на целевом стимуле, так и в случае, когда испытуемый сам решает, какой стимул будет для него целевым. Однако и то и другое должно происходить осознанно (Ritter et al, 1968 – цит. по: Picton, 1992).

P300 наиболее выражен в каналах Cz и Pz. Характерную картину P300, как и других ПСС, получают в ходе усреднения (стандартная процедура выделения ПСС из целой ЭЭГ). ПСС могут варьировать по

длительности и амплитуде от записи к записи, что сказывается на получаемых результатах.

Также оказывают влияние помехи и моргания; влияние морганий может быть исключено путем удаления из обработки соответствующих участков ЭЭГ, для чего обычно регистрируют электроокулограмму.

В случае, когда у испытуемого возникают трудности с определением является ли стимул целевым или нет, амплитуда P300 уменьшается, а длительность возрастает. В целом доказано, что P300 отражает реакцию мозга на существенную (значимую) или неожиданную информацию (Squires et al, 1976 – цит. по: Picton, 1992). Следует учитывать, что P300 может сильно варьировать от индивида к индивиду. Среди факторов, влияющих на характеристики компонента: возраст, индивидуальные особенности, употребление алкоголя, наркотических веществ, лекарственных препаратов, состояние здоровья в целом и наличие определенных заболеваний в частности (Picton, 1992).

Важным направлением в области исследования технологии P300 является изучение возможности ее применения для диагностики шизофрении, аутизма, слабоумия, алкоголизма, а также повреждений лимбической системы, таламуса, кортекса. Несмотря на широкое применение ИМК-P300 в медицине, его использование в области медицинской диагностики остается ограниченным (Picton, 1992).

1.5. Компоненты N1 и P1

Серия экспериментов показала, что использование латерально-затылочного компонента N1(латентность 170-200 мс, в некоторых условиях несколько больше) значительно улучшает точностно-скоростные качества ИМК-P300. Природа данного компонента во многом остается неясной, в литературе N1 часто связывают с пространственным вниманием к стимулу (в случае одбол-парадигмы). При предъявлении стимулов в виде матрицы (ИМК-P300) для целевых стимулов характерен

высокоамплитудный N1, что делает возможным его использование для повышения эффективности Интерфейса Мозг-Компьютер. Необходимым условием генерации высокоамплитудного компонента N1 является направление взгляда в позицию стимула, при этом его генерация не связана с направленным вниманием к заданному стимулу (Frenzel, Neubert, 2010; Шишкин, 2011).

P1 – волна, возникающая спустя 60-90 мс после предъявления зрительного стимула и достигающая пика спустя 100-130 мс. P1 – ранний компонент, чувствительный к параметрам стимула. Есть данные, что P1 чувствителен к направлению пространственного внимания и состоянию возбуждения испытуемого (Vogel and Luck, 2000 – цит. по: Luck, 2005).

1.6. Трехстимульная одбол-парадигма

В некоторых работах используют три типа стимулов: стандартные (нецелевые, появляются с высокой вероятностью), редкие (нецелевые, появляются редко) и целевые (появляются редко, испытуемый концентрируется на них). Редкие стимулы, наряду с целевыми, вызывают генерацию P300, амплитуда которого зависит от вероятности появления стимула.

Данная парадигма получила название трехстимульной одбол-парадигмы. Katayama and Polich (1999) показали, что наибольший P300 вызывают целевые стимулы (также в работе сравнивались зрительные и слуховые стимулы и было показано, что зрительные стимулы вызывают больший по амплитуде и латентности P300). Редкие нецелевые стимулы также вызывали P300, амплитуда которого была меньше, чем в случае целевых стимулов, однако различий в латентности не наблюдалось. Таким образом, было продемонстрировано, что редкие нецелевые стимулы также вызывают P300, сходный с P300, возникающий при предъявлении целевых стимулов.

Возможно, что если среди стимулов появится стимул, по субъективным причинам являющийся для индивида значимым (несущий ему какую-либо важную информацию), в ответ на этот стимул может развиваться P300 (в случае, если у испытуемого нет конкретного задания).

В работах Alexander et al. (1995) была обнаружена асимметрия компонентов ПСС (P3, P2, N1, N2), регистрируемых в правом и левом полушариях. Эксперимент показал, что у правшей амплитуды компонентов, регистрируемых в правом полушарии, выше для стандартных, редких и целевых стимулов, что особенно заметно на примере P3(P300).

В нашей работе используется вариант трехстимульной одбол-парадигмы, в котором роль редких стимулов могут играть стимулы, вызвавшие у испытуемого эмоции (эмоциогенные). Определить, какие стимулы являлись эмоциогенными, возможно при помощи опроса испытуемых.

1.7. Парадигма пассивного внимания к стимулам

В настоящей работе также проанализированы и описаны компоненты ПСС, возникающие в случае, когда испытуемые не получают каких-либо определенных инструкций относительно предъявляемых стимулов (например, задание считать количество появлений определенного стимула), а просто смотрят на появляющиеся на экране монитора стимулы (*passive viewing paradigm*) (Olofsson, 2008). Если какой-то из предъявляемых стимулов окажется для испытуемого субъективно значимым, ПСС, возникающие при предъявлении данного стимула, будут отличаться от ПСС, возникающих при предъявлении других, субъективно незначимых стимулов. При этом появляется возможность проанализировать разностные потенциалы между значимыми («целевыми») и незначимыми («нецелевыми») стимулами. Определить какой именно стимул оказался значимым, возможно при помощи опроса

испытуемых. Стимулы предъявляются последовательно и в одной точке (как в одбол-парадигме). Отличие состоит в том, что в каждой последовательности стимулов несколько стимулов могут оказаться «целевыми», или, наоборот, ни один из стимулов не будет иметь для испытуемого значимости. В связи с этим следует ожидать меньшую амплитуду компонент разностных потенциалов. Таким образом, речь идет о произвольном, или автоматическом, внимании к определенному стимулу.

1.8. Процессы, связанные с вниманием

Изучение процессов внимания, как автоматического, так и произвольного, занимает важное место в нейрофизиологических исследованиях.

Нейрофизиологические исследования дают возможность понять, как процессы внимания проявляются на физиологическом уровне, сравнив физиологическую реакцию, вызываемую стимулами, на которые испытуемые обращают внимание направленно или автоматически. Исследования потенциалов, связанных с событиями, занимают важное место среди различных методик, позволяющих изучать процессы внимания (PET, MRTf), поскольку предоставляют возможность зарегистрировать немедленные физиологические ответы на предъявляемые стимулы и проследить временной ход исследуемых процессов.

Экспериментально показано, что процессы внимания возникают как на ранних стадиях обработки поступающей информации (для зрительных стимулов уже спустя 60 мс после предъявления), так и на более поздних, причем на ранних стадиях эти процессы заключаются в отборе значимых деталей и уменьшении объема сенсорной информации, нуждающейся в дальнейшей обработке (Luck, 1998). Исследователи выделяют два эффекта, связанных с процессами внимания: P1 и N1 эффекты – увеличение амплитуды этих компонентов ПСС при внимании к целевому стимулу.

При этом N1-эффект отражает усиление намеренной обработки определенной информации (только в случае активного внимания), а P1 эффект отражает подавление обработки информации, незначимой в данных условиях (в случае как активного, так и пассивного внимания). Эти эффекты являются независимыми механизмами внимания, возникают в разных условиях и отражают разные процессы сенсорной обработки (Luck, 1998).

Поскольку различные свойства стимула обрабатываются нейронами, расположенными в различных областях зрительной коры, существует проблема комбинирования этих свойств для последующей обработки и восприятия объекта как целого. Многие исследователи полагают, что процессы, связанные с вниманием, направлены на то, чтобы решить проблему объединения различных свойств одного объекта (Crick and Koch 1990; Mozer 1991; Rosin, 1993 – цит. по: Luck, 1998).

В работах Eimer (1997) исследовалось внимание к определенной особенности стимула (цвет, форма). Было показано, что процесс избирательного внимания сопровождался большой негативностью латентностью 200-300 мс. Эксперимент состоял из двух частей: в одной части целевая черта менялась в ряду записей (быстрое внимание), в другой части оставалась постоянной для целого экспериментального блока (поддерживающееся внимание). Таким образом, анализировались различия при разной динамике фокусирования внимания к цвету или форме стимула. Негативность 200-300 мс характеризовалась большей амплитудой в случае поддерживающегося внимания, чем в случае быстрого внимания, что было особенно характерно для внимания к цвету. В случае поддерживающегося внимания, внимание к цвету целевых стимулов вызывало большую позитивность латентностью 150-200 мс и P300 большей амплитуды. Полученные данные доказывают, что процессы внимания, не связанного с пространственным восприятием (внимание к цвету), отличны от процессов пространственного внимания (внимание к

форме). К тому же, данные процессы наиболее эффективны при длительном фокусировании внимания.

1.9. Непроизвольное внимание

Учитывая цели нашей работы, следует более подробно остановиться на процессах, связанных с автоматическим вниманием. Известно, что ориентировочную реакцию вызывают два типа стимулов – новые стимулы (или неожиданные для данной ситуации) и сигнальные стимулы (биологически значимые, обычно эмоционально окрашенные). Ориентировочная реакция составляет основу для автоматического (непроизвольного) внимания, которое значительно отличается от произвольного, или сознательного, типа внимания (Ohman et al, 2001).

В ходе эволюции сформировались механизмы, позволяющие биологически значимым стимулам привлекать внимание, не задействуя сознательные процессы. Такой вид внимания называют пассивным (автоматическим) и противопоставляют активному (направленному, осознанному) вниманию. Под биологически значимыми стимулами подразумевают стимулы, связанные с ресурсами (еда, партнеры для спаривания) или опасностью. Эти стимулы вызывают соответственно положительные (указывающие на скорое удовлетворение потребностей) и отрицательные (указывающие на то, что потребности не будут немедленно удовлетворены) эмоции.

Показано, что стимулы, связанные с опасностью (отрицательно окрашенные), распознаются быстрее, чем положительно окрашенные стимулы (Ohman et al, 2001).

Автоматическое внимание можно изучать, используя пассивную одбол-парадигму. В отличие от условий предъявления активной одбол-парадигмы, испытуемые не получают задания специально обращать внимание на определенные стимулы. При этом исследуется ответ мозга на редкие девиантные стимулы, неожиданно возникающие среди

многократно повторяемых стандартных стимулов. Реакции, вызванные автоматическим вниманием, связывают с компонентами P200 и N250, имеющими большую амплитуду в случае девиантных стимулов по сравнению со стандартными. Возможно также участие раннего пика P100 в мобилизации системы автоматического внимания (Carretie et al.,2004).

1.10. Эмоционально окрашенные стимулы

Стимулы, вызывающие эмоциональную реакцию, сами по себе являются значимыми. Исследованию компонентов ПСС, связанных с эмоциональным восприятием стимулов, посвящен целый ряд работ.

Влияние эмоциональной окраски стимулов было показано также во многих электрофизиологических исследованиях. EPN (early posterior negativity) считается первым компонентом ПСС, отражающим селективную обработку эмоциональных стимулов. Наибольшая амплитуда EPN наблюдается при предъявлении стимулов эволюционной значимости (эротические картинки, картинки с изображениями увечий) (Junghofer et al, 2001 – цит. по: Schupp et al.,2003).

При этом было обнаружено соответствие электрофизиологических исследований (Schupp et al, 2003) и fMRI исследований (Pessoa et al, 2002 – цит. по: Schupp et al, 2003).

Эмоции вызываются стимулами и могут быть зарегистрированы на трех уровнях: субъективного опыта, явного поведения и физиологических изменений (Lang, 1993).

Ohman (1988) (цит. по: Schupp et al, 2003) обращает внимание на то, что эмоционально окрашенные стимулы вызывают ответы автоматически, даже если не происходит сознательной обработки стимула.

Эмоционально окрашенные стимулы могут быть описаны валентностью (позитивные, негативные), т.е. с учетом факторов, которые побуждают стремиться к ним или избегать их, и интенсивностью (насколько сильно побуждение). Полагают, что валентность и

интенсивность – параметры, интегрируемые в подкорковых центрах, ответственных за появление эмоций (Lang et al, 1993 – цит. по: Diedrich et al, 1996).

В ряде работ показано, что эмоциональная валентность стимула влияет на амплитуду комплекса P300, развивающегося спустя 300-700 мс после предъявления. Например, работа Naumann et al. (1992 – цит. по: Diedrich et al, 1996) подтверждает, что позитивные и негативные стимулы вызывают P300 большей амплитуды, независимо от того, обращают испытуемые внимание на эмоциональное или структурное содержание стимулов (испытуемые получали задание оценивать субъективную эмоциональную значимость слов или считать количество букв в них).

В целом эмоционально окрашенные стимулы вызывают повышенное внимание, и важную роль здесь играет участие миндалины в регуляции обработки стимулов в коре. Например, пациенты с поврежденной миндалиной не проявляли повышенного внимания к вызывающим отвращение словам (Anderson and Phelps, 2001 – цит. по: Schupp et al, 2003).

Внимание к эмоционально значимым стимулам исследовалось методами fMRI и PET, при этом наблюдалась повышенная активность при предъявлении эмоциональных фотографий в задних зрительных и более передних височных областях коры (Davis and Whalen, 2001– цит. по: Schupp et al, 2003).

Lang et al. (1998 – цит. по: Schupp et al, 2003) показали повышенную активность мозга при предъявлении эмоционально окрашенных картинок, Morris et al. (1998 – цит. по: Schupp et al, 2003) – при предъявлении испуганных лиц.

1.11. ПСС при предъявлении эмоционально окрашенных стимулов

В случае, когда испытуемые могут ориентировать свое внимание любым образом (например, в случае пассивного рассматривания стимулов без какой-либо определенной инструкции), показаны значительные физиологические ответы при предъявлении эмоционально значимых стимулов по сравнению с нейтральными. При рассматривании эмоционально значимых картинок наблюдаются два типа эффектов. Во-первых, ранняя негативность, достигающая пика спустя 200-300 мс после предъявления стимула (EPN –early posterior negativity), более выражена при предъявлении эмоционально значимых стимулов (Junghofer et al., 2001 – цит. по: Kissler et al., 2008). Эта ранняя негативность выражена в затылочных долях и схожа с негативностью, выявленной в исследованиях избирательного внимания к целевому стимулу («selection negativity») (Luck and Ford, 1998 – цит. по: Kissler et al., 2008).

Во-вторых, в ответ на эмоционально значимые стимулы в париетальных областях выражен позитивный пик латентностью около 500 мс, который некоторые исследователи относят к комплексу P300 (часто обозначается как LPC – late positive complex или LPP – late positive potential). Считается, что LPC отражает такие процессы, как оценивание, захват внимания, соотношение предъявляемых стимулов с предыдущим опытом. (Dien et al., 2004 – цит. по: Kissler et al., 2008).

В работах Kissler et al. (2008) в качестве стимулов использовались нейтральные и эмоционально окрашенные слова. Испытуемые сначала получили задание просто читать слова, затем – считать количество прилагательных либо существительных. Было показано, что вне зависимости от задания эмоционально (позитивно и негативно) окрашенные слова вызывали EPN большей амплитуды (в режиме со счетом амплитуда EPN не зависела от того, являлось слово целевым или нецелевым). Амплитуда позднего центрально-париетального LPC латентностью 450-650 мс оказалась сильно больше для целевых стимулов,

однако небольшая зависимость амплитуды LPC от эмоциональной окраски слов наблюдалась как при чтении, так и при счете целевых слов: приятные слова немного увеличивали амплитуду LPC. Таким образом, эмоциональный контекст слов обрабатывался без сознательных усилий и автоматически, причем процесс обработки отражает ранняя затылочная негативность (EPN), как и в случае предъявления эмоционально значимых изображений.

Foti et al. (2009) предприняли попытку выявить компоненты ПСС, чувствительные к эмоционально значимым картинкам, используя PCA (principal components analysis) – статистический подход факторного анализа, позволяющий выделить компоненты, невыраженные для усредненных ПСС.

Испытуемым было дано задание смотреть на появляющиеся изображения (приятные, нейтральные, неприятные). Анализировались компоненты N1, P3, EPN, LPP. EPN и LPP исследователи отнесли к уникальным компонентам, чувствительным к эмоциональным стимулам. EPN отражает раннюю избирательную обработку эмоционально значимых стимулов, LPP варьирует в зависимости от интенсивности субъективного эмоционального восприятия.

В некоторых случаях LPP считают аналогом P3 (P300) – компонента, чувствительного к мотивационно значимым или важным для данного задания стимулам (Кок, 1997 – цит. по: Foti et al., 2009). В некоторых работах были показаны модуляции P300 при предъявлении эмоционально значимых стимулов, в том числе и в случае их пассивного разглядывания (Keil et al., 2002 – цит. по: Foti et al., 2009). В отличие от P300, LPP наблюдается до конца и даже после предъявления (Hajcak & Olvet, 2008 – цит. по: Foti et al., 2009). Есть также данные о том, что париетальная позитивность латентностью 400-1000 мс переходит в более широко распространенную в коре позитивность на интервале 1000-2000 мс, что

указывает на то, что LPP едва ли можно считать видоизмененным P300 (Foti & Hajcak, 2008 – цит. по: по Foti et al., 2009).

Несмотря на то что EPN – гораздо более ранний компонент (максимум в интервале 200-300 мс), он может выходить за пределы этих рамок и перекрываться с LPP, в связи с чем возникает вопрос о независимости данных компонентов.

В работе Foti et al. (2009) было показано, что эмоциональная окраска усиливает компонент N1, выраженный в центропарietальных областях (латентность 130 мс). Также была зарегистрирована EPN в затылочных и височных долях (максимум 230 мс) и показана ее чувствительность к эмоциональной окраске стимула. Далее была выражена продолжительная негативность, которую исследователи отнесли к инвертированной LPP. Уже спустя 300 мс было заметно усиление этого компонента при предъявлении эмоционально окрашенных стимулов по сравнению с нейтральными, причем амплитуда этого компонента больше для неприятных стимулов, чем для приятных.

