

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

*На правах рукописи*

Малахов Денис Геннадьевич

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССОВ  
АКТУАЛИЗАЦИИ ПАМЯТИ ЧЕЛОВЕКА, РАЗЛИЧАЮЩЕЙСЯ ПО  
СУБЪЕКТИВНОЙ ЗНАЧИМОСТИ И ВРЕМЕНИ ПРИОБРЕТЕНИЯ

Специальность: 5.3.2. — Психофизиология (психологические науки)

Диссертация на соискание ученой степени кандидата психологических наук

Научный руководитель:  
доктор психологических наук,  
профессор, академик РАО  
Александров Юрий Иосифович

Москва — 2024

# Оглавление

	Стр.
Введение.....	7
Глава 1. Обзор литературы.....	21
1.1. Системно-эволюционный подход к исследованию памяти.....	21
1.1.1. Принцип активности в теории функциональных систем .....	21
1.1.2. Системная психофизиология и понятие субъективности.....	22
1.1.3. Определение понятия субъективной значимости.....	24
1.1.4. Системогенез и научение .....	25
1.1.5. Приобретение индивидуального опыта и дифференциация систем .....	29
1.1.6. Сознание, эмоции и дифференцированность систем (единая концепция сознания и эмоций) .....	30
1.1.7. Домены индивидуального опыта .....	32
1.2. Исследования актуализации индивидуального опыта разного онтогенетического возраста и разной сложности.....	37
1.2.1. Межполушарная асимметрия.....	51
1.2.2. Половой диморфизм .....	57
1.3. Исследование памяти в криминалистике и нейрокриминалистике.....	59
1.4. Актуальные проблемы проведения комплексного психофизиологического исследования с использованием полиграфа и фМРТ.....	64
1.4.1. Регистрация физиологических данных с помощью полиграфа и их обработка.....	65
1.4.2. Регистрация и обработка фМРТ-данных .....	68
1.5. Заключение по обзору литературы .....	73
Глава 2. Материалы и методы.....	75

2.1. Выборка.....	75
2.2. Процедура эксперимента.....	75
2.3. Регистрация и предобработка физиологических сигналов .....	79
2.4. Средства обработки данных.....	81
2.5. Анатомический атлас, используемый в работе.....	82
2.6. Предобработка фМРТ-данных.....	83
2.7. Особенности технологии повышения частоты дискретизации фМРТ-данных при обработке и визуализации временных рядов фМРТ-сигнала .....	84
Глава 3. Объективный критерий для выбора и оптимизации параметров обработки данных психофизиологических исследований .....	89
3.1. Постановка проблемы и обоснование решения.....	90
3.2. Экспериментальная апробация предложенного решения .....	96
3.2.1. Наборы данных для оптимизации и валидации.....	96
3.2.2. Процедура вычисления автоматических количественных оценок и ПС ...	96
3.2.3. Процедура варьирования параметров.....	99
3.2.4. Контрольные параметры для сравнения.....	100
3.2.5. Оптимизация параметров обработки сигнала КГР.....	101
3.2.6. Обсуждение результатов оптимизации по сигналу КГР .....	105
3.2.7. Оптимизация параметров обработки сигнала ФПГ .....	108
3.2.8. Обсуждение результатов оптимизации по сигналу ФПГ .....	112
3.3. Сравнение ряда альтернативных способов анализа сигналов КГР и ФПГ .	113
3.3.1. Сопоставление АКО и экспертных балльных оценок.....	113
3.3.2. Сравнение различных способов расчета величины активаций по сигналу КГР.....	116
3.3.3. Сравнение различных способов расчета величины активаций по сигналу ФПГ .....	118
3.4. Заключение по третьей главе.....	121

Глава 4. Сопоставление статистического параметрического и амплитудного подходов к анализу фМРТ-данных .....	124
4.1. Постановка проблемы и обоснование решения .....	124
4.2. Сопоставление повоксельных способов анализа фМРТ-данных на основе статистического параметрического и амплитудного подходов .....	126
4.2.1. Наборы данных для оптимизации и валидации .....	126
4.2.2. Процедура вычисления альфа-коэффициентов и $t$ -значений GLM .....	127
4.2.3. Процедура вычисления АКО по фМРТ-данным .....	128
4.2.4. Групповой анализ полученных данных .....	129
4.2.5. Визуальное сравнение карт активаций .....	130
4.2.6. Результаты повоксельного сравнения различных способов обработки по метрике ПС .....	134
4.2.7. Результаты кроссвалидационного сравнения .....	135
4.3. Сопоставление способов анализа фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга .....	137
4.3.1. Результаты сравнения различных способов оценки активаций с усреднением по структурам мозга по метрике ПС .....	139
4.3.2. Результаты кроссвалидационного сравнения .....	140
4.4. Анализ временных закономерностей фМРТ-сигналов в различных структурах мозга .....	141
4.5. Проверка необходимости приведения фМРТ-сигнала к базовому значению при вычислении АКО .....	143
4.6. Заключение по четвертой главе .....	145
Глава 5. Результаты МРТсП-фМРТ-исследования процессов актуализации памяти человека .....	147
5.1. Постановка проблемы .....	147
5.2. Методические дополнения по пятой главе .....	147
5.2.1. Балансировка сравниваемых условий .....	148