Исследователи предполагают, что ранняя часть LPP может быть связанной с комплексом P300 (300-600 мс), в то время как более поздняя часть отражает обработку эмоционально значимой информации. То есть LPP содержит широкий спектр позитивностей, который включает в себя компонент, напоминающий P300. Ранние компоненты, чувствительные к эмоционально значимым стимулам (париетально-затылочная негативность, EPN), связаны с первоначальным захватом внимания, более поздние (LPP) – с обработкой эмоционально значимой информации. Таким образом, EPN и LPP отражают отдельные стадии обработки эмоционально значимой информации, при этом большая часть LPP отражает отдельный, чувствительный к эмоционально окрашенной информации процесс, и является компонентом, независимым от P300.

Moser et al. (2006, 2008) установили влияние сознательного контроля эмоционального восприятия на модуляции LPP. Испытуемым были даны

инструкции использовать специальные техники контроля эмоций для уменьшения или увеличения их эффекта. В работе Moser et al. (2006) испытуемым предъявлялись неприятные и нейтральные изображения. В процессе пассивного разглядывания неприятных изображений была показана увеличенная LPP по сравнению с нейтральными. Однако когда испытуемые выполняли инструкции для уменьшения эмоционального эффекта, амплитуда LPP уменьшалась. Исследователям не удалось добиться увеличения амплитуды LPP за счет сознательного увеличения эмоционального восприятия. Данный факт объясняется тем, что сильно негативно окрашенные картинки автоматически захватывают все ресурсы внимания, таким образом, амплитуда LPP имеет некий предел.

В работе Krompinger and Moser (2008) аналогичное исследование было проведено относительно позитивно окрашенных изображений. Пассивное разглядывание приятных изображений, как и ожидалось, привело к увеличенной амплитуде LPP по сравнению с нейтральными. Картина сложилась такая же, как и в случае предъявления неприятных изображений: амплитуда LPP уменьшалась, когда испытуемые выполняли инструкции для ослабления эмоционального восприятия; попытка увеличить амплитуду LPP путем выполнения инструкций для усиления эмоционального восприятия оказалась безрезультатной. Наиболее явно выраженными оказались модуляции позитивной медленной волны (slow wave – SW). Таким образом, LPP, отражающая эмоциональную обработку стимулов, может быть изменена под влиянием сознательного контроля, а именно уменьшена. Возможно, что амплитуда LPP имеет предел, что отражает захват всех свободных ресурсов внимания эмоционально значимыми стимулами вне зависимости от их валентности (позитивные, негативные). Эта идея была сформулирована еще в работах Pratto & John (1991) (цит. по: Krompinger and Moser, 2008).

В работах Diedrich et al (1996) исследовались особенности позитивной медленной волны при предъявлении эмоционально

окрашенных стимулов, при этом испытуемые должны были фокусироваться как на эмоциональном содержании предъявляемых слайдов, так и на их структуре. Было показано, что при фокусировании на эмоциональном содержании слайдов медленная волна (SW) латентностью более 600 мс достигает большей амплитуды. Позитивный пик латентностью около 720 мс достигает наибольшей амплитуды при предъявлении эмоционально окрашенных слайдов. В данном случае показаны отличия в поздних компонентах ПСС в зависимости от эмоциональной окраски слайдов. Исследователи предполагают, что поздние компоненты ПСС отражают регуляцию возбудимости коры, при этом медленная позитивная волна соответствует пониженной возбудимости в определенном участке коры (повышенная амплитуда SW во фронтальных областях коры может отражать ингибирование двигательной реакции, сопровождающей появление эмоционально окрашенных стимулов – регуляция автоматически возникающего эмоционального поведения).

1.12. Сравнение ПСС при предъявлении стимулов различной валентности

В работах Schupp et al (2003) была предпринята попытка выяснить, как эмоционально значимые стимулы (приятные и неприятные) привлекают внимание испытуемых. В исследовании испытуемые получили задание считать целевые стимулы (стимулы в виде шахматной доски определенной расцветки), среди которых появлялись нецелевые нейтральные и эмоционально значимые стимулы. В качестве отрицательно окрашенных стимулов использовались картинки змей и пауков (сравнивались с картинками цветов и грибов) и лица с угрожающим выражением (сравнивались с дружелюбными лицами). В ответ на целевые стимулы был получен хорошо выраженный P300, но при этом эмоционально значимые стимулы также обрабатывались (более высокая

амплитуда компонента EPN для приятных и неприятных стимулов по сравнению с нейтральными). Это свидетельствует о важности внимания к стимулам, сигнализирующим об опасности либо о возможности удовлетворения потребностей. EPN – ранняя негативность в задних областях коры, начинает развиваться около 150 мс после предъявления стимула и достигает максимума спустя 260-280 мс. Таким образом, подтверждается роль EPN в обработке эмоционально значимых стимулов.

В работах Carretie et al. (2004) испытуемым предъявлялись стимулы трех типов: не вызывающие эмоций, вызывающие позитивные эмоции и вызывающие негативные эмоции. Исследовалось автоматическое внимание к стимулам трех типов. В исследовании стандартными стимулами были нейтральные картинки, в качестве девиантных предъявлялись стимулы всех трех типов. Испытуемые получили задание считать изменения цвета рамки картинок (задание, не имеющее отношение к содержанию картинок). Было показано, что интенсивность и длительность некоторых компонентов, а также расположение в коре нейрональной активности, связанной с автоматическим вниманием, явно связаны с эмоциональной окраской стимулов. При этом ранние компоненты (P100) имели наибольшую амплитуду при предъявлении негативных стимулов, более поздние (P180) – при предъявлении и негативно, и позитивно окрашенных стимулов. Компонент N240 достигал наибольшей амплитуды при предъявлении позитивно окрашенных и нейтральных стимулов. Наблюдаемые эффекты связывают с повышением активности передней цингулярной коры. Также наблюдалось понижение активности в некоторых зонах зрительной ассоциативной коры. При этом P100 и P180 фокусировались в дорзальных зонах передней цингулярной коры, а N240 – в ее вентральных зонах, что может указывать на то, что данные зоны играют разную роль в обработке эмоциональных стимулов.

1.13. Компонент P200

P200 – компонент, во многом схожий с P300, выявляется в передних и центральных областях. P200 чувствителен к стимулам, которые имеют признаки целевых, при этом его амплитуды больше в случае, если целевой стимул предъявляется редко. P200 выражен в случае, если целевой стимул обладает простыми и выделяющимися чертами, в то время как P300 отражает реакцию на комплекс признаков целевого стимула (Luck, 2005).

Известно, что реакции на негативные события возникают быстрее и являются более выраженными. Carretie et al. (2000) исследовали роль внимания в возникновении подобной реакции. Эксперимент включал стимулы трех классов (позитивные, негативные, нейтральные), при этом валентность и интенсивность вызываемых ими эмоций определялась с помощью опросника. Таким образом, испытуемые, чьи данные впоследствии анализировались, определенно обращали внимания на эмоциональные стимулы. Амплитуда компонента P200 в центральных и париетальных сайтах, связанного с процессами внимания, значимо коррелировала с валентностью эмоций. Таким образом, поскольку P200 отражает связанные с вниманием процессы, можно заключить, что процессы внимания поддерживают скорость и выраженность реакций на негативные стимулы.

1.14. Компоненты, специфичные для изображений лиц

Одним из специфических компонентов, связываемых с процессированием лиц людей, является N170 – крупный негативный пик, выраженный в височно-затылочных областях головного мозга, возникающий спустя 140-200 мс после предъявления стимула. Многие исследователи считают N170 специфической вариацией компонента N1. N1 является более ранним компонентом, чем P300, и зависит от направления взгляда и пространственных характеристик стимула. При этом в отличие от P300, N1 мало зависит от изменения уровня внимания.

Если речь идет о распознавании лиц, следует говорить именно об N170, подчеркивая, что этот компонент отражает нервные процессы, происходящие при формировании зрительных образов человеческих лиц. Также к ПСС, чувствительным к лицам, относят VPP (vertex positive potential) – позитивный пик такой же латентности, как и N170, выраженный в фронто-центральных областях (Rossion et al, 2003).

Поскольку считается, что N170 отражает распознавание лица как структуры, возможно, что он не зависит от активного внимания. В работе Cauquil et al. (2000) была сделана попытка ответить на вопрос, влияет ли активное внимание на генерируемый в ответ на изображения лиц компонент N170. Исследователи использовали два типа целевых стимулов – изображения глаз и изображения лиц с закрытыми глазами. Нецелевыми стимулами являлись изображения лиц, перевернутых лиц, цветов и так далее. В результате наибольшую амплитуду N170 и VPP вызывали изображения глаз, вне зависимости от того, являлись они целевыми или нет. Исследователи сделали вывод, что активное внимание не влияет на амплитуду N170, то есть N170 не зависит от того, является стимул целевым или нет.

Компоненты ПСС, отражающие процесс распознавания лиц, успешно используются в ИМК. В работах Kaufmann et al. (2013) изображения лиц были использованы в качестве подсветки буквенной матрицы, что позволило повысить точность набора текста и увеличить скорость выполнения задания по сравнению с обычной буквенной матрицей именно благодаря значительной амплитуде данных компонентов ПСС. Релевантно, являются ли лица знакомыми или нет (знакомые лица увеличивают точность классификации). Использование новой парадигмы (face flashing paradigm) сделало возможным применение ИМК пользователями с различными нейродегенеративными расстройствами.

1.15. Влияние положения частей лица на амплитуду компонентов

Восприятие лиц сильно зависит от положения частей лица относительно друг друга. В работах Zhang et al. (2012) была предпринята попытка выяснить, влияет ли поворот изображения лица на характеристики компонентов ПСС. В качестве стимулов использовались изображения лиц и глаз, а также не относящиеся к лицам или частям лица картинки в обычном и перевернутом виде. Испытуемые управляли креслом с помощью технологии ИМК. Увеличение амплитуды N170 и VPP для лицевых стимулов (лица, глаза, лица с закрытыми глазами) по сравнению с контролем (картинки) подтвердило гипотезу об участии этих компонентов в процессе распознавания лиц. Исследователи обнаружили увеличение амплитуды VPP для инвертированных лицевых стимулов по сравнению с обычными. Для N170 значимой разницы обнаружено не было (возможно, из-за адаптации данного компонента к перевернутым изображениям). Однако компоненты имели большую латентность в случае инвертированных изображений, что подтверждает участие данных компонентов в процессе распознавания структуры и пространственного расположения частей лица. Инвертированные лица и лица с закрытыми глазами вызывали P300 с увеличенной амплитудой, что указывает на модуляцию P300 в зависимости от пространственной структуры стимула. Помимо изучения ПСС, исследователи также показали возможность улучшения ИМК при использовании инвертированных лиц как стимулов.

Rebai et al. (2000) исследовали ПСС при предъявлении изображений лиц и объектов в обычном и перевернутом виде. Авторы описали характерные компоненты, возникающие при пассивном разглядывании изображений. Первым выделяющимся компонентом является P100 в затылочной области, чувствительный к физическим характеристикам зрительного изображения. Следующими компонентами являются N170 и VPP (в случае объектов N170 соответствует более поздний компонент N190, VPP – более поздний позитивный компонент P220 в задних областях

и негативный компонент N220 в передних областях). В случае инвертированных лиц N170 возникал позже, при этом максимальная задержка наблюдалась в правой париетальной области. N170 имел большую амплитуду, что было особенно выражено в передней височной области коры. Также наблюдались P220 и N220, причем латентности этих компонентов были значимо больше в правом полушарии по сравнению с левым. При предъявлении перевернутых объектов возможно исчезновение N190 и появление нового компонента P170, максимально выраженного в затылочно-теменных регионах (в лобных долях ему соответствует N170).

1.16. Влияние выражения лица на амплитуду компонентов

Интересным представляется вопрос, влияет ли интенсивность и содержание эмоций предъявляемых лиц на компоненты ПСС. В работах Sprengelmeyer and Jentsch (2006) было показано, что амплитуда N170 может возрастать при предъявлении эмоциональных лиц по сравнению с нейтральными. При этом амплитуда N170 зависит от интенсивности, но не от типа эмоции. В исследовании испытуемые должны были реагировать на пол предъявляемого лица (нажимать на одну из двух кнопок). Поскольку испытуемые концентрировались на определении пола, а не на выражении лица, интенсивность и тип эмоции (злость, страх, отвращение) не влияли на скорость и точность выполнения задания. Анализ ППС позволил зафиксировать реакцию на лица, выражающие отвращение, в то время как ПСС, вызываемые лицами со злым и испуганным выражением, не отличались. Было обнаружено, что чем интенсивнее выраженная на предъявляемом лице эмоция, тем больше амплитуда N170, при этом тип эмоции не важен. Отличия по амплитуде наиболее выражены в каналах P9 и P10. Таким образом, на ранний процесс распознавания лица влияет его выражение.

1.17. Распознавание структуры и выражения лица

Согласно модели, предложенной Bruce & Young (1986 – цит. по: Sprengelmeyer and Jentzsch, 2006), распознавание эмоций (выражения лица) и распознавание лица как структуры являются независимыми процессами, то есть данная модель является двухфазной. В распознавание эмоций вовлечена огромная нейронная сеть, в которой значительное место занимает миндалина, полосатое тело, ядра таламуса. Вопрос, как люди распознают эмоции, детально рассматривался в нейрофизиологических исследованиях, однако данные исследования не позволяют проследить протекание процесса распознавания эмоций во времени. Это становится возможным путем изучения компонентов ПСС, особенно N170. Существует мнение, что N170 отражает процесс обработки лица как зрительного стимула, что согласуется с моделью Bruce & Young.

В работах Eimer and Holmes (2002 – цит. по: Sprengelmeyer and Jentzsch, 2006) сравнивали ПСС, возникающие при предъявлении нейтральных и испуганных лиц, в результате чего был обнаружен позитивный компонент ПСС во фронто-центральной области, возникающий спустя 120 мс после предъявления и сопровождающийся позитивностью латентностью около 200 мс после предъявления стимула. Batty and Taylor (2003 – цит. по: Sprengelmeyer and Jentzsch, 2006) исследовали влияние выражения радости, удивления, страха, грусти, отвращения и злости на ПСС, и обнаружили специфические модуляции ПСС во фронто-центральных сайтах латентностью 220-450 мс. Valconi and Pozzoli (2003 – цит. по: Sprengelmeyer and Jentzsch, 2006) исследовали специфичный к эмоциям компонент N230, выраженный в затылочной области.

В работах Eimer and Holmes (2002) выражение лица не влияло на амплитуду N170. В данном исследовании стимулами являлись фотографии испуганных и нейтральных лиц (часть из них были перевернуты) и изображения домов. Испытуемые должны были жать на кнопку в случае,

если замечали стимул, присутствовавший в предыдущей записи, и воздерживаться от реакции во всех других случаях. Анализ ПСС показал, что процесс распознавания выражения лица начинается почти сразу после предъявления стимула: в случае испуганных лиц была обнаружена позитивность латентностью 120 мс во фронтоцентральной области и следующая за ней позитивность латентностью более 250 мс. На N170 выражение лица не оказало абсолютно никакого влияния, что может подтвердить, что распознавание лица и распознавание выражения лица – параллельные процессы, что согласуется с моделью, предложенной Bruce и Young.

Примечательно, что в работах Choi et al. (2015) были обнаружены гендерные различия в амплитуде N170. В исследовании испытуемые жали на кнопку, когда среди нецелевых стимулов (нейтральные лица) появлялись целевые (эмоциональные лица). В ответ как на целевые, так и на нецелевые стимулы появлялся мощный N170. Однако у женщин амплитуда N170 была значимо больше для целевых стимулов (эмоциональные лица), у мужчин же разницы между целевыми и нецелевыми стимулами не наблюдалось. Исследователи предполагают, что у женщин возрастание амплитуды N170 связано с произвольным вниманием к целевому стимулу. Возможность гендерных различий стоит иметь в виду при объяснении полученных в нашей работе результатов, поскольку испытуемыми являлись как юноши, так и девушки.

1.18. Компоненты N400 и N400f

N400 – негативный компонент, регистрируемый в различных областях коры (максимальная амплитуда в центральной и париетальной областях). N400 впервые был описан Kutas and Hillyard (1980 – цит. по: Duncan et al, 2009) при сравнении реакции на предсказуемое и неподходящее по смыслу окончание предложения (N400 был зарегистрирован во втором случае). Вскоре было выдвинуто предположение о том, что N400 возникает в ответ

на разнообразные вербальные стимулы. Компоненты, схожие с N400, возникают также при предъявлении зрительных стимулов (картинки, фотографии), однако имеют несколько отличное распределение по коре (Duncan et al, 2009).

West and Holcomb (2001) анализировали N400, возникающий в ответ на черно-белые картинки, составляющие простую историю, при этом последняя картинка либо соответствовала, либо не соответствовала предыдущему контексту. Амплитуда N400 была больше в случае несоответствующих смыслу истории изображений. В данном случае N400 включал два различных компонента: N300 во фронтальных и центральных сайтах и более распространенный по коре N400, пик которого был выражен спустя 500 мс. N300 специфичен для семантической обработки изображений. Однако механизмы интеграции информации, заключенной в картинках либо в словах с предыдущим контекстом, представляются схожими. В целом, полученные данные поддерживают теорию о том, что N400 отражает легкость интеграции информации из различных источников в текущий речевой образ.