5.2.2. Нормировка данных.....	150
5.2.3. Поправки на множественные сравнения .....	152
5.2.4. Проблема визуального сопоставления активности мозга между различными структурами, а также между группами участников эксперимента .....	155
5.2.5. Определение размера эффекта.....	158
5.3. Результаты анализа КГР и ФПГ и обсуждение результатов .....	161
5.3.1. Сравнение активаций, связанных с актуализацией информации, различающейся по субъективной значимости .....	161
5.3.2. Сопоставление мужской и женской выборки .....	168
5.3.3. Сопоставление активаций в тестах ТСИ и ТЗВ .....	172
5.4. Результаты анализа фМРТ-данных и обсуждение результатов.....	175
5.4.1. Сравнение активаций, связанных с актуализацией информации, различающейся по субъективной значимости .....	175
5.4.1.1. Анализ с помощью стандартных средств (FSL, GLM) .....	175
5.4.1.2. Повоксельный амплитудный анализ фМРТ с помощью авторских методов.....	178
5.4.1.3. Повоксельная временная развертка амплитудных фМРТ-данных .....	181
5.4.1.4. Сопоставление специфичности вовлечения структур мозга в регистрируемое поведение по метрике ПС .....	185
5.4.1.5. Анализ временных рядов фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга .....	191
5.4.2. Прямое статистическое сравнение мужской и женской выборки по фМРТ-данным.....	197
5.4.2.1. Повоксельное сравнение активаций мозга в мужской и женской выборке .....	197
5.4.2.2. Сопоставление мужской и женской выборки по метрике ПС .....	201
5.4.2.3. Сопоставление мужской и женской выборки по амплитудным свойствам фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга .....	204

5.4.3. Прямое статистическое сравнение ТСИ и ТЗВ по фМРТ-данным.....	213
5.4.3.1. Повоксельное сравнение активаций в тестах ТСИ и ТЗВ .....	213
5.4.3.2. Сопоставление ТСИ и ТЗВ по метрике ПС.....	216
5.4.3.3. Сопоставление ТСИ и ТЗВ по временным рядам фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга .....	222
5.5. Заключение по пятой главе .....	232
Заключение .....	237
Список литературы .....	240
Перечень обозначений и сокращений.....	272
Приложение А .....	275

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Способность фиксировать и целенаправленно использовать информацию о событиях прошлого является одной из отличительных черт известных форм биологической жизни. Хотя данные о выработке условных рефлексов у простейших являются противоречивыми, несомненным является наличие у них генома как носителя информации. Появление нервной системы и развитие новых механизмов запоминания существенно расширило адаптационные возможности живых организмов. У человека свойства памяти и ее содержимое являются важнейшей характеристикой как вида в целом, так и отдельных субъектов. Поэтому фундаментальные механизмы памяти — процессы формирования и актуализации индивидуального опыта<sup>1)</sup> человека и животных — в настоящее время являются одним из основных направлений исследования в нейронауках и психофизиологии, а известный исследователь С. Роуз сравнивает память с Розеттским камнем для изучения мозга (Роуз, 1995).

Прикладные направления психофизиологии в своей методической базе прямо или косвенно используют психофизиологические характеристики процессов актуализации памяти человека. Например, в криминалистике и смежных областях используется выявление содержимого памяти с помощью психофизиологических методов, что может оказаться важным в тех ситуациях, когда единственным доступным носителем информации о расследуемых событиях является память человека (Холодный, 2023).

Психофизиологические особенности актуализации памяти на индивидуальном уровне обладают диагностическим потенциалом, который может быть использован в дифференциальной психофизиологии, психофизиологии

---

<sup>1</sup> Вслед за Ю.И. Александровым и др., термином «память» в диссертационной работе обозначались закономерности формирования и поддержания существования ранее сформированных клеточных организаций, соответствующих решению той или иной адаптационной проблемы. Термином «индивидуальный опыт» подчеркивалось, что формирование и поддержание этих организаций создает целостную индивидуально-специфичную структуру субъективных моделей взаимодействия индивида с миром (Александров и др., 2015).

функциональных состояний, инженерной психофизиологии и т.д. Особенную прикладную ценность эти диагностические возможности приобретают в случае применения в медицине. Помимо анализа непосредственно нарушений памяти, психофизиологические особенности актуализации памяти могут являться дополнительными диагностическими признаками при анализе психиатрических состояний, неврологических нарушений и т.д. Такие диагностические средства незаменимы при отсутствии или ненадежности других средств диагностики (как в случае состояний минимального сознания), а также при использовании в комплексе с другими методиками.

Указанные области применения обуславливают прикладную и фундаментальную ценность выявления новых психофизиологических закономерностей, а также совершенствования известных методов психофизиологического анализа при формировании и актуализации памяти человека.

Известно, что одним из способов контролируемой актуализации памяти у человека в эксперименте является предъявление вербальной информации с разнообразными инструкциями (задачами) для участника эксперимента — начиная от просто прослушивания или прочтения до выполнения оценки, сравнения, шкалирования, сокрытия информации и т.д. (Hauk et al., 2004; Pulvermüller, 2005). При этом на динамику регистрируемых физиологических сигналов оказывает влияние множество факторов одновременно. Из криминалистики известно, что одним из параметров, определяющих величину изменений сигналов полиграфа, является субъективная значимость для человека предъявляемой информации (Холодный, 2023). Субъективная значимость в свою очередь может быть обусловлена множеством причин, среди которых выделяют личностные (долговременные) и ситуационные (кратковременные) факторы.

В рамках системной психофизиологии считается, что фактор времени формирования памяти в онтогенезе определяет индивидуальную историю системогенеза и структуру сформированных систем (которая является предметом исследования в системной психофизиологии) (Швырков, Вогник, 1982;

Александров, Александров И.О., 1984; Александров, 1989; Александров И.О., 2006). Структура систем, в свою очередь, проявляется в регистрируемых физиологических показателях (Александров и др., 1997б; Alexandrov, 2008).

Соответственно, как для прикладных, так и для фундаментальных целей актуально выявить соотношение факторов субъективной значимости и времени приобретения содержимого памяти в доступных для регистрации физиологических показателях.

Для анализа психофизиологических закономерностей реализации и формирования поведения развиваются методы регистрации физиологических параметров, методы анализа данных, а также способы организации психофизиологического эксперимента. Важность развития психофизиологических методов была отмечена И.П. Павловым. На современном уровне для реализации психофизиологического исследования требуется совместное применение (конвергенция) различных областей знания (Ковальчук и др., 2013). В XXI веке для психофизиологических исследований широко стали применяться неинвазивные и слабоинвазивные инструментальные методы регистрации физиологических показателей, позволяющие визуализировать активность отдельных структур мозга. К таким методам относятся электроэнцефалография (ЭЭГ) высокой плотности, магнитоэнцефалография (МЭГ), функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и т. д. Развиваются также и косвенные (периферические) методы исследования функций мозга, включая исследования с применением полиграфа (ИПП), регистрирующего одновременно физиологические параметры дыхания, состояния кожи (при помощи кожно-гальванической реакции, КГР) и сердечнососудистой системы (например, при помощи фотоплетизмограммы, ФПГ, а также вычисления частоты сердечных сокращений, ЧСС, и вариативности сердечного ритма).

При междисциплинарном и межпарадигмальном рассмотрении вопросов актуализации памяти возникает проблема сопоставления и объединения результатов психофизиологических исследований. В частности, в психологии

поднимается проблема сопоставления и объединения данных различных исследований, если они получены не количественными, а качественными методами (Носуленко, 2021).

В психофизиологии, несмотря на упомянутое выше развитие технических средств изучения активности мозга и получения в большинстве случаев исходных количественных данных, многие исследования все еще не используют это преимущество и ограничиваются выводами качественного характера — в том смысле, что устанавливается лишь факт наличия связи (отвержение нулевой гипотезы по статистическому критерию) между динамикой поведения и динамикой физиологических показателей. Например, в фМРТ-исследованиях рутинно применяется преимущественно качественный статистический анализ (приводятся *p*- или *t*-значения), как правило, без публикации величины эффекта (Chen G. et al., 2017), при этом информация о количественных соотношениях исследованных показателей по приведенным данным не может быть интерпретирована (см. там же). Это обстоятельство затрудняет сопоставление результатов различных авторов и построение обобщенных психофизиологических моделей.

Указанная особенность анализа и интерпретации данных может приводить и к более фундаментальным ограничениям. Установление в эксперименте факта связи между различными физиологическими показателями и поведением может быть недостаточно с точки зрения получения новой информации, так как системный подход к рассмотрению организации живых организмов уже подразумевает, что в организме большинство наблюдаемых процессов так или иначе связаны между собой. В соответствии с положениями теории функциональных систем и системной психофизиологии, системные процессы носят не только общемозговой, но и общеорганизменный характер (Анохин, 1975; Швырков, 2006; Александров, 2011).

Возможным решением является более широкое использование количественного анализа с установлением соотношения величины эффекта

различных показателей. Такой подход повышает ценность и информативность комплексных психофизиологических исследований.