N400f, негативность латентностью 300-500 мс, и сопровождающая ее позитивность P600f, возникающая спустя более 500 мс после предъявления стимула, характерны для знакомых лиц. Если N170 отражает первичное распознавание лица, то поздние компоненты являются частью процесса узнавания. Эти компоненты возникают, когда предъявляемое лицо является знакомым. Известно, что поворот изображения лица нарушает процесс его узнавания, и действительно, при предъявлении инвертированных лиц поздние компоненты N400f и P600f отсутствовали. N170 для знакомых и незнакомых лиц не различался, что подтверждает, что процесс узнавания начинается позже, чем процесс распознавания структуры лица. Инверсия увеличивала латентность N170, то есть задерживала процесс распознавания. Возможно, что анализ ПСС может быть электрофизиологическим маркером нарушений, связанных с

распознаванием и узнаванием лиц (Eimer, 2000).

1.19. Значение компонента P100 в процессировании лиц

В работе Herrman et al. (2004) исследовалась значимость компонента P100, выраженного в теменно-височных областях, в процессировании изображений лиц людей. В работе испытуемым предъявлялись изображения лиц и зданий, а также дефектных лиц для анализа чувствительности компонента P100 лицам. Было показано, что процессы, связанные с восприятием лиц, начинаются рано, а именно, спустя 100 мс после предъявления стимула. Таким образом, N170 не является первым компонентом, чувствительным к лицам. Однако различия в амплитудах P100 зафиксированы не во всех исследованиях, при этом во многих из них компонент P100 просто не анализируется. Амплитудный эффект во многом зависит от того, с какими стимулами сравниваются лица. Например, в работах Itier and Taylor (2004 – цит. по: Herrman et al., 2004) были получены различия в амплитуде P100 между изображениями лиц и других объектов, в работах Halit et al. (2000 – цит. по: Herrman et al., 2004) – между изображениями лиц и лиц с дефектными особенностями. В работах Rossion et al. (2003 – цит. по: Herrman et al., 2004) изображения лиц сравнивались с изображениями таких объектов, как машины, и различий не было получено.

1.20. Система распознавания эмоций на основе ЭЭГ

Эмоции являются важнейшей адаптацией, подготавливающей организм к соответствующему ситуации поведению. Таким образом, важнейшим процессом является их распознавание, поскольку данный процесс позволяет оценить состояние других индивидуумов.

На основе ИМК может быть создана система для распознавания эмоций. В работе Rached and Perkusich (2013) была предложена система для распознавания эмоций с учетом процессированных ЭЭГ сигналов,

отражающих вызванную эмоцию. При использовании данной системы исследователи различали четыре типа эмоций различной валентности и интенсивности. Из ЭЭГ был выделен тета- и альфа- ритм и посчитана энергия и энтропия соответствующих ритмов. В соответствии с данными параметрами сигналы мозга были классифицированы в четыре типа эмоций. Эмоции, испытываемые участниками исследования, были определены по базе данных ЭЭГ сигналов, полученных в ходе экспериментов. Были вычислены и использовались для классификации средние значения и стандартные отклонения значений энергии и энтропии, базирующихся на тета- и альфа-ритмах.

Система распознавания эмоций на основе ИМК может быть использована одновременно с распознаванием эмоций человека по выражению лица, поведению, голосу (например, в ходе последующего просмотра видеозаписей), а также по физиологическим сигналам.

Liu et al. (2011 – цит. по: Rached and Perkusich, 2013) предложили алгоритм классификации электрических сигналов мозга, соответствующих эмоциям человека. В качестве стимулов использовались песни (первая часть эксперимента) и звуки, вызывающие определенные эмоции (вторая часть эксперимента). Через канал FC6 оказалось возможным классифицировать эмоции по уровню возбуждения. Каналы AF3 и F4 были использованы для классификации эмоций по валентности. Авторы утверждают, что позитивная эмоция вызывает большую активацию в лобной доле одного полушария, негативная – в противоположном. Привязка позитивных и негативных эмоций к одному из полушарий носит индивидуальный характер. В работе выделены шесть основных типов эмоций различной интенсивности и валентности (страх, фрустрация, грусть, удовлетворение, удовольствие, счастье).

Движения мимических мышц могут создавать помехи для электрических сигналов мозга, поэтому распознавание эмоций одновременно по выражению лица и ЭЭГ представляется

затруднительным. Savran et al. (2006 – цит. по: Rached and Perkusich, 2013) использовали инфракрасную спектроскопию для одновременного изучения реакций мозга и выражений лица, отражающих испытываемые эмоции. Авторы также создали базы данных сигналов ближней инфракрасной спектроскопии, а также ЭЭГ сигналов и физиологических параметров (проводимость кожи и ЧСС). Эти параметры были записаны и измерены в течение предъявления эмоциогенных картинок в качестве стимулов.

Глава 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

2.1. Испытуемые

В исследовании принимало участие 14 здоровых испытуемых. Исследование включало запись электроэнцефалограммы (ЭЭГ) в процессе выполнения испытуемыми заданий, связанных с изображениями, возникающими на экране монитора. Часть испытуемых уже принимала участие в подобном исследовании. Все были ознакомлены с информацией об эксперименте и подписали информированное согласие. Исследование было одобрено комиссией по биоэтике МГУ.

2.2. Процесс записи

ЭЭГ регистрировалась монополярно с помощью 24 скальповых электродов (F3, Fz, F4, FC5, FC1, FC2, FC6, C3, Cz, C4, CP5, CP1, CP2, CP6, P7, P3, Pz, P4, P8, PO7, POz, PO8, O1, O2), фиксируемых на коже головы с помощью эластичного шлема (шапочки) для ЭЭГ. Использовались шапочки размеров LM и L. В качестве референта использовались электроды на мастоидах, также фиксировавшиеся с помощью шлема (референт на правом мастоиде, затем пересчет с учетом электрода на левом мастоиде). Кроме того, регистрировалась вертикальная (с помощью электрода, расположенного над левым глазом) электроокулограмма (ЭОГ) для контроля артефактов от морганий. Использовался усилитель NVX52, частота дискретизации сигнала – 500 Гц.

Процесс записи ЭЭГ и управление ходом эксперимента осуществлялись в программе VCI2000. Синхронизация записываемых вместе с ЭЭГ меток начала стимулов с моментом их реального начала осуществлялась тем же программным обеспечением. Точность предъявления стимула тестировалась один раз в начале всей серии в тесте с использованием датчика на основе фотодиода, установленного в правом

верхнем углу экрана, где предъявлялся квадрат, который мигал белым цветом синхронно с подсветками целевых стимулов. Целевые эпохи с сигналом от фотодиода накладывались друг на друга. Ошибка времени («разброс») при наложении сигнала от 200 целевых эпох в таком тесте не превышала временного окна в 35 мс относительно момента реального начала стимула. Также присутствовала постоянная задержка около 80 мс, связанная, в основном, с характеристиками компьютера и монитора, которая корректировалась в процессе обработки данных таким образом, чтобы начало стимула попадало на 0 мс.

2.3. Стимулы

Была использована система с двумя мониторами; на одном загружались параметры, на другом предъявлялись стимулы. Стимулы предъявлялись на 24-дюймовой жидкокристаллическом мониторе LG flatiron 24EB23PY-BC. Угловые размеры монитора составляли $35,9 \times 22,8^\circ$.

Стимулы предъявлялись в режиме одбол-парадигмы (в центре экрана последовательно появляются разные стимулы, в промежутках между стимулами экран оставался пустым). В качестве стимульного материала использовались фотографии лиц людей и изображения, представленные в базах данных Psychological Image Collection at Stirling (PICS, pics.stir.ac.uk, 2008) и International Affective Picture System (IAPS, Lang, 2008). Изображения были скомбинированы в наборы по 6 стимулов в каждой. Затем наборы загружались в рандомизированном порядке, стимулы из каждого набора предъявлялись в ходе одной записи. Стимулы предъявлялись в виде стимульных последовательностей. Одна стимульная последовательность включает предъявление каждого стимула из набора по одному разу в случайном порядке. Количество стимульных последовательностей в одной записи – 10. Длительность стимула – 200 мс, межстимульный интервал – 500мс. Таким образом, время между началом стимулов составляло 700 мс, а частота стимуляции – 1,43 в секунду.

Угловые размеры стимулов: $9,2 \times 13,8^\circ$ (лица) и $12,9 \times 9,6^\circ$ (изображения).

2.4. Схема эксперимента

Испытуемый сидел в кресле внутри экранированной камеры для записи ЭЭГ на расстоянии 80 см от монитора.

Исследование состояло из трех блоков (режимов).

1. «Пассивное внимание. Лица». Испытуемые получали задание смотреть в центр экрана, где предъявлялись изображения лиц из базы PICS (в англоязычной литературе – *passive viewing paradigm*). Режим включал 10 записей. Затем испытуемые оценивали изображения по визуальной аналоговой шкале с крайними значениями «Не вызвало эмоций / Вызвало эмоции» (ставили крестик на прямой длиной 100 мм). Изображения предъявлялись в программе PowerPoint в течение 1 сек, затем возникал пустой слайд, и испытуемые имели возможность оценить изображение.
2. «Пассивное внимание. Изображения». Блок аналогичен предыдущему, вместо лиц предъявлялись фотографии из базы IAPS.
3. «Активное внимание к целевому стимулу». Использовался стимульный материал как в блоке 2, но порядок предъявляемых наборов стимулов отличался. Одно из изображений в каждой записи указывалось в качестве целевого. Испытуемые получали задание считать появления целевого стимула, мысленно четко отмечая момент его возникновения.

Также испытуемые проходили три психологических теста. Два из них отражают текущее состояние и настроение испытуемого («Самочувствие, активность, настроение» и «Шкала дифференциальных эмоций»). Данные тесты испытуемые проходили во время установки электродов. Тест эмоционального интеллекта Люсина, позволяющий оценить способность испытуемых распознавать и контролировать эмоции и их выражение, испытуемые проходили в конце эксперимента.

Была проведена рандомизация режимов. Часть испытуемых выполняла задание в порядке 1, 2, 3, часть – в порядке 2, 1, 3, при этом

режим с инструктированным вниманием всегда следовал в конце.

В режиме «Активное внимание к целевому стимулу» вероятность целевого стимула составляла $1/6$, соответственно, количество целевых и нецелевых эпох было равно 100 и 500; при этом общее количество эпох зависело от числа удаленных из-за артефактов эпох. В режимах «Пассивное внимание» вероятность целевого стимула была близка к $1/6$, но могла варьировать, поскольку целевым стимулом являлся стимул, оцененный испытуемым как вызвавший эмоции. При этом из 60 стимулов выбирались 10 стимулов, имевшие в процессе опроса верхние значения рейтинга. Нижняя граница этих значений определяла порог, индивидуальный для каждого испытуемого и определяющий, является стимул целевым или нет.

2.5. Анализ данных

Производилось выделение ПСС; детальный анализ их структуры и топографии осуществлялись в среде MATLAB 7.1 (MathWorks) с помощью специально написанных программ. Для визуализации данных при поиске артефактных эпох использовалось приложение EEGLAB. Анализ данных включал разбиение каждой записи ЭЭГ на эпохи относительно начала подсветки с границами $[-0,1 \ 0,7]$ сек. Далее все записи просматривались в программе EEGLAB для выявления артефактных эпох.

Для удаления артефактов из ЭЭГ использовалось автоматическое нахождение артефактных эпох по критерию превышения амплитудой хотя бы в одном из каналов порога ± 50 мкВ в любом из каналов. После этого запись обрабатывалась визуально и результаты автоматического поиска корректировались (удалялись некоторые автоматически найденные артефактные эпохи). Средний процент удаленных целевых эпох составил 9%.

При обработке полученных данных анализировались ПСС в ответ на целевые и нецелевые стимулы. Число нецелевых эпох снижалось до

числа целевых. После усреднения по записям для каждого режима, для каждого испытуемого и для каждого канала получали целевые и нецелевые ПСС. Также рассчитывались разностные потенциалы (целевой минус нецелевой), которые впоследствии использовались для анализа амплитуды компонентов ПСС.

Для дальнейшей статистической обработки определялись амплитуды компонентов в разностных ПСС. Амплитуда компонентов P200, P300, N1 и P100 измерялась как максимальное либо минимальное значение в индивидуально подобранном для каждого испытуемого окне. Амплитуда компонента N400 измерялась как среднее в окне 450-700 мс. Хотя запись велась в 24 каналах, амплитуды компонентов были измерены в тех каналах, в которых ожидалось наибольшие по модулю значения амплитуд компонентов. P200, P300 и N400 были измерены в каналах Cz и Pz, N1 и P100 - в каналах PO7, PO8, O1, O2. Для анализа амплитуд компонентов N1 и P100 использовались разностные кривые для усредненного затылочного канала (PO7, PO8, O1, O2). При анализе отдельных компонентов данные некоторых испытуемых исключались из анализа, если данный компонент было затруднительно идентифицировать, либо он отсутствовал вовсе.

Для оценки эффективности классификации ПСС использовался метод классификации на основе линейного дискриминанта Фишера, используемый в ИМК-Р300, позволяющий определить, какой стимул из группы предъявляемых стимулов является целевым.

Данные были статистически обработаны в программе GraphPad Prism 6.0.

Глава 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Общий обзор ПСС

В ходе обработки данных были получены кривые для целевых и нецелевых стимулов, а также разностные кривые. Для режимов «Пассивное внимание. Лица» и «Пассивное внимание. Изображения» разностные кривые рассчитывались как кривая для целевых минус кривая для нецелевых, при этом целевыми являлись стимулы, значения эмоциогенности которых превышали установленный индивидуально для каждого испытуемого в ходе анализа опросников порог. На Рис.1 и Рис.2 представлен пример кривых для целевых и нецелевых стимулов, а также разностных кривых для режима «Пассивное внимание. Лица» в каналах Cz, Pz и усредненном затылочном канале. На Рис.3. представлен пример разностных кривых для того же режима в 24 каналах.

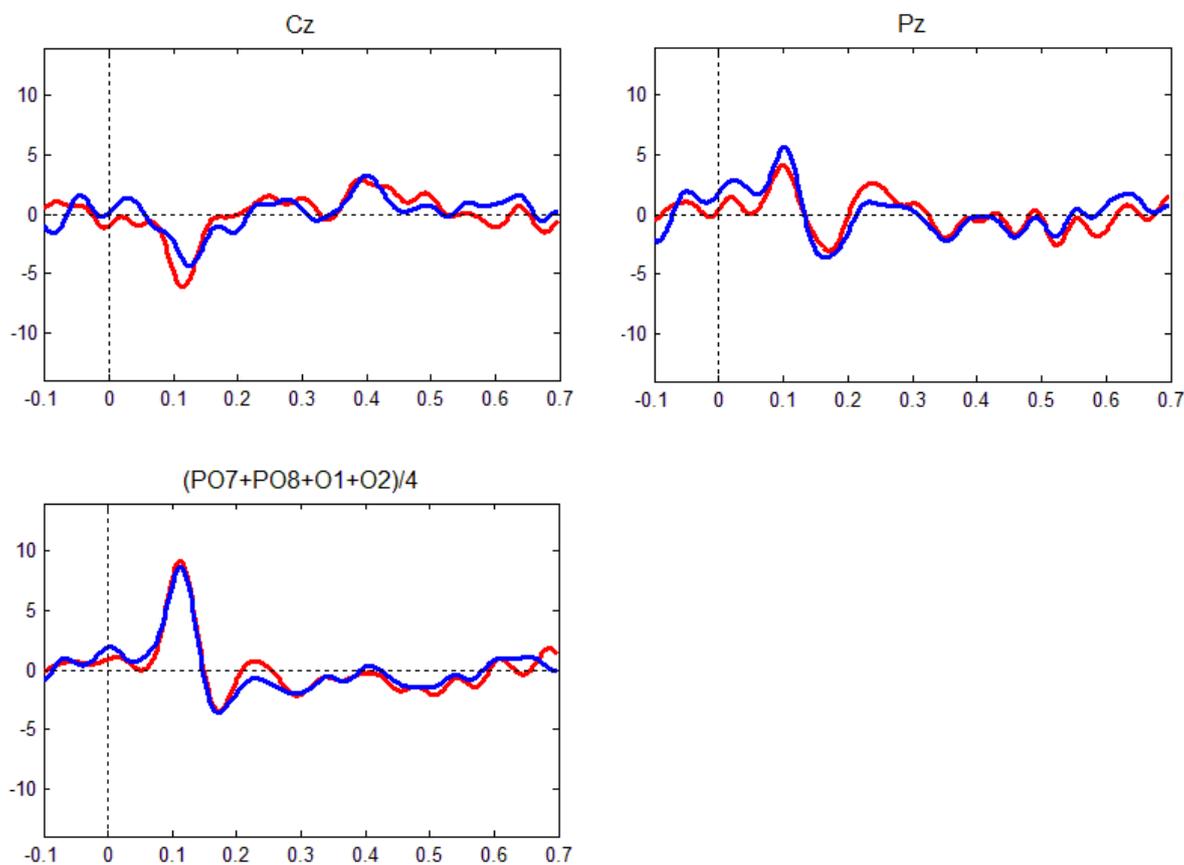


Рис.1. Кривые одного испытуемого для целевых (красный цвет) и нецелевых (синий цвет) стимулов в каналах Cz, Pz и усредненном затылочном канале для режима «Пассивное внимание. Лица». По оси X – время (сек), по оси Y – амплитуда (мкВ).