В свою очередь, практическая реализация комплексных исследований сталкивается с техническими и методическими трудностями, связанными как с регистрацией данных, так и отсутствием подходящих методов обработки. Диссертационная работа направлена на решение проблем совместной регистрации разнородных физиологических сигналов (в частности, объединения методов фМРТ и ИПП) и разработки комплексных методик анализа данных для исследования процессов формирования и актуализации памяти, лежащих в основе поведения и психики. Исследование этих процессов также имеет, как уже отмечено выше, и большое прикладное значение.

Проблематика работы, включающая разработку методов и получение результатов психофизиологических исследований, а также их теоретический, в том числе системный анализ, соответствует пунктам №№ 2, 6, 7, 8 паспорта специальности ВАК 5.3.2. «Психофизиология».

**Степень разработанности проблемы.** Теоретическим основанием диссертационной работы является системно-эволюционный подход, сформированный в школе П.К. Анохина, В.Б. Швыркова, Ю.И. Александрова и сотрудников (см, например: Анохин, 1975; Александров, 1989; Швырков, 2006; Александров, 2011). Развитие системных представлений о работе психики создало теоретическую базу для комплексного описания наблюдаемых в экспериментах взаимосвязей. Формирование новых «элементов памяти» в системной психофизиологии стало рассматриваться как процесс системогенеза (Швырков В. Б., 2006). В результате системогенеза реализуются новые способы взаимодействия организма со средой. Полагается, что новые системы формируются, с одной стороны, за счет механизмов нейрональной пластичности (таким образом проявляя себя в особенностях активности структур головного мозга), а с другой стороны, системы включают в себя и соматические структуры, поскольку все системы, по мнению П.К. Анохина — основоположника системно-эволюционного подхода, в рамках которого оформилась системная

психофизиология, — являются общеорганизменными (Анохин, 1975). Это дает теоретическую основу для выявления системной организации индивидуального опыта (памяти) как с помощью изучения активности головного мозга, так и с помощью «периферических» методов исследования (не связанных напрямую с регистрацией нейрональной активности).

В рамках системно-эволюционного подхода исследуется зависимость физиологических показателей от возраста актуализируемых в эксперименте систем — предполагается, что в этих процессах проявляется индивидуальная история системогенеза (Александров, Самс и др., 1997б; Александров И.О., Максимова и др., 1999; Александров, Брушлинский и др. 1999; Швырков, 2006; Сварник и др., 2011; Кузина, Александров, 2019; Горкин, 2023).

Одной из выявленных закономерностей является увеличение дифференцированности (сложности) формируемых систем в процессе онтогенеза. Экспериментально исследовались психофизиологические характеристики (Марченко, Безденежных, 2008; Колбенева, Александров, 2010; Колбенева, 2013; Александров и др., 2020; Савицкая и др., 2020; Kolbeneva, Alexandrov, 2016) процессов актуализации элементов опыта различного фило- и онтогенетического возраста, а также связанные с этой характеристикой особенности нейрональной активности мозга (Александров, Самс и др., 1997б).

Тем не менее, остаются определенные неясности при рассмотрении формулируемых на основе эмпирического материала психофизиологических закономерностей, связанных с историей формирования актуализируемых систем. В частности, в системной психофизиологии недостаточно разработаны вопросы межполушарной асимметрии мозга в контексте системогенеза. Для дальнейшей разработки указанной тематики с системных позиций требуется учет дополнительных факторов в эксперименте. Это требует выполнения комплексных психофизиологических исследований с привлечением средств картирования активности головного мозга при одновременном контроле периферических физиологических параметров.

В настоящее время большое число исследований по теме диссертационной работы построено в парадигме изучения отдельных «психических функций» и поиске соответствующих им нейрофизиологических коррелятов (Ganis et al., 2003). В частности, в рамках криминалистической психофизиологии имеется много работ, направленных на поиск физиологических проявлений, связанных со значимостью для индивида воспринимаемой им информации в ходе ИПП. В криминалистике развивается положение об «идеальном» следе события прошлого, имеющего субъективную значимость для конкретного человека в условиях проводимого наблюдения (Лурия, 1984; Холодный, 2020; и др.). Из криминалистической практики ИПП известно, что фактор субъективной значимости имеет доминирующее значение при регистрации периферических физиологических параметров с помощью полиграфа — таким образом, учет этого фактора является необходимым в задаче исследования актуализации памяти.

Обзор имеющихся исследований с применением картирования активности головного мозга, проводимых в рамках криминалистической психофизиологии, выявил, что в них не полностью соблюдаются методологические принципы ИПП и, таким образом, затрудняется сопоставление полученных данных: исследования осуществляются преимущественно в парадигме выявления лжи, в то время как криминалистика работает в парадигме выявления скрываемой информации; нарушаются методические требования, например, стимулы предъявляются с периодичностью менее 10 с и т.д.; редко выполняется обязательный контроль динамики физиологической активности в процессе фМРТ-регистрации и др. (Холодный и др. 2021). Требуется устранить эти недостатки.

Практика ИПП интересна также тем, что в своей методологической основе имеет два направления:

- а) «прямая задача» — выявление информативных физиологических показателей, связанных с субъективной значимостью;
- б) «обратная задача» — выявление информации о значимых событиях прошлого по физиологическим показателям.

Комбинация этих подходов позволяет создать способ объективной оценки качества получения и обработки психофизиологических данных, и, таким образом, решить прикладные задачи выбора оптимальных параметров и методов обработки данных. Разработка этого принципа является важным направлением диссертационной работы.

Проведение комплексных психофизиологических исследований требует разработки способов получения унифицированных количественных оценок регистрируемых разнородных физиологических показателей с целью объединения и сопоставления данных. Применение указанного выше подхода по верификации полученных оценок с помощью «прямой» и «обратной задачи» может оказаться полезным при разработке таких количественных оценок.

В качестве **теоретической гипотезы** предполагалось, что имеются количественные характеристики физиологических индикаторов активности мозга и тела, описывающие субъективную значимость актуализируемого материала памяти и время его приобретения.

В качестве **исследовательских гипотез** предполагалось, что могут быть выявлены количественные соотношения амплитудных характеристик сигналов КГР, ФПГ и фМРТ, связанные с субъективной значимостью и временем приобретения материала памяти.

**Цель работы:** проверить сформулированные гипотезы путем выявления психофизиологических закономерностей актуализации у человека материала памяти, различающегося по субъективной значимости и времени приобретения, при помощи анализа данных КГР, ФПГ и фМРТ.

**Задачи работы,** включающие методический и исследовательский аспекты, сформулированы следующим образом:

а) разработать метод оптимизации параметров обработки сигналов КГР и ФПГ с учетом регистрации их в условиях проведения магнитно-резонансной

томографии, а также сигналов фМРТ, используя известные биографические данные участников эксперимента в качестве валидационных критериев;

б) разработать систему количественной оценки физиологических сигналов КГР, ФПГ и фМРТ (с учетом специфики различных областей мозга), чувствительную к амплитуде сигнала и информативную в отношении субъективной значимости материала памяти;

в) с помощью разработанных средств анализа установить психофизиологические характеристики процессов, лежащих в основе актуализации материала памяти, различающегося по субъективной значимости;

г) установить связь фактора времени приобретения человеком материала памяти и психофизиологических характеристик, имеющих информативность в отношении субъективной значимости.

**Объектом исследования** в диссертационной работе являются наблюдаемые физиологические сигналы КГР, ФПГ и фМРТ, отражающие динамику актуализации памяти человека в специальных экспериментах, направленных на исследование субъективной значимости и времени формирования материала памяти.

**Предметом исследования** являются закономерности актуализации материала памяти, имеющего разную субъективную значимость и приобретенного на разных этапах жизни человека.

**Методология и методы исследования.** В работе реализуется принцип конвергенции различных областей знания — фундаментальной психофизиологической теории, криминалистической практики и современных технических средств регистрации и анализа физиологических данных (Ковальчук и др., 2013).

Постановка эксперимента выполнялась в рамках методологии, разработанной в криминалистике, с использованием «Теста со скрываемым именем» (ТСИ) и «Теста на знание виновного» (ТЗВ). Первый тест моделировал сокрытие значимой для человека информации, сохраняемой в памяти на

протяжении десятилетий. Второй — сокрытие ситуационно-значимой информации, сформированной в памяти человека менее чем за час до эксперимента (Холодный и др., 2021).

Для анализа активности головного мозга человека была выбрана технология фМРТ по причине того, что помимо более высокого пространственного разрешения по сравнению с другими неинвазивными методами исследования, фМРТ имеет динамические характеристики сигнала, сходные с сигналами полиграфа, а потому позволяет использовать все методические наработки в постановке эксперимента, созданные в рамках практико-ориентированных исследований. Для контроля физиологических процессов в режиме реального времени во время проведения экспериментов данные регистрировались с помощью полиграфа и магнитно-резонансного томографа одновременно.

В диссертационной работе было применено большое число методических разработок автора. Регистрация сигналов КГР и ФПГ, анализируемых в работе, выполнялась с помощью разработанных автором в НИЦ «Курчатовский институт» средств: МРТ-совместимого полиграфа (МРТсП) — «Система одновременного контроля и оценки динамики физиологических процессов в условиях проведения функциональной магнитно-резонансной томографии человека» (Патент RU 2756566 С1); системы синхронизации предъявляемых стимулов и физиологических данных с магнитно-резонансным томографом; а также ряда компьютерных программ для сбора, обработки и визуализации данных на языках Ассемблер, С++ и Python 3.7.4 — компьютерного обеспечения психофизиологического эксперимента (Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2021618804; и № 2022662059). В методической части диссертационной работы описан разработанный автором метод количественной оценки динамики фМРТ-сигналов по областям мозга, а также метод оптимизации параметров обработки и сравнения способов обработки данных в психофизиологических исследованиях.