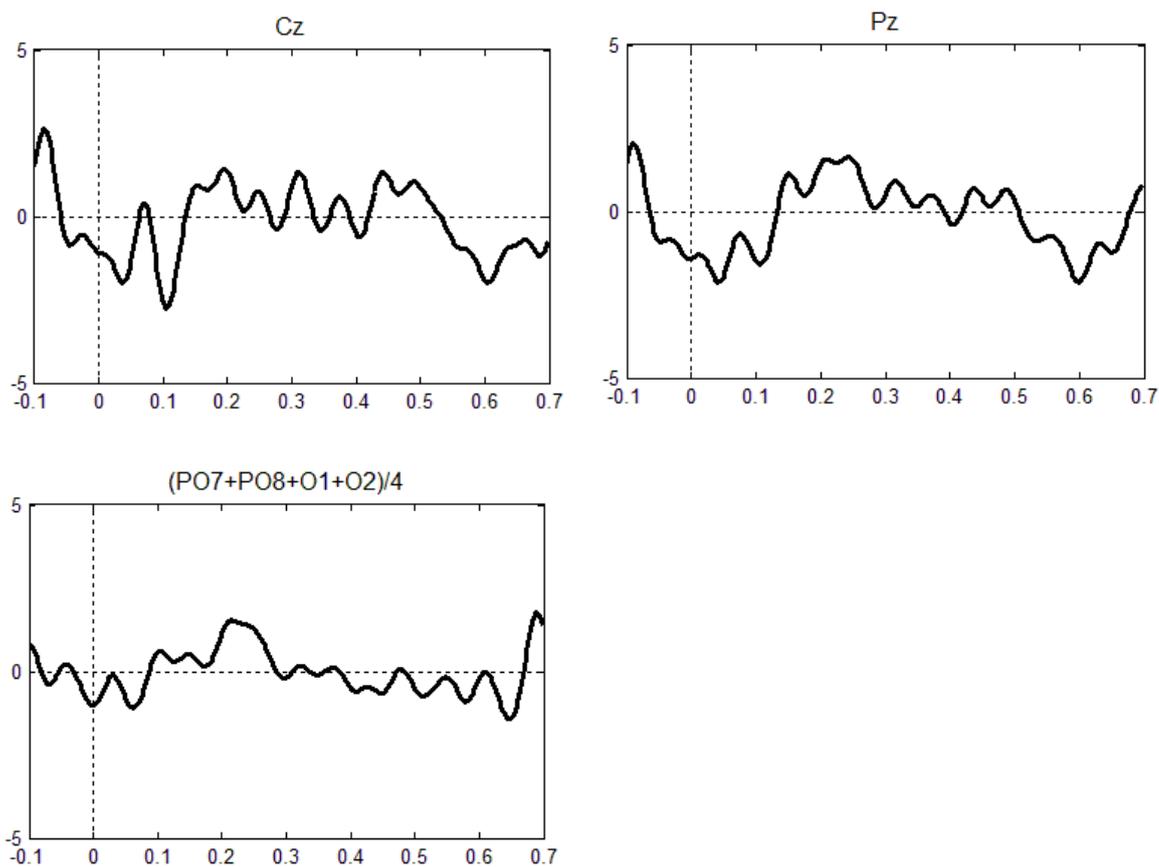


Рис.2 Разностные кривые одного испытуемого в каналах Cz, Pz и усредненном затылочном канале для режима «Пассивное внимание. Лица».

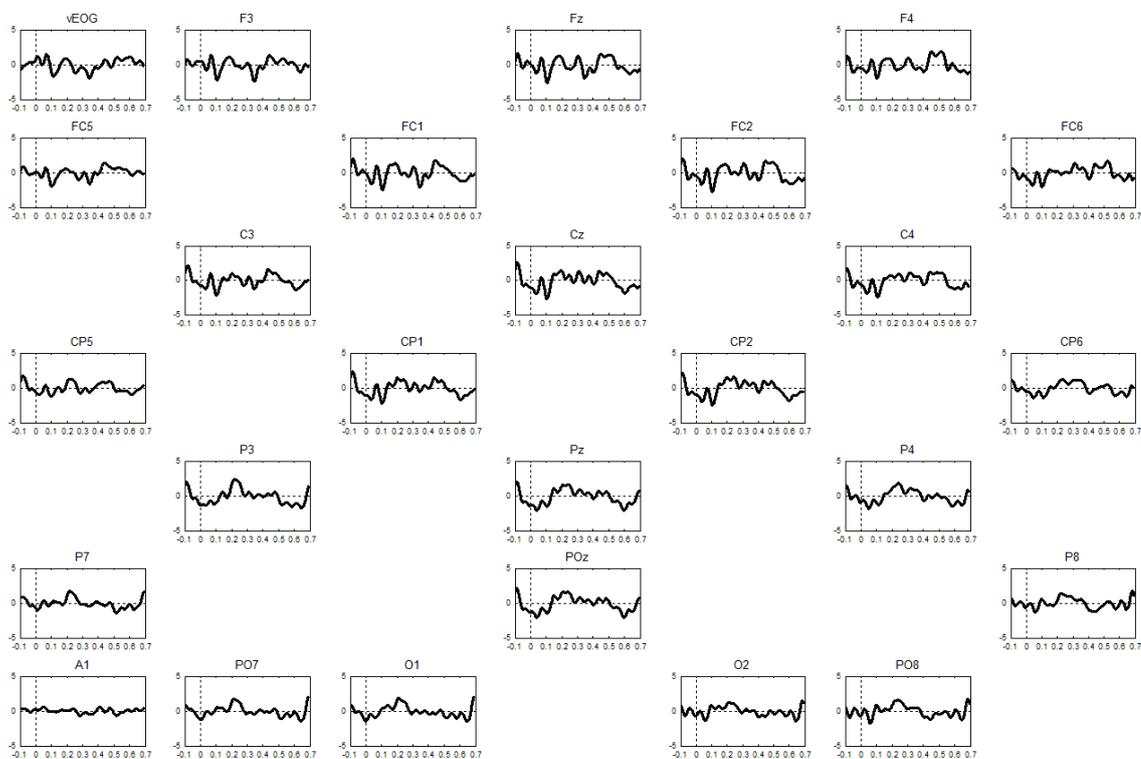


Рис.3. Разностные кривые одного испытуемого в 24 каналах для режима «Пассивное внимание. Лица».

Для режима «Активное внимание к целевому стимулу» были рассчитаны разностные кривые как «кривая для целевых минус кривая для нецелевых», при этом целевыми являлись стимулы, на которые испытуемые активно обращали внимание, нецелевыми – все остальные. По этим кривым были рассчитаны значения амплитуд компонентов. Кроме того, были рассчитаны разностные кривые «эмоциогенные минус нецелевые», где эмоциогенные стимулы – стимулы, прошедшие порог, нецелевые – стимулы, не относящиеся к классу целевых либо эмоциогенных. В этом случае также были посчитаны значения амплитуд компонентов, отражающих обработку эмоциогенных стимулов в условиях активного внимания к целевым. На Рис. 4. представлен пример разностных кривых «целевые минус нецелевые» и «эмоциогенные минус нецелевые». Таким образом, в случае режима «Активное внимание к целевому стимулу» была использована парадигма, напоминающая трехстимульную одбол-парадигму (Katayama and Polich, 1999).

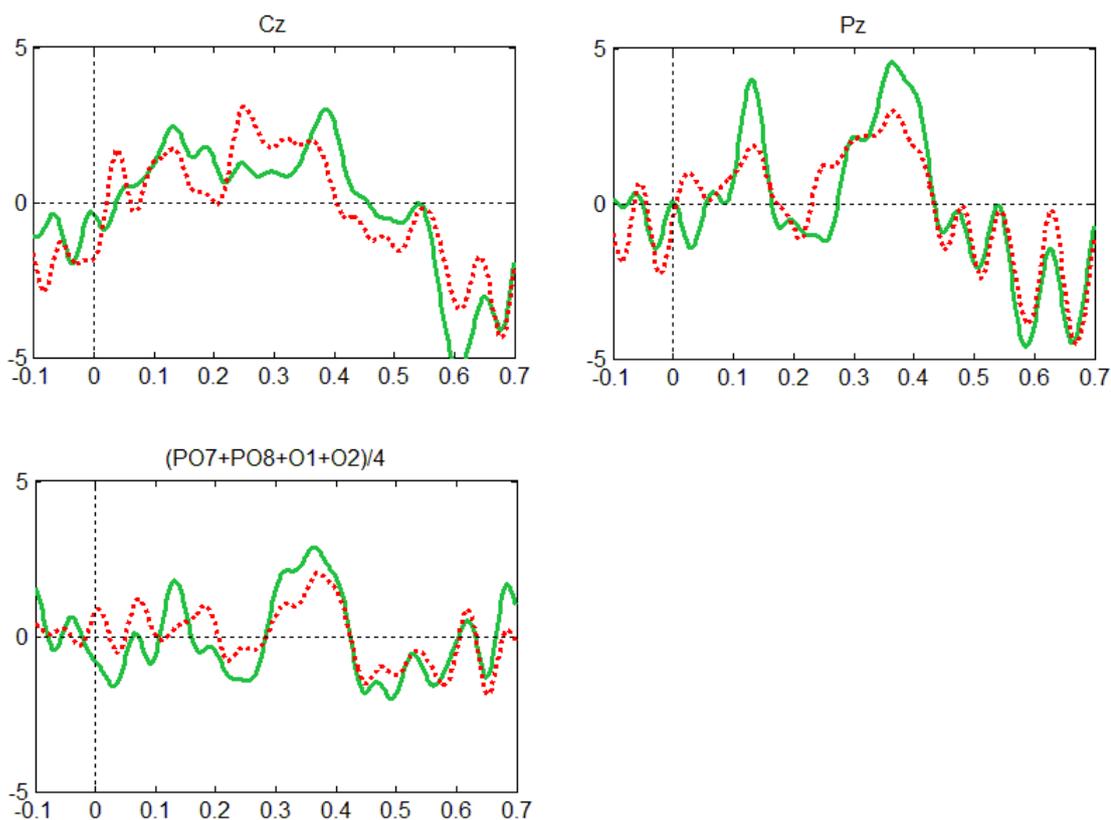


Рис.4. Разностные кривые «целевые минус нецелевые» (зеленый цвет) и «эмоциогенные минус нецелевые» (красный цвет) одного испытуемого в каналах Cz, Pz и усредненном затылочном канале для режима «Активное внимание к целевому стимулу».

3.2. Сравнение потенциалов, вызванных эмоциогенными стимулами, в условиях активного и пассивного внимания

Были проведены сравнения амплитуд компонентов P200, P300, N1, P100, N400 в режиме «Пассивное внимание. Изображения» и для разностных кривых «эмоциогенные минус нецелевые» в режиме «Активное внимание». В этих режимах использовались одни и те же изображения, эмоциогенность которых была один раз оценена испытуемыми. Таким образом, представляется возможным оценить, влияет ли наличие активного внимания (счет целевых стимулов) на обработку эмоциогенных стимулов.

Данные об амплитудах компонентов приведены в Таблицах 1-5.

Был проведен matched T-test, при этом статистически значимых различий выявить не удалось ни для одного из компонентов (Рис.5-9).

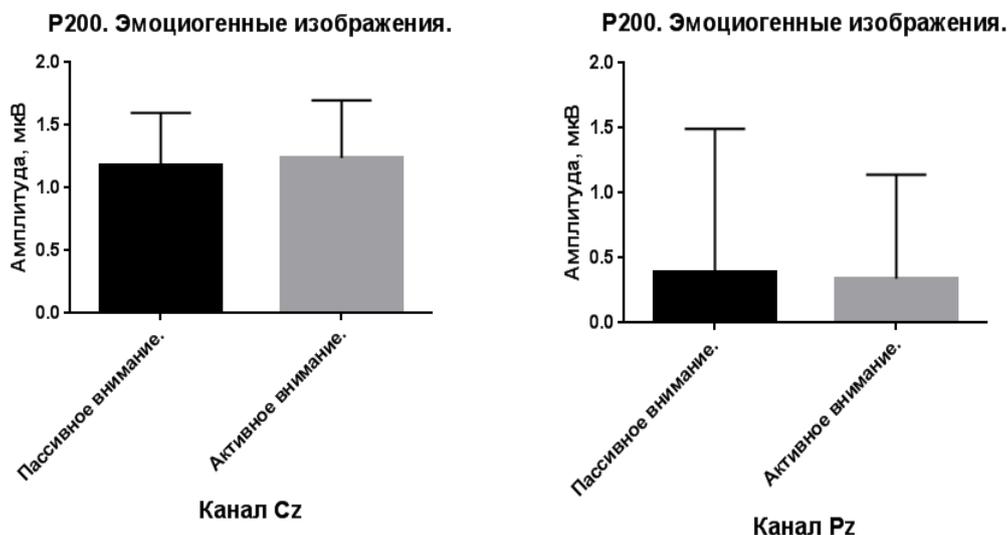


Рис.5. Среднее значение амплитуды компонента P200 для эмоциогенных изображений в режиме с пассивным и активным вниманием в каналах Cz и Pz (показана стандартная ошибка среднего). $P=0.9$ (Cz); $P=0.9$ (Pz)

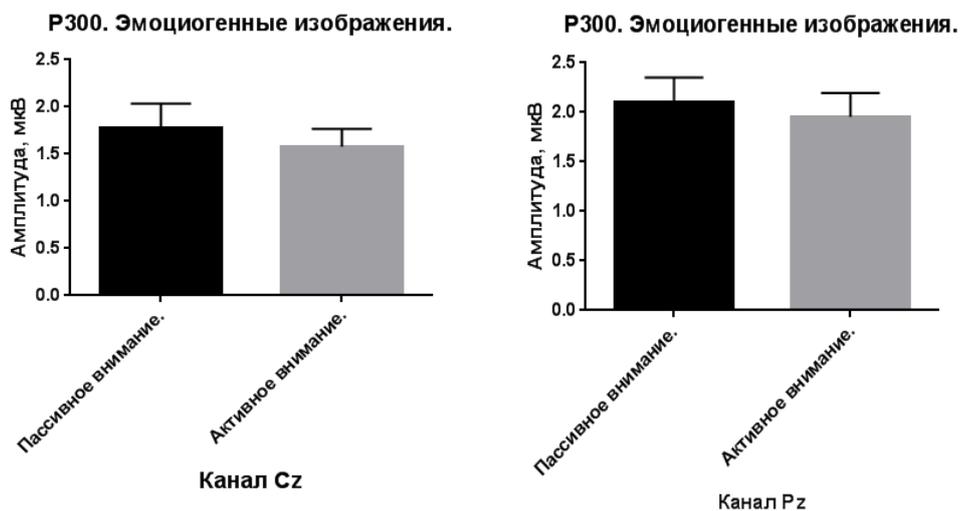


Рис.6. Среднее значение амплитуды компонента P300 для эмоциогенных изображений в режиме с пассивным и активным вниманием в каналах Cz и Pz (показана стандартная ошибка среднего). $P=0.5$ (Cz); $P=0.6$ (Pz)

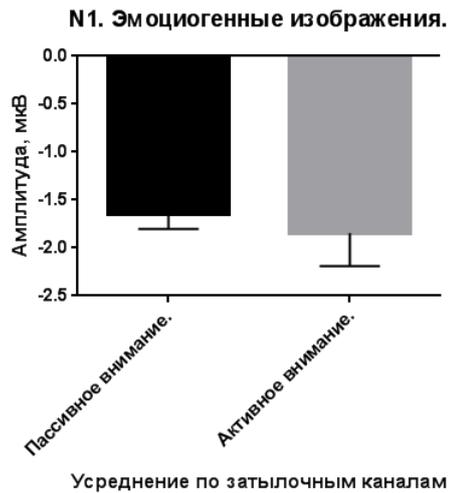


Рис.7. Среднее значение амплитуды компонента N1 для эмоциогенных изображений в режиме с пассивным и активным вниманием в усредненном затылочном канале (показана стандартная ошибка среднего). $P=0.6$

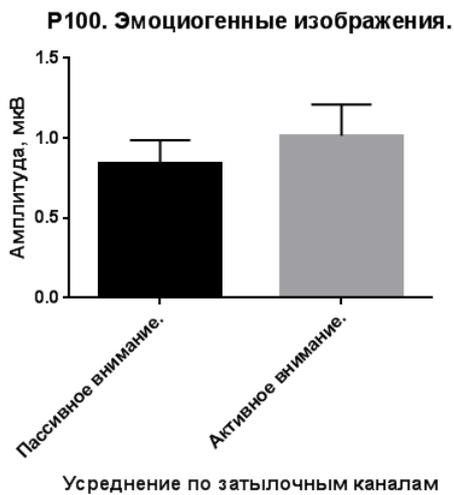


Рис.8. Среднее значение амплитуды компонента P100 для эмоциогенных изображений в режиме с пассивным и активным вниманием в усредненном затылочном канале (показана стандартная ошибка среднего). $P=0.4$

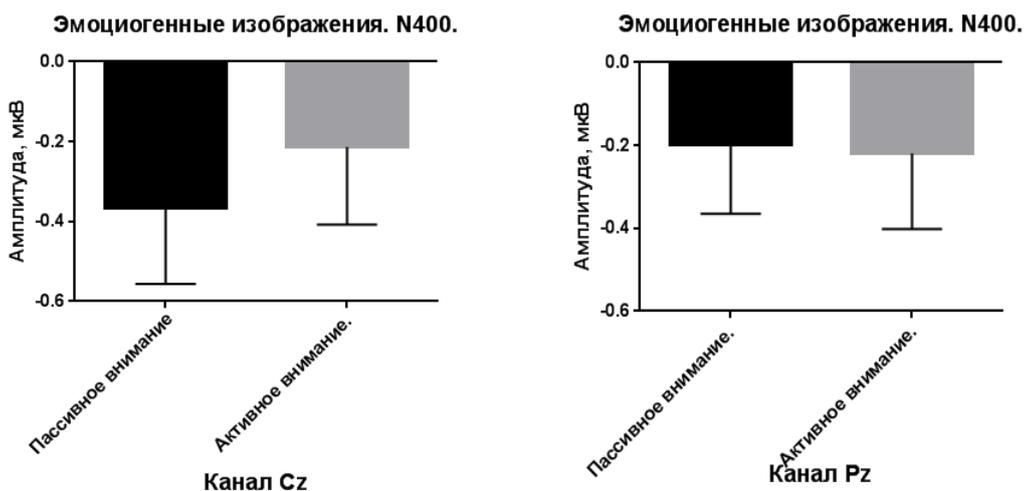


Рис.9. Среднее значение амплитуды компонента N400 для эмоциогенных изображений в режиме с пассивным и активным вниманием в каналах Cz и Pz (показана стандартная ошибка среднего). $P=0.6$ (Cz) ; $P=0.9$ (Pz)

В связи с отсутствием статистически значимых различий между амплитудами компонентов для эмоциогенных стимулов в случае пассивного внимания и активного внимания к целевому стимулу, при дальнейшем анализе компонентов достаточно сравнить амплитуды компонентов для целевых стимулов в трех режимах. При этом в режимах с пассивным вниманием целевыми стимулами являлись эмоциогенные, в режиме с активным вниманием целевые – стимулы, которые испытуемые считали.