Регистрация фМРТ-данных выполнялась при помощи магнитно-резонансного томографа Siemens Verio 3T на базе НИЦ «Курчатовский институт».

Данные фМРТ были обработаны с использованием суперкомпьютерных вычислений на базе Объединенного вычислительного кластера НИЦ «Курчатовский институт».

**Научная новизна работы** заключается в том, что был получен оригинальный эмпирический материал, имеющий как теоретическое, так и прикладное значение, обеспеченный разработкой и применением новых методов регистрации и обработки данных в экспериментах с использованием криминалистических тестов, а также новой постановкой задачи и исследовательских гипотез. Во время записи фМРТ-данных впервые применялся контроль состояния человека в режиме реального времени с помощью разработанного автором МРТсП с целью устранения помех и контроля соблюдения участником эксперимента полученных инструкций. В ходе выполнения диссертационного исследования был разработан универсальный подход к оптимизации параметров обработки данных, основанный на контроле субъективной значимости материала памяти человека. Сигналы КГР, ФПГ и фМРТ были обработаны с использованием разработанных автором методов вычисления количественной оценки величин активаций. По данным КГР и ФПГ продемонстрирована большая чувствительность этих сигналов к субъективной значимости актуализируемой информации по сравнению с чувствительностью к времени приобретения материала памяти. По данным фМРТ выявлены различия в активации структур мозга во время актуализации памяти, различающейся по времени приобретения, включая особенности межполушарной асимметрии.

**Теоретическая значимость.** В интересах психофизиологии, в работе уточнена специфичность вовлечения областей мозга в когнитивные процессы, в частности — извлечение из памяти значимой информации, а также проведено сравнительное исследование структур индивидуального опыта, сформированных на разных этапах индивидуального развития человека.

**Практическая значимость.** Разработанная система количественной оценки сигналов КГР, ФПГ и фМРТ для диагностики у человека материала памяти,

имеющего высокую субъективную значимость, представляет интерес для фундаментальных исследований и прикладного применения (например, для диагностики наличия у человека скрываемой им информации и контроля эффективности терапии психических и неврологических заболеваний).

**Личный вклад автора** заключается в создании: а) МРТсП; б) комплексной методики фМРТ-МРТсП-исследования; в) программного обеспечения для сбора и обработки данных полиграфа; г) метода и программного обеспечения для анализа и визуализации динамики фМРТ-сигналов. Использование перечисленных средств и методов позволило выявить автором описанные ниже психофизиологические закономерности.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. По данным фМРТ установлены области мозга, имеющие специфику активации, включая особенности межполушарной асимметрии, при актуализации материала памяти, различающегося по субъективной значимости и времени приобретения. В тех же экспериментальных условиях характеристики сигналы КГР и ФПГ по порядку величины эффекта оказались существенно менее связанными со временем приобретения материала памяти по сравнению с субъективной значимостью актуализируемой информации. Полученные результаты позволяют по-новому подойти к анализу специфики участия разных областей мозга в обеспечении формирования и актуализации материала памяти, сформированного на разных этапах индивидуального развития.

2. Разработан метод оптимизации параметров обработки данных психофизиологических исследований, позволяющий повысить информативность количественных оценок, рассчитываемых по сигналам КГР, ФПГ и фМРТ, в отношении субъективной значимости материала памяти в момент исследования.

3. Разработан метод количественной оценки сигналов КГР, ФПГ и фМРТ (при вариации форм гемодинамического ответа в различных областях мозга), позволяющий исследовать память человека и субъективную значимость актуализируемой информации.

**Достоверность результатов** обусловлена применением в диссертационной работе современных технических средств сбора данных, статистических методов анализа, а также сопоставимостью результатов с данными других авторов в случае возможности сопоставления. Общая выборка составила 74 человека (37 мужчин и 37 женщин), которые сообщили об отсутствии у них каких-либо заболеваний на момент участия в исследовании. В некоторых задачах использовалась подвыборка 46 человек. Это составляет достаточно большое число участников для фМРТ-исследований. Выборка была симметричной по полу.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы были представлены в виде устных докладов и тезисов следующих конференций: Заседание секции «Психофизиология» Российского психологического общества (Москва, 2023); XIX Международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии» (Судак, 2023); Седьмая конференция «Когнитивная наука в Москве: новые исследования» (Москва, 2023); Первый Национальный конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике и Девятая международная конференция по когнитивной науке (Москва, 2021); Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: BICA\*AI 2020 (Natal, Brazil, 2020); Biologically Inspired Cognitive Architectures, 2019, BICA 2019 (Seattle, USA, 2019).

**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 14 публикациях: 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ по специальности 5.3.2 «психофизиология» (психологические науки); 5 статей в изданиях, проиндексированных в Web Of Science и/или Scopus; 1 патент на изобретение; 2 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ; 2 публикации в других рецензируемых изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 286 страниц с 69 рисунками и 25 таблицами. Список цитируемой литературы содержит 314 наименований.

**Благодарности.** Автор благодарит научного руководителя Ю.И. Александрова за формирование научных ценностей в годы учебы и всестороннюю поддержку при обсуждении результатов и подготовке диссертационной работы.

Особая благодарность выражается Ю.И. Холодному, без участия которого диссертационная работа не могла состояться, за знакомство с методами и фундаментальными основами исследований с применением полиграфа, а также моральную поддержку при выполнении работы.

Автор благодарит всех коллег из лаборатории прикладной и экспериментальной психофизиологии Курчатовского комплекса НБИКС-ПТ НИЦ «Курчатовский институт» (особенно В.А. Орлова) и лаборатории психофизиологии им. В.Б. Швыркова Института психологии РАН за ценные советы и замечания.

# Глава 1. Обзор литературы

Приведены определения ключевых терминов, используемых в работе; дан обзор подходов, имеющих отношение к проблемным полям диссертационной работы.

## 1.1. Системно-эволюционный подход к исследованию памяти

### 1.1.1. Принцип активности в теории функциональных систем

Системная психофизиология развилась из теории функциональных систем (ТФС) П.К. Анохина. В соответствии с положениями ТФС, поведение живых организмов целенаправленно, определяется моделью будущего результата (Анохин, 1975). П.К. Анохин называл модель результата системообразующим фактором, упорядочивающим взаимодействия элементов системы. Сам же результат — это полезный приспособительный эффект в соотношении организма со средой.

В этом контексте следует рассмотреть понятие «стимул». Так как в качестве детерминанты поведения в ТФС рассматривается модель результата, то роль стимула редуцируется. Хотя в ТФС присутствует понятие «пускового стимула», при дальнейшем развитии системной психофизиологии от него полностью отказались. Ю.И. Александров отмечает, что «кажущаяся необходимость использования понятия «стимул» *отпадает* при рассмотрении поведенческого акта не изолировано, а как компонента поведенческого континуума — последовательности актов, совершаемых индивидом на протяжении его жизни» (Александров, 2011, с. 5).

В диссертационной работе понятие «стимул» используется для условного обозначения экспериментальных процедур с целью удобства дальнейшего изложения, но в него не вкладывается смысл детерминанты поведения. По словам В.Б. Швыркова, «употребляя термины «условный рефлекс», «условный

раздражитель», и т.п., мы лишь следуем физиологической традиции обозначать ими определенные экспериментальные процедуры, но ни в коем случае не вкладываем в эти термины исходный концептуальный смысл» (Швырков В. Б., 2006, с. 206).

Также важно обратить внимание на понятие «функции». В ТФС оно отличается по содержанию от традиционного понимания функций в психологии (таких как внимание, восприятие и т.д.). П.К. Анохин рассматривал функцию как достижение результата системой (Анохин, 1975). Так как в этот процесс включаются все компоненты системы — не только мозговые, но и соматические — функциональные системы рассматриваются как общеорганизменное явление. Это создает теоретическую базу и открывает методологические возможности для системной интерпретации «периферических» методов исследования в психофизиологии.

### **1.1.2. Системная психофизиология и понятие субъективности**

Исследования В.Б. Швыркова и его сотрудников привели к формированию на базе ТФС системно-эволюционного подхода (Швырков, 2006). В качестве предметной области психологии сформировалось новое направление исследований — «системная психофизиология», включенное в паспорт специальности ВАК 5.3.2. «Психофизиология».

Принципиальным для развития системной психофизиологии было формулирование системного решения психофизиологической проблемы (Анохин, 1975; Швырков, 1978; Швырков, 2006), которое относится к группе двухаспектных теорий (Александров, 2020). Обосновывается неправомерность прямого соотнесения психического и физиологического. Они рассматриваются как два описания (аспекта) единых системных процессов, лежащих в основе организации поведения. Поведение осуществляется за счет активации нейронов, специализированных в процессе научения этому поведению. Поэтому оказывается, что «изучение системных специализаций и динамики активности нейронов — объективный метод изучения состояния и динамики субъективного

мира» (Швырков, 2006, с. 13). С этих позиций были развиты инструментальные методы регистрации физиологических и поведенческих показателей, позволяющих описать системную структуру и актуализацию индивидуального опыта.

В традиционной психофизиологии ставятся задачи выявления физиологических коррелятов психических процессов и состояний. В системной психофизиологии специфические задачи «состоят в *изучении закономерностей формирования и реализации систем, их таксономии, динамики межсистемных отношений в поведении*» (Александров, 2011, с. 5).

В системной психофизиологии находит дальнейшее развитие парадигма активности. Постулируется, что свойство активности (то есть детерминированность поведения моделью результата) присуще не только животным, обладающим нервной системой, но и отдельным клеткам, включая нейроны (Александров, 1999).