3.3. Сравнения компонента P200 в разных режимах

P200 был измерен у 13 испытуемых в канале Cz и у 12 испытуемых в канале Pz. В таблице 1 приведены данные для режимов с пассивным вниманием и для режима с активным вниманием для целевых и эмоциогенных стимулов.

Таблица 1. Амплитуды компонента P200, мкВ.

№ испытуемого	Пассивное внимание. Лица.		Пассивное внимание. Изображения.		Активное внимание. Изображения. Целевой стимул		Активное внимание. Изображения. Эмоциогенный стимул	
	Cz	Pz	Cz	Pz	Cz	Pz	Cz	Pz
1	2.4	1.0	1.1	1.0	2.4	2.0	1.7	2.1
2	3.6	3.3	1.9	2.0	1.4	1.3	1.1	1.9
3	2.6	1.5	4.3	3.0	2.1	1.0	2.8	2.4
4	1.3	1.2	0.8	1.1	3.1	2.3	0.7	0.6
5	2.1	1.7	3.1	2.0	1.2	1.4	0.8	1.1
6	2.1	3.6	2.4	2.5	-0.1	0.4	4.8	3.1
7	2.0	1.7	1.8	1.7	0.4	0.6	3.1	1.8
8	2.0	2.0	2.0	0.9	2.0	1.1	2.3	1.3
9	0.6	1.5	0.4	-0.2	2.4	1.0	1.9	2.1
10	0.9	0.7	0.2	0.1	3.1	1.7	1.7	1.7
11	1.4	-----	1.4	-----	2.8	-----	3.1	-----
12	0.4	0.7	2.6	0.9	1.9	1.7	0.9	3.0
13	2.0	1.5	0.2	0.3	4.0	2.1	4.0	2.8
Медиана	2.0	1.5	1.8	1.1	2.1	1.3	1.2	0.4
Среднее значение	1.8	1.7	1.7	1.3	2.1	1.4	1.2	0.3
Стандартное отклонение	0.9	0.9	1.2	1.0	1.1	0.6	1.4	0.8
Стандартная ошибка среднего	0.2	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.5	0.3

Был проведен тест matched ANOVA для каналов Cz и Pz (Cz: $F_{1.482, 17.78} = 0.295$ ($P = 0.7$); Pz: $F_{1.648, 18.13} = 0.791$ ($P = 0.4$)) и попарные сравнения между режимами (Tukey's multiple comparison test). Статистически значимых различий обнаружено не было (Рис.10).

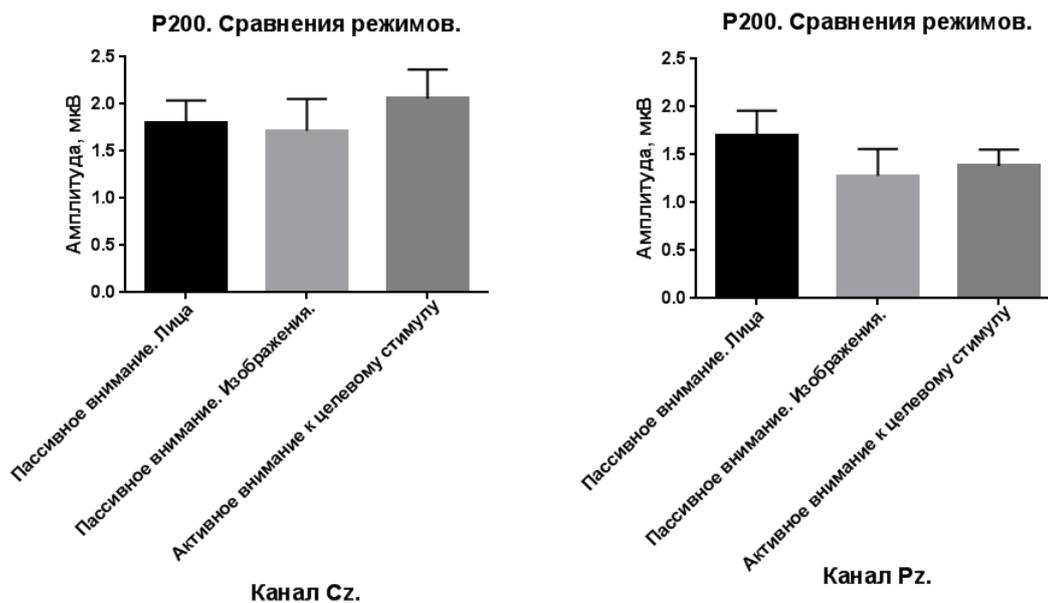


Рис.10. Среднее значение амплитуды компонента P200 для трех режимов в каналах Cz и Pz (показана стандартная ошибка среднего). $P=0.7$ (Cz); $P=0.4$ (Pz)

3.4. Сравнения компонента P300 в разных режимах

P300 был измерен у всех 14 испытуемых в каналах Cz и Pz. В таблице 2 приведены данные для режимов с пассивным вниманием и для режима с активным вниманием для целевых и эмоциогенных стимулов.

Таблица 2. Амплитуды компонента P300, мкВ.

№ Испытуемого	Пассивное внимание. Лица.		Пассивное внимание. Изображения.		Активное внимание. Изображения. Целевой стимул		Активное внимание. Изображения. Эмоциогенный стимул	
	Cz	Pz	Cz	Pz	Cz	Pz	Cz	Pz
1	1.0	1.2	1.8	1.0	4.4	2.7	2.0	1.9
2	1.8	1.9	2.8	3.9	7.2	7.3	2.8	3.7
3	1.6	1.3	1.7	2.1	1.3	3.0	0.8	1.0
4	0.3	0.6	2.1	2.1	5.8	5.2	1.7	1.8
5	0.3	0.9	1.2	1.7	3.6	4.7	1.3	2.2
6	1.0	0.8	1.2	1.2	6.1	5.6	0.3	1.2
7	1.2	1.1	0.6	2.3	3.6	3.0	1.9	2.2
8	0.5	0.7	0.2	0.7	3.4	3.3	0.9	1.3
9	1.6	1.1	2.6	2.6	3.5	5.4	0.8	1.1
10	1.9	1.7	3.9	2.4	6.6	5.5	1.3	0.7
11	1.3	0.7	1.8	2.0	2.6	4.1	2.0	3.0
12	0.9	0.7	1.0	2.3	4.5	4.6	2.3	1.4
13	1.3	1.4	2.3	1.3	3.1	4.2	2.5	3.4
14	1.2	1.7	1.7	3.7	3.5	5.6	1.5	2.5
Медиана	1.2	1.1	1.7	2.1	3.6	4.6	1.6	1.8
Среднее значение	1.1	1.1	1.8	2.1	4.2	4.6	1.6	2.0
Стандартное отклонение	0.5	0.4	0.9	0.9	1.7	1.3	0.7	0.9
Стандартная ошибка среднего	0.1	0.1	0.3	0.2	0.4	0.3	0.2	0.2

В ходе проведения в каналах Cz и Pz теста matched ANOVA (Cz: $F_{1.284, 16.70} = 39.16$ ($P < 0.0001$); Pz: $F_{1.587, 20.64} = 88.1$ ($P < 0.0001$)) и попарных сравнений между режимами (Tukey's multiple comparison test) были выявлены значимые различия между режимами, при этом различия имелись между каждой парой режимов (Рис.11). Наибольшие амплитуды P300 были характерны для режима «Активное внимание к целевому стимулу», наименьшие – для режима «Пассивное внимание. Лица».

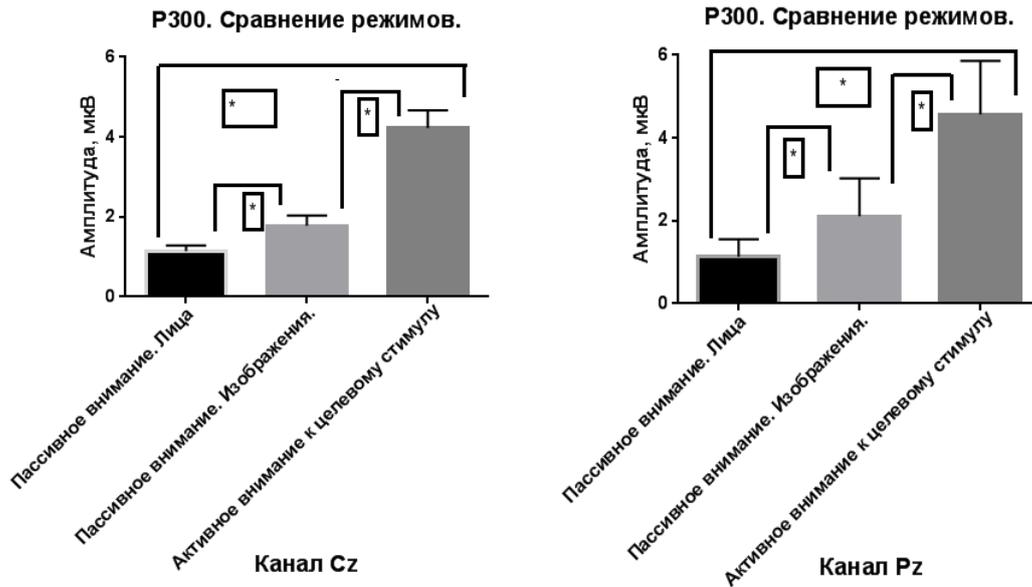


Рис.11. Среднее значение амплитуды компонента Р300 для трех режимов в каналах Cz и Pz (показана стандартная ошибка среднего). $P < 0.0001$ (Cz) ; $P < 0.0001$ (Pz)

3.5. Сравнение амплитуд компонентов Р200 и Р300

В ходе проведения t-тестов для каждого режима были выявлены значимые различия между амплитудами этих компонентов. При этом для режима «Пассивное внимание. Лица» для каналов Cz и Pz амплитуда Р200 значимо превышала амплитуду Р300 (Cz: $P = 0.024$; Pz: $P = 0.042$) (Рис.12). Для режима «Пассивное внимание. Изображения» амплитуда Р300 значимо превышала амплитуду Р200 в канале Pz ($P = 0.0362$), в канале Cz ($P = 0.9$) значимых различий между амплитудами компонентов не обнаружено (Рис.13). В случае активного внимания к целевому стимулу амплитуда Р300 значимо превышала амплитуду Р200, при этом различия очень велики (Cz: $P = 0.0006$; Pz: $P < 0.0001$) (Рис.14).

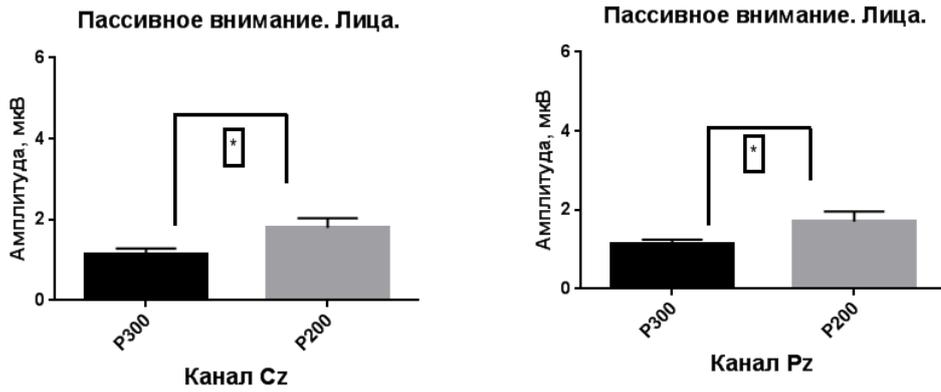


Рис.12. Значения амплитуд компонентов Р300 и Р200 в каналах Cz и Pz для режима «Пассивное внимание. Лица». $P = 0.024$ (Cz) ; $P = 0.042$ (Pz)

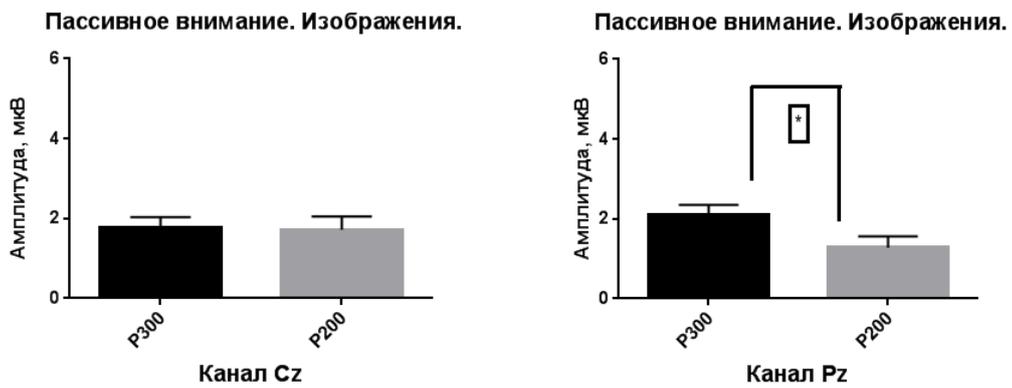


Рис.13. Значения амплитуд компонентов Р300 и Р200 в каналах Cz и Pz для режима «Пассивное внимание. Изображения». $P=0.9$ (Cz); $P = 0.0362$ (Pz)

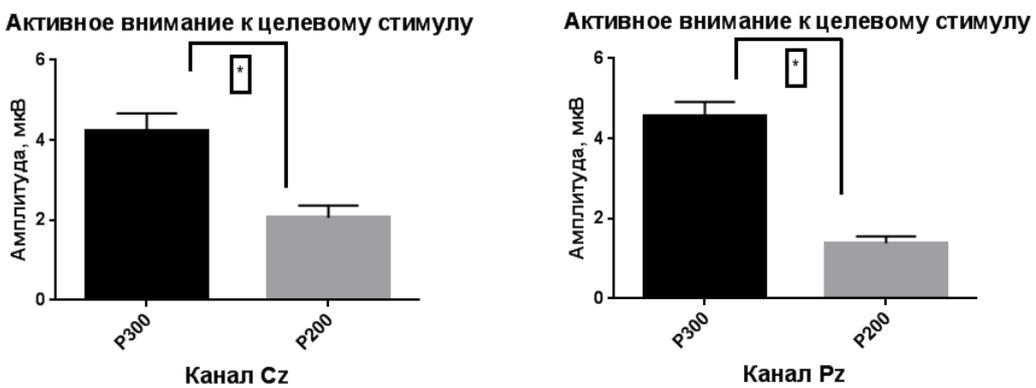


Рис.14. Значения амплитуд компонентов Р300 и Р200 в каналах Cz и Pz для режима «Активное внимание к целевому стимулу». $P = 0.0006$ (Cz); $P < 0,0001$ (Pz)

3.6. Сравнение компонента N1 в разных режимах

N1 был измерен у 13 испытуемых в усредненном затылочном канале. В таблице 3 приведены данные для режимов с пассивным вниманием и для режима с активным вниманием для целевых и эмоциогенных стимулов.

Таблица 3. Амплитуды компонента N1, мкВ.

<i>№ испытуемого</i>	<i>Пассивное внимание. Лица.</i>	<i>Пассивное внимание. Изображения.</i>	<i>Активное внимание. Изображения. Целевой стимул</i>	<i>Активное внимание. Изображения. Эмоциогенный стимул</i>
Усреднение по каналам PO7, PO8, O1, O2				
1	-0.8	-1.7	-3.0	-1.2
2	-1.0	-2.2	-2.7	-3.8
3	-1.2	-2.6	-3.3	-3.3
4	-1.1	-1.3	-1.8	-0.4
5	-0.4	-0.9	-0.8	-0.6
6	-0.5	-1.8	-1.3	-2.6
7	-0.1	-1.8	-1.8	-1.0
8	0.8	-1.5	-2.1	-1.3
9	-0.9	-1.5	-2.2	-1.7
11	0.2	-2.2	-1.3	-0.8
12	-1.6	-0.9	-2.2	-1.4
13	-0.9	-1.1	-1.3	-4.2
14	-1.6	-2.0	-1.5	-1.7
<i>Медиана</i>	-0.9	-1.7	-1.8	-1.4
<i>Среднее значение</i>	-0.7	-1.7	-2.0	-1.8
<i>Стандартное отклонение</i>	0.7	0.5	0.7	1.2
<i>Стандартная ошибка среднего</i>	0.2	0.1	0.2	0.3

При проведении статистического анализа matched ANOVA ($F_{1.823, 21.87}=17.71$; $P = 0.029$) и Tukey's multiple comparison test) были обнаружены значимые различия между режимами, и амплитуда N1 (N170) в режиме «Пассивное внимание. Лица» была значимо меньше, чем в двух других режимах, где стимулами являлись изображения, при этом между этими режимами различий обнаружено не было (Рис.15).

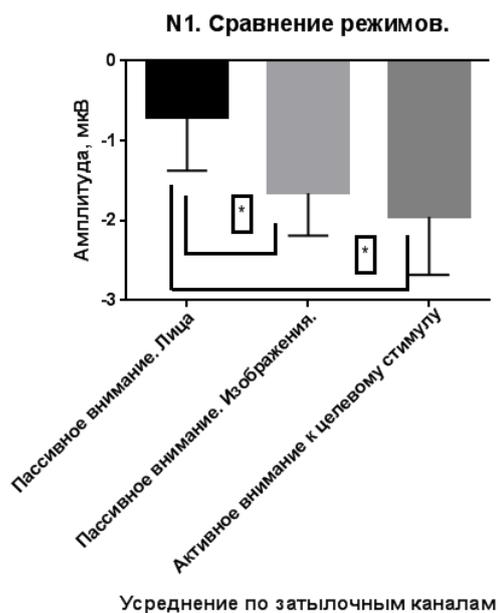


Рис.15. Среднее значение амплитуды компонента N1 для трех режимов в усредненном затылочном канале (показана стандартная ошибка среднего). $P = 0.029$

3.7. Сравнение компонента P100 в разных режимах

P100 был измерен у всех 14 испытуемых в усредненном затылочном канале. В таблице 4 приведены данные для режимов с пассивным вниманием и для режима с активным вниманием для целевых и эмоциогенных стимулов.

Таблица 4. Амплитуды компонента P100, мкВ.

<i>№ испытуемого</i>	<i>Пассивное внимание. Лица.</i>	<i>Пассивное внимание. Изображения.</i>	<i>Активное внимание. Изображения. Целевой стимул</i>	<i>Активное внимание. Изображения. Эмоциогенный стимул</i>
Усреднение по каналам PO7, PO8, O1, O2				
1	0.5	0.8	1.8	0.6
2	1.1	1.4	1.7	1.7
3	1.5	0.5	1.1	1.8
4	0.7	0.6	2.0	0.6
5	0.4	1.4	0.3	0.6
6	1.3	1.4	1.1	0.9
7	0.5	0.4	0.3	0.4
8	1.4	0.4	2.5	1.0
9	1.3	0.4	1.6	1.7
10	1.1	1.2	2.1	1.4
11	0.6	-0.1	2.7	1.1
12	0.6	1.6	1.7	1.5
13	1.0	1.5	4.5	2.5
14	1.3	1.0	2.2	-0.2
<i>Медиана</i>	1.0	0.9	1.8	1.0
<i>Среднее значение</i>	1.0	0.9	1.8	1.0
<i>Стандартное отклонение</i>	0.4	0.5	1.0	0.8
<i>Стандартная ошибка среднего</i>	0.1	0.1	0.3	0.2

В ходе проведения статистического анализа (matched ANOVA ($F_{1,538,20.00} = 8.22$; $P = 0.044$) и Tukey's multiple comparison test) были выявлены значимые различия между режимами, и амплитуда P100 значимо меньше для режимов с пассивным вниманием по сравнению с режимом с активным вниманием к целевому стимулу (Рис.16).

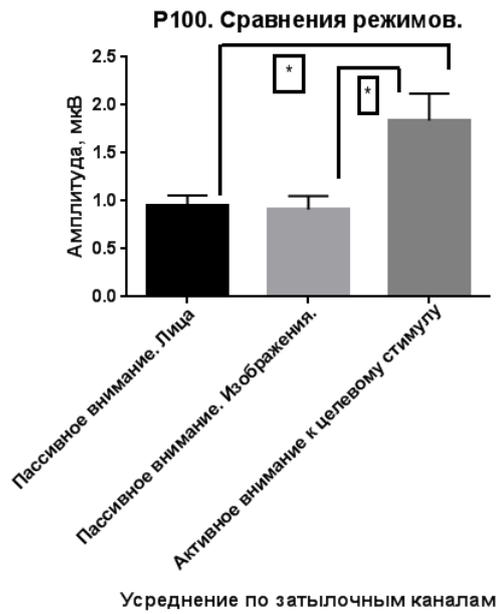


Рис.16. Среднее значение амплитуды компонента P100 для трех режимов в усредненном затылочном канале (показана стандартная ошибка среднего). $P = 0.044$

3.8. Сравнение компонента N400 в разных режимах

N400 был измерен у 12 испытуемых в каналах Cz и Pz. В Таблице 5 приведены данные для режимов с пассивным вниманием и для режима с активным вниманием для целевых и эмоциогенных стимулов.

Таблица 5. Амплитуды компонента N400, мкВ.

№ испытуемого	Пассивное внимание. Лица.		Пассивное внимание. Изображения.		Активное внимание. Изображения. Целевой стимул		Активное внимание. Изображения. Эмоциогенный стимул	
	Cz	Pz	Cz	Pz	Cz	Pz	Cz	Pz
1	-0.1	0.1	-1.6	0.4	-1.9	-0.5	-1.2	-0.4
3	-0.6	-0.6	-0.4	0.0	-0.7	-0.6	0.6	0.7
4	-0.3	-0.5	0.1	-0.1	-1.1	-2.1	0.2	-0.4
5	0.0	-0.2	-0.9	-1.5	-1.8	-2.2	-0.8	-1.1
6	-0.3	-0.1	-1.4	-0.6	-2.2	-2.3	0.0	0.5
7	0.1	0.1	0.0	-0.4	-0.1	-0.7	0.0	0.1
8	-0.4	0.0	-0.4	0.0	-1.1	-0.4	-0.6	-0.5
9	0.3	0.2	0.1	-0.1	-1.4	-1.9	-0.5	-0.7
10	-0.2	-0.2	0.0	-0.2	-2.5	-1.5	0.0	0.0
11	0.4	0.6	0.7	0.9	-1.6	-1.5	-1.3	-1.3
12	0.2	0.4	-0.2	-0.1	-1.5	-1.5	0.1	0.1
14	0.3	0.3	-0.3	-0.7	-1.1	-1.1	0.9	0.3
Медиана	0.0	0.0	-0.2	-0.1	-1.5	-1.5	-0.2	-0.1
Среднее значение	0.0	0.0	-0.4	-0.2	-1.4	-1.4	-0.4	-0.2
Стандартное отклонение	0.3	0.4	0.7	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6
Стандартная ошибка среднего	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Был проведен тест mathed ANOVA (Cz: $F_{1.883, 20.72} = 24.48$ ($P < 0,0001$)) ; Pz: $F_{1.830, 20.13} = 29.44$ ($P < 0,0001$)) и Tukey's multiple comparison test. Были обнаружены значимые различия между режимами для обоих каналов, при этом режим «Активное внимание к целевому стимулу» значимо отличается от режимов с пассивным вниманием (Рис.17). Амплитуда N400 для режимов с пассивным вниманием крайне мала по модулю, при этом в канале Pz для режима «Пассивное внимание. Лица» среднее значение стремится к 0.

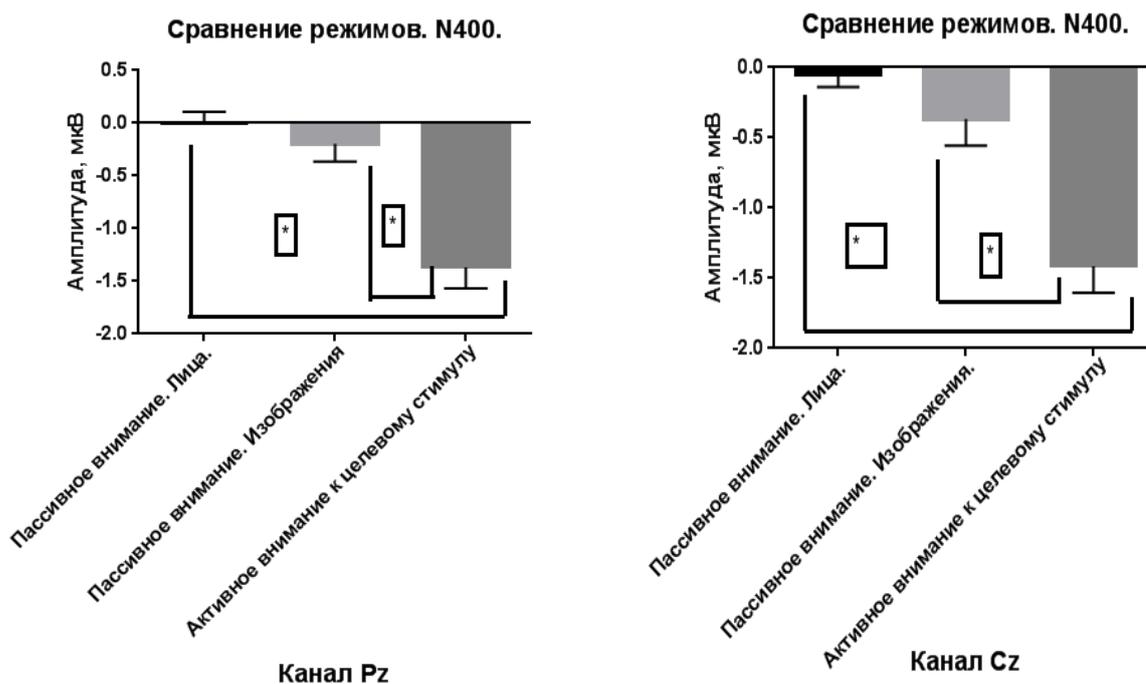


Рис.17. Среднее значение амплитуды компонента N400 для трех режимов в каналах Cz и Pz (показана стандартная ошибка среднего). $P < 0,0001(Cz)$; $P < 0,0001(Pz)$

3.9. Компоненты ПСС в системах ИМК для распознавания команд пользователя и эмоционального фокуса

Классический интерфейс Мозг-Компьютер для распознавания команд пользователя основан на компоненте P300, что отражено в названии ИМК-Р300. Действительно, в режиме с привлечением активного внимания амплитуда P300 на кривых разностных потенциалов достигает больших значений (средняя амплитуда P300 в канале Cz = 4.2 мкВ, в канале Pz = 4.6 мкВ). Однако при использовании разных типов стимулов могут быть выражены и другие компоненты, включая P100, P200 и N1, что позволяет повысить точность классификации для классического ИМК. В случае ИМК для распознавания эмоционального фокуса роль компонента P300 не столь значительна и сравнима с вкладом других компонентов, особенно N1 и P200. В целом, выраженность тех или иных компонентов при применении ИМК для распознавания эмоционального фокуса сильно зависит от типа

стимульного материала. Средние значения компонентов приведены в сравнительной таблице (Таблица 6).

Таблица 6. Средние значения амплитуд компонентов для трех режимов, мкВ

<i>Компонент / Режим</i>	<i>Пассивное внимание. Лица</i>	<i>Пассивное внимание. Изображения.</i>	<i>Активное внимание к целевому стимулу</i>
P200			
Cz	1.8	1.7	2.1
Pz	1.7	1.3	1.4
P300			
Cz	1.1	1.8	4.2
Pz	1.1	2.1	4.6
N1			
(PO7+PO8+O1+O2)/4	-0.7	-1.7	-2.0
P100			
(PO7+PO8+O1+O2)/4	1.0	0.9	1.8
N400			
Cz	0.0	-0.4	-1,4
Pz	0.0	-0.2	-1,4

3.10. Точность классификации

В результате работы для всех 14 испытуемых была посчитана точность классификации для трех режимов – вероятность того, что целевой стимул будет отнесен классификатором к классу целевых. Данные для точности классификации представлены в Таблице 7.

Таблица 7. Точность классификации, %.

<i>№ испытуемого</i>	<i>Пассивное внимание. Лица.</i>	<i>Пассивное внимание. Изображения.</i>	<i>Активное внимание к целевому стимулу</i>
1	20	80	50
2	80	20	90
3	20	50	40
4	60	60	80
5	60	70	90
6	0	80	100
7	0	30	40
8	10	60	80
9	30	20	70
10	0	10	70
11	10	40	100
12	80	10	70
13	40	50	60
14	60	20	70
<i>Минимальное значение</i>	0.0	10.0	40.0
<i>Медиана</i>	25.0	45.0	70.0
<i>Максимальное значение</i>	80.0	80.0	100.0
<i>Среднее значение</i>	33.6	42.9	72.1
<i>Стандартное отклонение</i>	29.5	24.9	19.7
<i>Стандартная ошибка среднего</i>	7.9	6.7	5.3

В режиме «Активное внимание к целевому стимулу» точность классификации наиболее высока и составляла 72,14%. Этот режим соответствует классическому интерфейсу Мозг-Компьютер для детекции команд пользователя, когда испытуемый активно обращает внимание на целевой стимул, и система в результате анализа ПСС может отнести этот стимул к классу целевых, то есть детектировать команду пользователя. Был проведен анализ *matched ANOVA* ($F_{1,612, 21.00} = 8.93$; $P = 0.0026$) и *Tukey's multiple comparison test*). Между режимами имеются значимые различия, при этом в режимах с пассивным вниманием точность классификации значимо ниже, при этом режимы «Пассивное внимание.

Лица» и «Пассивное внимание. Изображения» не имеют значимых различий (Рис.18). Эти режимы соответствуют ИМК для детекции эмоционального фокуса, когда система в результате анализа ПСС распознает, какие стимулы привлекли автоматическое внимание пользователя. В данном случае точность классификации низка (33,57% для лиц и 42,86% для изображений), однако значимо превышает случайный уровень классификации (в тесте со случайным перемешиванием целевых и нецелевых эпох на этапе обучения классификатора с числом повторов циклов перемешивания 100 раз среднее значение точности составило 16,9%) (Рис.19). Проведен тест ANOVA и Tukey's multiple comparison test ($F_{2, 67}=14.03$; $P < 0,0001$).

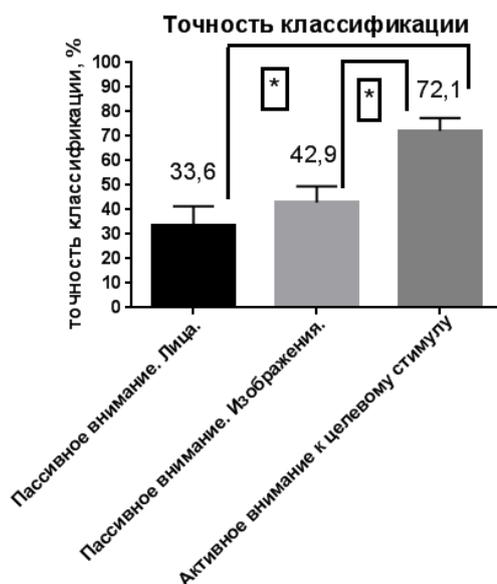


Рис.18. Точность классификации (%) для трех режимов. $P = 0.0026$

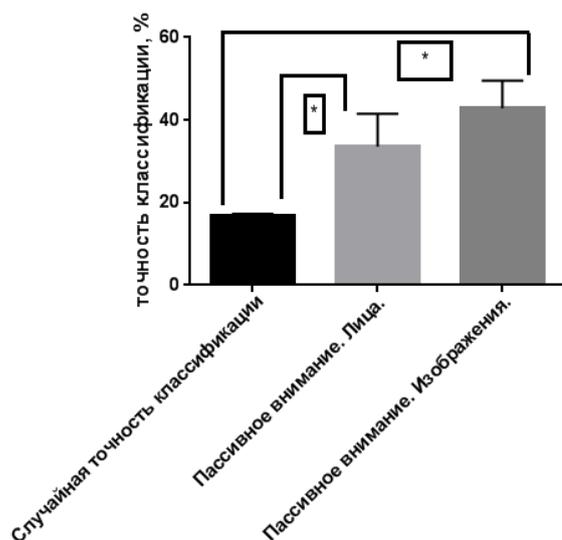


Рис.19. Точность классификации для режимов с пассивным вниманием в сравнении со случайным уровнем классификации. $P < 0,0001$

3.11. Корреляция точности классификации с амплитудами компонентов

Был проведен корреляционный анализ Спирмена для выявления корреляций амплитуд определенных компонентов с точностью классификации в трех режимах. В режиме «Активное внимание к целевому стимулу» точность классификации коррелировала с амплитудой P300 в канале Pz ($r = 0.608$; $P = 0.021$) (Рис.20).

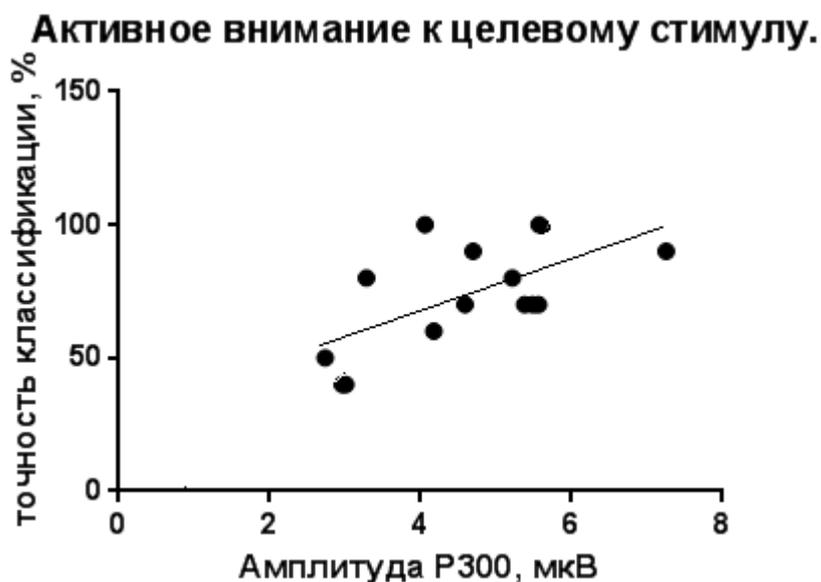


Рис.20. Зависимость точности классификации (%) от амплитуды P300 в канале Pz для режима «Активное внимание к целевому стимулу». $r = 0.608$; $P = 0.021$

В режиме «Пассивное внимание. Изображения» точность классификации также коррелировала с амплитудой P300 в канале Pz, однако в данном случае получена обратная зависимость ($r = - 0.746$; $P = 0.022$) (Рис.21).

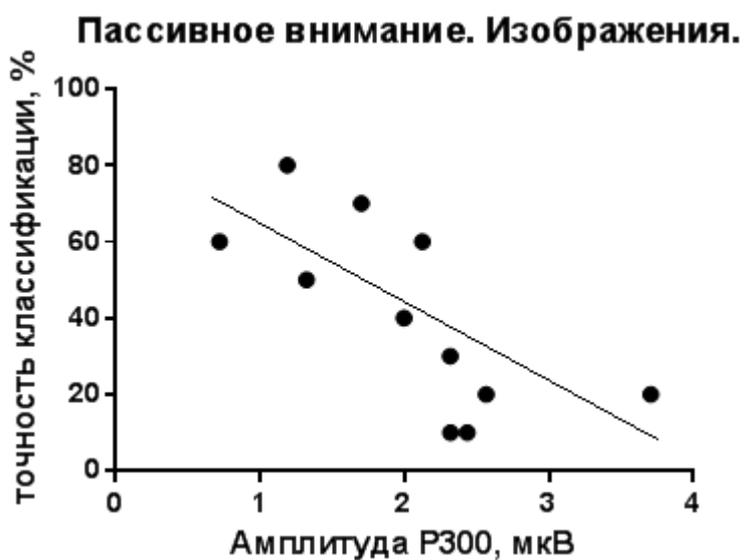


Рис.21. Зависимость точности классификации (%) от амплитуды P300 в канале Pz для режима «Пассивное внимание. Изображения». $r = - 0.746$; $P = 0.022$

В режиме «Пассивное внимание. Лица» точность классификации коррелировала с амплитудой N1 (N170), при этом точность классификации больше при более негативных значениях N170 ($r = - 0.6532$; $P = 0.016$) (Рис.22).

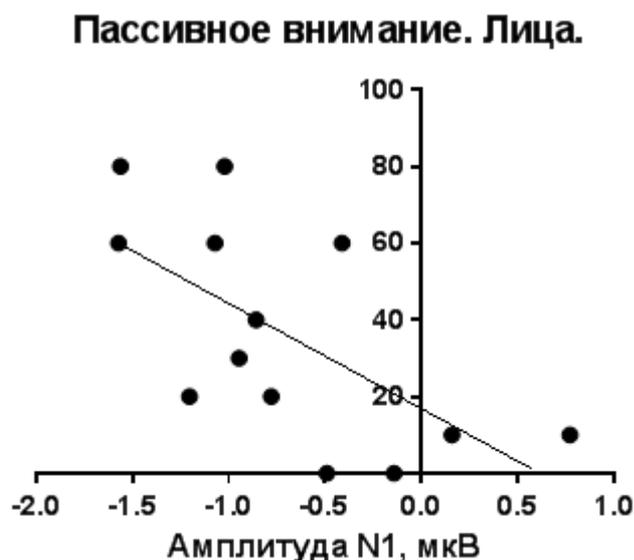


Рис.22. Зависимость точности классификации (%) от амплитуды N170 в усредненном затылочном канале для режима «Пассивное внимание. Лица». $r = - 0.6532$; $P = 0.016$

3.12. Результаты психометрических тестов «Самочувствие, активность, настроение» и «Шкала дифференциальных эмоций»

Известно, что самочувствие и настроение испытуемого, а также характер испытываемых им в текущий момент эмоций, могут существенно повлиять на результаты исследования. Поэтому перед исследованием мы предлагали испытуемым пройти два теста: «Самочувствие, активность, настроение» (САН) и «Шкала дифференциальных эмоций», с целью выявить их психологическое состояние. Результаты тестов представлены в таблицах 8 и 9.

Таблица 8. Результаты психометрического теста «Самочувствие, активность, настроение» (в баллах и уровнях)

№ испытуемого	Самочувствие	Активность	Настроение
1	46 (высокий)	42 (средний)	46 (средний)
2	22 (низкий)	26 (низкий)	34 (средний)
3	33 (средний)	23 (низкий)	58 (высокий)
4	32 (средний)	40 (средний)	51 (высокий)
5	51 (высокий)	57 (высокий)	62 (высокий)
6	57 (высокий)	55 (высокий)	59 (высокий)
7	54 (высокий)	49 (средний)	56 (высокий)
8	56 (высокий)	47 (средний)	59 (высокий)
9	35 (средний)	45 (средний)	29 (низкий)
10	62 (высокий)	62 (высокий)	64 (высокий)
11	59 (высокий)	50 (средний)	65 (высокий)
12	56 (высокий)	56 (высокий)	53 (высокий)
13	48 (средний)	53 (высокий)	50 (средний)
14	46 (средний)	42 (средний)	67 (высокий)
Среднее значение	46.9 (средний)	46.2 (средний)	53.8 (высокий)

Тест САН позволяет оценить самочувствие, активность и настроение человека в данный момент. Если набранный балл меньше 30, уровень параметра низкий, интервалу 30-50 соответствует средний уровень параметра, если балл больше 50, уровень параметра высокий. Результат теста показал, что только один испытуемый имел низкий уровень самочувствия, двое – низкий уровень активности, и один – низкий уровень настроения. Большинство же испытуемых имели высокий уровень настроения и средний уровень самочувствия и активности, т.е. большинство испытуемых чувствовали себя хорошо и проходили исследование в хорошем настроении.

Таблица 9. Результаты теста «Шкала дифференциальных эмоций» (степень выраженности эмоций разных классов)

<i>№ испытуемого</i>	<i>Выраженность позитивных эмоций</i>	<i>Выраженность острых негативных эмоций</i>	<i>Выраженность тревожно-депрессивных эмоций</i>
1	Слабая	Умеренная	Слабая
2	Слабая	Умеренная	Умеренная
3	Слабая	Слабая	Выраженная
4	Умеренная	Слабая	Слабая
5	Умеренная	Слабая	Слабая
6	Выраженная	Слабая	Умеренная
7	Умеренная	Слабая	Слабая
8	Умеренная	Слабая	Слабая
9	Умеренная	Умеренная	Умеренная
10	Умеренная	Слабая	Слабая
11	Умеренная	Слабая	Умеренная
12	Умеренная	Слабая	Умеренная
13	Слабая	Слабая	Слабая
14	Выраженная	Умеренная	Слабая

В тесте «Шкала дифференциальных эмоций» выраженность трех различных классов эмоций имеет четыре уровня: слабая, умеренная, выраженная и сильная. Результаты данного теста представлены в таблице 9. Нужно отметить, что ни один из испытуемых не испытывал перед проведением исследования сильных эмоций, и только один испытуемый имел выраженную степень тревожно-депрессивных эмоций.

Результаты теста показали, что эмоциональное состояние испытуемых во время исследования было стабильным и не должно было оказать влияние на результаты исследования.

3.13. Результаты теста Люсина. Зависимость точности классификации от уровня эмоционального интеллекта

Тест эмоционального интеллекта Люсина направлен на выявление способности испытуемых устанавливать факт наличия своей либо чужой эмоции, идентифицировать свои и чужие эмоции, а также понимать

причины возникновения эмоций. Кроме того, эмоциональный интеллект включает способность контролировать эмоции, а также их выражение. В нашем исследовании испытуемые должны были оценить степень эмоционального переживания, вызываемого теми или иными стимулами, и на основе этой оценки мы относили определенные стимулы к классу целевых при анализе ПСС в режимах с пассивным вниманием. Таким образом, для нас важен уровень общего эмоционального интеллекта испытуемых. Данные представлены в таблице 10. Корреляционный анализ Спирмена, однако, не выявил наличия корреляции между уровнем эмоционального интеллекта и точностью классификации в режимах с пассивным вниманием. Средний эмоциональный интеллект испытуемых составил 60,21%, при этом в выборке отсутствовали испытуемые с очень низким и очень высоким уровнем эмоционального интеллекта.

Таблица 10. Результаты теста эмоционального интеллекта Люсина, %

<i>№ испытуемого</i>	<i>Общий эмоциональный интеллект, %</i>
1	52
2	49
3	59
4	64
5	74
6	48
7	53
8	61
9	55
10	67
11	72
12	65
13	62
14	62
<i>Минимальное значение</i>	48.0
<i>Медиана</i>	61.5
<i>Максимальное значение</i>	74.0
<i>Среднее значение</i>	60.2
<i>Стандартное отклонение</i>	8.1
<i>Стандартная ошибка среднего</i>	2.2

Глава 4. ОБСУЖДЕНИЕ

4.1. Сравнение потенциалов, вызванных эмоциогенными стимулами, в условиях активного и пассивного внимания

Одни и те же эмоциогенные стимулы могли привлекать внимание в большей или меньшей степени в зависимости от задания. В режиме «Пассивное внимание. Изображения» испытуемые получали задание смотреть на экран, в режиме «Активное внимание к целевому стимулу» - считать целевой стимул. Таким образом, в первом случае общий уровень внимания был ниже, чем во втором, однако в режиме с активным вниманием испытуемые были заняты счетом целевого стимула, что могло отвлекать основной ресурс внимания на обработку целевых, но не эмоциогенных стимулов. Отсутствие значимых различий между амплитудами компонентов (Рис.5-9) для обоих случаев может свидетельствовать либо о том, что выше названные факторы (общий уровень внимания и концентрация на счете целевого стимула) уравновесили друг друга, либо о том, что восприятие привлекающих автоматическое внимание стимулов идет параллельно с концентрацией на счете целевых стимулов и не зависит от нее.

4.2. Сравнение компонента P200 в разных режимах

P200 имеет большую амплитуду в ответ на целевой или редкий стимул, при этом он отражает обработку характерных черт и признаков стимула (Luck, 2005). В случае изображений лиц также показано возрастание амплитуды P200 по сравнению с другими зрительными стимулами, и в этом случае чувствительный к лицам компонент P200 часто обозначают как VPP (vertex positive potential). VPP во многом сходен с компонентом N170, однако выражен во фронто-центральных областях и представляет собой позитивный пик (Rossion, 2003).

В нашей работе были использованы сложные для восприятия и

обработки в коре больших полушарий стимулы: лица людей и изображения различного содержания с множеством деталей. Это способствовало выраженности компонента P200 во всех трех режимах для стимулов, тем или иным образом привлекавших внимание испытуемых.

Примечательно, что в канале Cz P200 имел наибольшую амплитуду для режима «Активное внимание к целевому стимулу», в канале Pz – для режима «Пассивное внимание. Лица» (Рис.10). Однако отсутствие статистически значимых различий указывает на то, что в режимах с пассивным вниманием испытуемые автоматически обращали внимание на определенные выделяющиеся детали эмоциогенных изображений и лиц, в то время как запоминающиеся детали целевых изображений в режиме «Активное внимание» способствовали концентрации внимания на них. Этим обусловлено отсутствие различий для амплитуд компонента P200 в режимах с различными стимулами в условиях активного и пассивного внимания.

4.3. Сравнение компонента P300 в разных режимах

P300 появляется в ответ на целевой или редкий стимул. При этом, в отличие от P200, P300 отражает восприятие стимула как целого, то есть возникает в ответ на весь комплекс признаков целевого стимула (Luck, 2005).

Амплитуды P300 в режимах с пассивным вниманием малы, однако при использовании лиц P300 значимо меньше, чем при использовании изображений различного содержания (Рис.11). Это указывает на то, что изображения были легче различимы, и эмоциогенные изображения сильнее выделялись на фоне остальных, и, являясь редкими стимулами, вызывали генерацию P300, а эмоциогенные лица слабо выделялись на фоне нейтральных. В целом же при отсутствии задания, связанного с активным вниманием, все предъявляемые лица были схожи, изображения – практически равноценны, что сказалось на низких амплитудах P300.

Однако выраженность P300 для эмоциогенных изображений указывает на то, что данные изображения оказались для испытуемых значимыми.

Амплитуды P300 в режиме «Активное внимание к целевому стимулу» достигали, как и ожидалось, больших значений в связи с наличием активного внимания к целевому стимулу и, как следствие, восприятием целевого стимула как значимого.

4.4. Сравнение амплитуд компонентов P200 и P300

Компоненты P200 и P300 схожи тем, что их амплитуды больше в ответ на стимул, на котором испытуемый сознательно концентрирует внимание, либо в ответ на редкий стимул. Однако в зависимости от задания и стимульного материала соотношение этих компонентов может изменяться. Для режима «Пассивное внимание. Лица» амплитуда P200 (в данном случае P200 соответствует VPP) значительно превышала амплитуду P300 в обоих каналах, что подчеркивает роль P200 в распознавании лиц (Рис.12). Для режима «Пассивное внимание. Изображения» амплитуда P300 значительно превышала амплитуду P200 только в канале Pz (Рис.13.) Следует отметить, что P300 более выражен в канале Pz по сравнению с каналом Cz. Полученные данные указывают на то, в случае эмоциогенных изображений привлекало внимание изображение в целом, и его отдельные детали, и, таким образом, в случае пассивного внимания оба компонента могут играть значительную роль в распознавании эмоционального фокуса. В случае активного внимания к целевому стимулу амплитуда P300 значительно превышала амплитуду P200, при этом различия очень велики (Рис.14). Это обуславливает ведущую роль P300 в классическом ИМК для распознавания намерений пользователя (Picton, 1992).

4.5. Сравнение компонента N1 в разных режимах

N1 – компонент, чувствительный к пространственным характеристикам стимула. При предъявлении лиц по сравнению с другими зрительными

стимулами наблюдается хорошо выраженный негативный пик N170, являющийся вариацией компонента N1, чувствительной к лицам и отражающей распознавание структуры лица. Задачей нашей работы было выяснить, насколько N1 (N170) чувствителен к пассивному либо активному вниманию к стимулам.

Полученные данные указывают на то, что амплитуда N1 зависит от типа стимульного материала (наличие значимых различий между режимами с лицами и изображениями), но не зависит от того, сознательно или автоматически испытуемый обращает внимание на определенные стимулы (эмоциогенные либо целевые) (Рис. 15). Возможно, это объясняется тем, что при наличии любого типа внимания к стимулу испытуемый старается более четко его рассмотреть (фиксация взгляда на стимуле). Разница в амплитудах N1 между режимами с лицами и изображениями может быть объяснена большей наглядностью и насыщенностью деталями изображений по сравнению с фотографиями лиц (Приложение 1 и 2).

4.6. Сравнение компонента P100 в разных режимах

P100 – один из первых хорошо выраженных зрительных компонентов, отражающий ранние процессы обработки зрительных стимулов (Luck, 2005).

Появление выраженного P100 может быть объяснено ранними процессами внимания к эмоциогенному (выделяющемуся) или целевому стимулу. Во втором случае амплитуда была значимо выше (Рис.16), что можно объяснить тем, что испытуемый сознательно концентрировался на целевом стимуле и старался выполнить задание (счет целевого стимула) и не пропустить нужный стимул. В случае пассивного внимания испытуемый не имел конкретной задачи и обращал внимание на все предъявляемые стимулы, при этом эмоциогенные стимулы испытуемый замечал больше, что нашло отражение в выраженном P100 небольшой

амплитуды на разностных кривых.

4.7. Сравнение компонента N400 в разных режимах

Компонент N400 (N400f) выражен при предъявлении знакомых лиц и участвует в их узнавании (Eimer, 2000), что нашло подтверждение и в нашей работе: средняя амплитуда данного компонента для режима «Пассивное внимание. Лица» стремится к нулю, что обусловлено тем, что испытуемым предъявлялись лица незнакомых людей. Роль компонента N400 при предъявлении изображений не вполне ясна. Нужно отметить, что на некоторых изображениях присутствовали люди, однако многие изображения включали объекты неживой природы, животных и предметы. В режиме с активным вниманием целевой стимул выбирался таким образом, чтобы не содержать изображения людей и животных и быть нейтральным, по крайней мере, для большинства испытуемых. Большие амплитуды N400 для этого режима (в режиме с активным вниманием N400 был значимо больше) показали чувствительность данного компонента к активному вниманию. Однако, возможно, что большие амплитуды компонента N400 связаны с тем, что на фоне нецелевых стимулов, в большинстве случаев являвшихся более эмоциогенными, нейтральные целевые стимулы представлялись испытуемым выпадающими из контекста (чувствительность N400 к несоответствию стимула контексту в случае изображений показана в работах West and Holcomb (2001)).

4.8. Точность классификации

Точность классификации позволяет оценить вероятность выбора целевого стимула. Для режима с активным вниманием точность классификации высока, поскольку данный режим соответствует парадигме ИМК для детекции команд пользователя, и активное внимание к целевому стимулу вызывает большие различия между кривыми для целевых и нецелевых стимулов, что позволяет системе с большой вероятностью

определить, какой стимул является целевым.

Для режимов с пассивным вниманием характерна значимо более низкая точность. Однако для обоих режимов средняя точность значимо превышала случайный уровень классификации (среднее значение точности составило 16,9 %, что приблизительно соответствует 1/6). При этом у некоторых испытуемых точность достигала 80%; у троих испытуемых точность классификации в одном из режимов с пассивным вниманием превысила точность в режиме с активным вниманием (Таблица 7). Следует отметить, что подобный результат создает большие перспективы для разработки на базе ИМК систем для детекции эмоционального фокуса. Можно предположить, что низкие значения точности у некоторых испытуемых обусловлены не только индивидуальными особенностями ПСС, но и тем, что в ходе опроса испытуемые задумывались, оценивая эмоциогенность стимулов (сознательный процесс), в то время как при предъявлении эмоциогенные стимулы привлекали внимание автоматически.

4.9. Корреляция точности классификации с амплитудами компонентов

Точность классификации коррелирует с амплитудой компонента P300 для режима с активным вниманием (Рис.20), что подчеркивает чувствительность P300 к активному вниманию и роль данного компонента в ИМК для детекции намерений пользователя. Следует также обратить внимание на то, что корреляция была выявлена только в канале Pz, что обусловлено тем, что в случае использования в качестве стимулов изображений P300 был более выражен в париетальных областях мозга. Наличие отрицательной корреляции между точностью классификации и амплитудой P300 в канале Pz для режима «Пассивное внимание. Изображения» (Рис.21) может указывать на то, что P300 отражает сознательные процессы, в то время как внимание к эмоциогенным

стимулам возникает автоматически. Возможно, такой результат также связан с меньшей выраженностью других компонентов, повышающих точность классификации, при возрастании амплитуды P300, однако значимой корреляции точности с амплитудой других компонентов выявить не удалось. Это подчеркивает тот факт, что P300 отражает сознательные процессы в коре, а в случае пассивного внимания важна обработка стимулов без привлечения сознательных процессов.

Корреляция точности классификации с амплитудой N1 для режима «Пассивное внимание. Лица» (точность растет при больших по модулю значениях N1) (Рис.22) подтверждает значительную роль компонента N170 в распознавании лиц (Rossion, 2003). Нужно отметить, что такой результат был получен при крайне низких значениях амплитуды N170. Таким образом, ведущую роль в обработке лиц играет N170, и в случае предъявления лиц амплитуда N170 вносит решающий вклад в распознавание эмоционального фокуса. Роль N170 в ИМК для детекции команд пользователя при использовании перекрывающих основные стимулы лиц вместо подсветки была показана в работах Kaufmann et al., 2013.

4.10. Результаты психометрических тестов

Тест САН показал хорошее самочувствие и настроение большинства испытуемых и их готовность участвовать в эксперименте. «Шкала дифференциальных эмоций» подтвердила отсутствие у испытуемых перед началом исследования сильных эмоций, способных повлиять на результаты исследования.

Тест Люцина показал, что в выборке отсутствовали испытуемые с очень высоким либо очень низким эмоциональным интеллектом. В контексте нашей задачи это представляется позитивным результатом, поскольку при низком уровне ЭИ испытуемые могли не распознать собственные эмоции, что сказалось бы на адекватности оценок стимулов в

ходе опроса, а при высоком уровне ЭИ испытуемые могли иметь возможность произвольно контролировать свои эмоции в ходе исследования.

Заключение

Целью данной работы было выяснение дискриминирующего потенциала ПСС-реакций в ответ на предъявление стимулов с явно выраженной эмоциогенной окраской в условиях отсутствия привлечения к ним активного внимания. Для режимов с пассивным вниманием были достигнуты значения точности классификации, превышающие случайный уровень, что создает перспективы продолжения работы в направлении разработки на базе ИМК систем для распознавания неявных эмоциональных фокусов внимания, возможно, с использованием новых типов стимулов. В данном исследовании организация предъявления стимулов и методика оценки точности классификации соответствовали таковым в стандартных психофизиологических экспериментах и методике ИМК-Р300. Однако в последующем при разработке систем детекции неявных эмоциональных фокусов более перспективной представляется разработка и применение других регламентов предъявления стимулов, например, не включающих жесткое деление сессии на блоки записей ЭЭГ с фиксированным числом стимулов в них, а также применение «онлайн»-алгоритмов анализа ЭЭГ, влияющих на процесс предъявления стимулов. Методика отнесения стимулов к классу целевых на базе опросов испытуемых представляется вполне эффективной, однако возможна разработка новых подходов при составлении опросов. Отсутствие значимых различий в амплитудах компонентов для эмоциогенных стимулов между режимами с пассивным и активным вниманием указывает на оправданность использования парадигмы пассивного внимания, когда единственной инструкцией для испытуемых является смотреть на предъявляемые изображениями. Следует также отметить выраженность пиков на разностных кривых для режимов с пассивным вниманием. Для режима «Активное внимание к целевому стимулу» характерны высокие значения точности классификации, что подтверждает эффективность использования лиц и эмоциогенных изображений в классическом ИМК для

детекции команд пользователя. Однако точность сильно варьирует в ряду испытуемых, что характерно для всех режимов. Таким образом, следует подчеркнуть важность индивидуального подхода в технологии ИМК и изучении потенциалов, связанных с событиями (проведение опросов и психометрических тестов, индивидуальный анализ кривых ПСС).

Выводы

1. Реакции ПСС (P300, P200, N400, P100, N1) в ответ на предъявление эмоциогенных изображений не различались в условиях одновременного наличия или отсутствия внимания к целевым стимулам, согласно инструкции.
2. Амплитуды компонента P300 достигали наибольших значений при активном привлечении внимания к стимулу, наименьших – без привлечения активного внимания с использованием лиц в качестве стимулов.
3. При использовании в качестве стимулов человеческих лиц амплитуда компонента P200 была выше, а при использовании изображений без лиц, напротив, была ниже, чем амплитуда компонента P300. Также амплитуда компонента N1 была ниже при использовании в качестве стимулов лиц по сравнению со стимулами на основе изображений без лиц.
4. Амплитуды компонентов P100 и N400 были выше при активном привлечении внимания к стимулу, чем в режимах без привлечения активного внимания.
5. Точность классификации для стимулов без привлечения активного внимания была ниже точности для стимулов с привлечением активного внимания, однако значительно превышала случайный уровень классификации в два и более раз.
6. Точность классификации коррелировала с амплитудой P300 при использовании изображений в качестве стимулов (в случаях отсутствия активного внимания корреляция обратная) и с амплитудой N1 при использовании лиц в качестве стимулов.

Список литературы

1. Каплан А.Я., 2016. Нейрофизиологические основания и практические реализации технологии Мозг-Машинных Интерфейсов в неврологической реабилитации // Физиология человека. № 42(1), С.118-127.
2. Шишкин С.Л., Ганин И.П., Николаев А.А., Каплан А.Я., 2011. Психофизиологические и вычислительные перспективы использования компонента N1 мозговых потенциалов в интерфейсе мозг-компьютер «На волне P300» // Труды всероссийской конференции «Нейроинформатика-2011» (МИФИ, 24 января-28 января 2011 г.). С. 192-201.
3. Alexander J. E., Bauer L. O., Begleiter H., Kuperman S., Morzorati S., O'Connor S. J., Polich J., Porjesz B., Rohrbaugh J., 1995. P300 hemispheric amplitude asymmetries from a visual oddball task // Psychophysiology. V. 32. P. 467-475.
4. Asmaro D., Carolan P. L., Liotti M., 2014. Electrophysiological evidence of early attentional bias to drug-related pictures in chronic cannabis users // Addict Behav. V. 39(1). P.114-121.
5. Asmaro D., Jaspers-Fayer F., Sramko V., Taake I., Carolan P., Liotti M., 2012. Spatiotemporal dynamics of the hedonic processing of chocolate images in individuals with and without trait chocolate craving // Appetite. V. 58(3) P. 790-799.
6. Blankertz B., Tangermann M., Vidaurre C., Fazli S., Sannelli C., Haufe S., Maeder C., Ramsey L., Sturm I., Curio G., Müller K.R., 2010. The Berlin Brain-Computer Interface: Non-Medical Uses of BCI Technology // Front Neurosci. V. 4. P. 198.
7. Carreti, L., Hinojosa, J., Mercado, F., Tapia, M., 2000. Emotion, attention, and the 'negativity bias', studied through event-related potentials // International Journal of Psychophysiology. V. 41. P. 75-85.
8. Carreti, L., Hinojosa, J. A., Martín-Loeches, M., Mercado, F., Tapia, M.,

2004. Automatic attention to emotional stimuli: Neural correlates // *Human Brain Mapping*. V. 22(4). P. 290–299.
9. *Cauquil, A. S., Edmonds, G. E., Taylor, M. J., 2000. Is the face-sensitive N170 the only ERP not affected by selective attention? // Neuroreport*. V. 11. P. 2167–2171.
10. *Diedrich, O., Naumann, E., Maier, S., Becker, G., & Bartussek, D., 1997. A frontal positive slow wave in the ERP associated with emotional slides // Journal of Psychophysiology*. V. 11(1). P. 71–84.
11. *Do A.H., Wang P.T., King C.E., Schombs A., Cramer S.C., Nenadic Z., 2102. Brain-computer interface controlled functional electrical stimulation device for foot drop due to stroke // Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc*. P. 6414-6417.
12. *Duncan, C. C., Barry, R. J., Connolly, J. F., Fischer, C., Michie, P. T., Näätänen, R., Van Petten, C., 2009. Event-related potentials in clinical research: Guidelines for eliciting, recording, and quantifying mismatch negativity, P300, and N400 // Clinical Neurophysiology*. V. 120(11). P. 1883-1908.
13. *Eimer M., 1997. An event-related potential study of transient and sustained visual attention to color and form // Biological Psychology*. V. 44. P.143-160.
14. *Eimer, M., 2000. Effects of face inversion on the structural encoding and recognition of faces - Evidence from event-related brain potentials // Cognitive Brain Research*. V. 10. P. 145–158.
15. *Eimer, M., Holmes, A., 2002. An ERP study on the time course of emotional face processing // Neuroreport*. V. 13(4). P. 427-431.
16. *Farwell, L. A., Donchin, E., 1988. Talking off the top of your head: toward a mental prosthesis utilizing event-related brain potentials // Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. V. 70. P. 510–523.
17. *Frenzel S., Neubert E., 2010. Is the P300 Speller Independent? // arXiv preprint arXiv:1006.3688*
18. *Foti, D., Hajcak, G., Dien, J., 2009. Differentiating neural responses to*

- emotional pictures: Evidence from temporal-spatial PCA // *Psychophysiology*. V. 46(3). P. 521–530.
19. *Herrman, M. J., Ehlis, A. C., Ellgring, H., Fallgatter, A. J.*, 2004. Early stages (P100) of face perception in humans as measured with event-related potentials (ERPs) // *Journal of Neural Transmission*. V. 112. P. 1073-1081.
 20. *Jin, J., Allison, B.Z., Kaufmann, T., Kübler, A., Zhang, Y., Wang, X., Cichocki, A.*, 2012. The changing face of P300 BCIs: a comparison of stimulus changes in a P300 BCI involving faces, emotion, and movement // *PLoS One*. V. 7(11):e49688.
 21. *Katayama, J., Polich, J.*,1999. Auditory and visual P300 topography from a 3 stimulus paradigm // *Clinical Neurophysiology*. V. 110(3). P. 463–468.
 22. *Kaufmann, T., Schulz, S.M., Grünzinger, C., Kübler, A.*, 2011. Flashing characters with famous faces improves ERP-based brain-computer interface performance // *J Neural Eng*. V. 8(5):056016.
 23. *Kaufmann, T., Schulz, S. M., Köblitz, A., Renner, G., Wessig, C., Kübler, A.*, 2013. Face stimuli effectively prevent brain-computer interface inefficiency in patients with neurodegenerative disease // *Clinical Neurophysiology*. V. 124. P. 893–900.
 24. *Kissler, J., Herbert, C., Winkler, I., Junghofer, M.*,2009. Emotion and attention in visual word processing: an ERP study // *Biological Psychology*. V. 80(1). P. 75–83.
 25. *Krompinger, J. W., Moser, J. S., Simons, R. F.*, 2008. Modulations of the electrophysiological response to pleasant stimuli by cognitive reappraisal // *Emotion*. V. 8(1). P. 132–137.
 26. *Lang, P.J., Bradley, M.M., Cuthbert, B.N.*, 2008. International affective picture system (IAPS): Affective ratings of pictures and instruction manual // Technical Report A-8. University of Florida, Gainesville, FL.
 27. *Luck, S. J.* ,1998. Neurophysiology of Selective Attention // *Attention*. P. 257-295.
 28. *Luck, S. J.*, 2005. An Introduction to the Event-Related Potential

Technique // Monographs of the Society for Research in Child Development. V. 78.

29. Moser, J. S., Hajcak, G., Bukay, E., Simons, R. F., 2006. Intentional modulation of emotional responding to unpleasant pictures: An ERP study // *Psychophysiology*. V. 43(3). P. 292–296.

30. Nicolas-Alonso, L. F., Gomez-Gil, J., 2012. Brain computer interfaces, a review // *Sensors*. V. 12(2). P. 1211-1279.

31. Öhman, A., Flykt, A., Esteves, F., 2001. Emotion drives attention: detecting the snake in the grass // *Journal of experimental psychology: general*. V. 130(3). P. 466.

32. Olofsson, J. K., Nordin, S., Sequeira, H., Polich, J., 2008. Affective picture processing: an integrative review of ERP findings // *Biological psychology*. V. 77(3). P. 247-265.

33. Picton, T. W., Bentin, S., Berg, P., Donchin, E., Hillyard, S. A., Johnson, R., Taylor, M. J., 2000. Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria // *Psychophysiology*. V. 37(02). P. 127-152.

34. Picton, T. W., 1992. The P300 wave of the human event-related potential // *Journal of Clinical Neurophysiology: Official Publication of the American Electroencephalographic Society*. V. 9. P. 456–479.

35. Pišljarić, M., Repovš, G., Pirtošek, Z., 2013. Cognition in late onset depression // *Psychiatry Res*. V.210(1). P.89-94.

36. Polich, J., Kok, A., 1995. Cognitive and biological determinants of P300: an integrative review // *Biological Psychology*. V. 41(2). P. 103–146.

37. Rached, T. S., Perkusich, A., 2013. Emotion Recognition Based on Brain-Computer Interface Systems // *Brain-Computer Interface Systems-Recent Progress and Future Prospects*. P. 254-270.

38. Rebai, M., Poiroux, S., Bernard, C., Lalonde, R., 2001. Event-related potentials for category-specific information during passive viewing of faces and objects // *International Journal of Neuroscience*. V. 65(3-4). P. 43–59.

39. *Rossion B., Cottrell G. W., Joyce C. A., Tarr M. J., 2003. Early laterization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex // NeuroImage. V. 20. P. 1609-1624.*
40. *Schupp, H. T., Junghöfer, M., Weike, A. I., Hamm, A. O., 2003. Attention and emotion: an ERP analysis of facilitated emotional stimulus processing // Neuroreport. V. 14. P. 1107–1110.*
41. *Sprengelmeyer, R., Jentzsch, I., 2006. Event related potentials and the perception of intensity in facial expressions // Neuropsychologia. V. 44. P. 2899–2906.*
42. *Wang, S., Zhao, Y., Chen, S., Lin, G., Sun, P., Wang, T., 2013. EEG biofeedback improves attentional bias in high trait anxiety individuals // BMC Neurosci. V.14. P.115.*
43. *West ,W. C., Holcomb ,P. J., 2001. Event-related potentials during discourse-level semantic integration of complex pictures // Cognitive Brain Research. V. 13. P. 363–37.*
44. *Wolpaw, J.R. , Birbaumer N., Pfurtscheller G., Vaughan T., 2002. Brain-computer interfaces for communication and control // Clinical Neurophysiology. V. 113(6). P. 767–791.*
45. *Zhao, QibinZhang Y., Jing, J., Wang, X., Cichocki, A., 2012. A novel BCI based on ERP components sensitive to configural processing of human faces // Journal of Neural Engineering. V. 9(2). P. 60-18.*
46. *Psychological Image Collection at Stirling (PICS). pics.stir.ac.uk. European Conference on Visual Perception in Utrecht, 2008.*

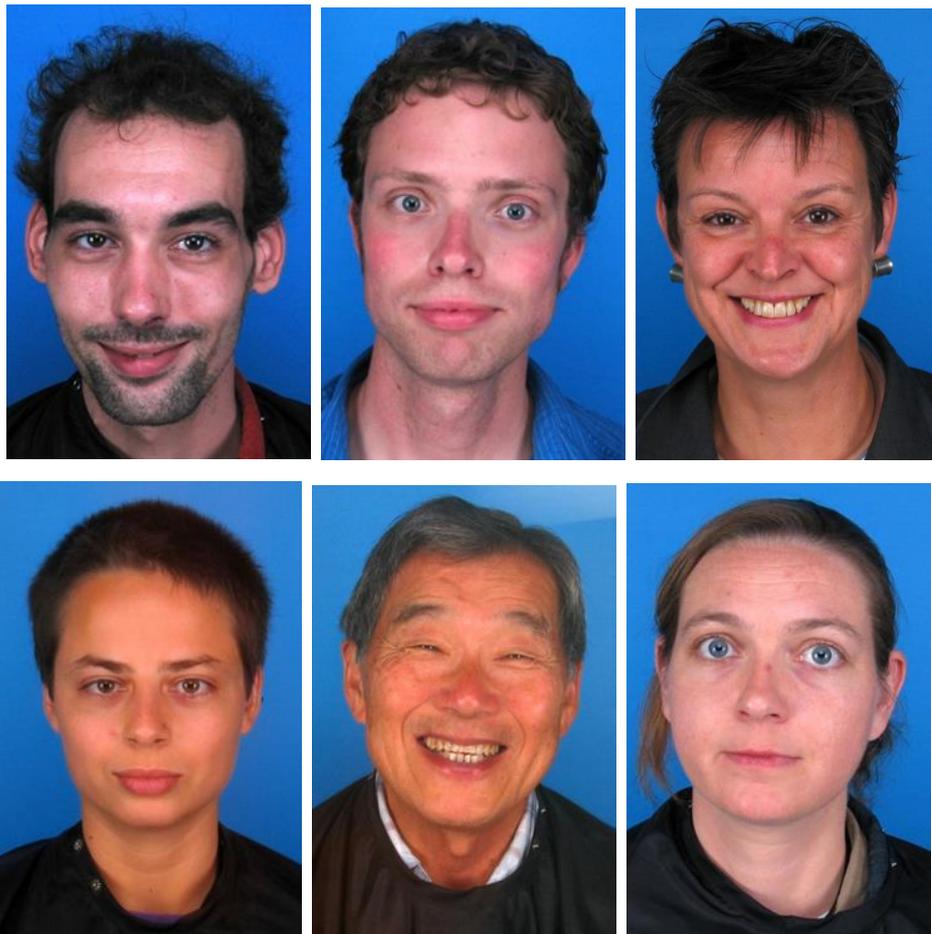
Приложения

1. Примеры изображений из базы IAPS



Прил.1

2. Примеры изображений из базы PICS



Прил.2