П.К. Анохин связывает понятия активности и целенаправленности с понятием опережающего отражения (Анохин, 1978). Считается, что опережающее отражение является отличительной особенностью любых форм жизни. Неживые тела *отражают* прошлые события, стимулы, в то время как живые организмы формируют *модель будущего результата*. Активность — подготовка и обеспечение будущего.

Появление целей обуславливает деление среды на субъективно значимые и незначимые объекты. Как отмечает Ю.И. Александров, «*опережающее отражение неразрывно связано с его субъективностью*, поскольку планирование будущего (формирование целей) зависит от содержания индивидуальной памяти и от наличия мотиваций, а также потому, что появление целей обуславливает индивидуально специфичное деление ранее (до появления жизни) нейтрального мира на «хорошие» и «плохие» объекты и явления, способствующие и препятствующие достижению индивидуальных целей» (Александров, 2011, с. 5). Таким образом, можно принять, что субъективно значимые объекты — это такие

объекты среды, которые способствуют или препятствуют достижению индивидуальных целей.

### 1.1.3. Определение понятия субъективной значимости

Категория «значимость», будучи весьма используемым понятием в повседневной жизни, не нашла должной разработки и исследования в психологической науке. Возможно, это связано с широким использованием в экспериментальной психологии термина «статистическая значимость» и трудностями с омонимией.

В отечественной психологии категория «значимость» рассматривалась в области инженерной психологии. Б.Г. Мещеряковым и В.П. Зинченко дано определение понятию «значимость сигнала» следующим образом: «значимость сигнала — одна из важных психологических характеристик сигнала, которая определяется отношением содержащейся в нем информации к *смыслу* решаемой субъектом задачи. Обычно человек-оператор имеет дело с несколькими уровнями значимости сигнала, которые устанавливаются им самим, либо даются в готовом виде. В обоих случаях уровень значимости сигнала является одним из определяющих факторов классификации элементов *информационной модели*» (Мещеряков, Зинченко, 2006, с. 160). В свою очередь, «задача — цель деятельности, данная в определенных условиях и требующая для своего достижения использования адекватных этим условиям средств» (Там же, с. 144).

В психологии имеется синонимичное понятие «валентности». «Валентность — положительная или отрицательная ценность, значимость объекта, события или действия для субъекта, их мотивационная (побудительная) сила» (Там же, с. 60).

Во всех указанных определениях «значимость» связана с понятиями «субъект» и «цель деятельности». Это указывает на необходимость рассмотрения понятия «значимости» в контексте активного целенаправленного поведения.

Таким образом, здесь можно принять следующее определение понятия «субъективная значимость»: характеристика информации, показывающая отношение этой информации к достижению целей индивида.

Как следствие, можно предположить, что уровень значимости информации будет варьироваться в зависимости от текущего целеполагания индивида. Цели могут быть глобальными, затрагивающими долгосрочные личные интересы конкретного человека, и в этом случае можно говорить о личностной значимости информации. Локальные цели, определяемые временными текущими задачами, порождают ситуационную значимость информации.

Таким образом, варьирование задач в эксперименте может приводить к изменению субъективной значимости той или иной информации для человека.

Понятие «информация» в психологическом контексте, применяемом к диссертационной работе, относится как к воспринимаемым извне стимулам, так и к извлекаемым из памяти сведениям. В системной психофизиологии восприятие и память неразрывно связаны друг с другом, так как любое распознавание требует извлечения из памяти характеристик объектов. Б.Ф. Ломов отмечал, что «когда изучается, например, восприятие, то обнаруживается, что в принципе невозможно создать условия, которые позволяли бы отпрепарировать его от памяти, мышления, эмоций и т.д.» (Ломов, 1984, с. 75). В.Б. Швырков предлагал рассматривать восприятие как один из «аспектов» формируемого «целостного соотношения организма со средой» (Швырков, 2006, с. 447). Таким образом, можно заключить, что исследование субъективной значимости той или иной информации невозможно без учета механизмов памяти.

#### **1.1.4. Системогенез и научение**

Одной из ключевых концепций ТФС и системной психофизиологии, необходимых для исследования системных механизмов памяти, является *системогенез* (Анохин, 1975). В основе системогенеза лежит понятие *гетерохронии*. Гетерохрония — явление разного времени закладки отдельных

морфологических структур организма для того, чтобы обеспечить их созревание к моменту формирования функциональных систем, в которые они вовлекаются.

Изначально концепция системогенеза в ТФС была сформулирована по отношению к пренатальному и раннему постнатальному развитию организма. В дальнейшем в рамках системной психофизиологии было показано, что системогенез происходит не только на самых ранних периодах онтогенеза, но и у взрослых животных, и является универсальным механизмом формирования функциональной системы на всем протяжении индивидуального развития (Судаков, 1979; Швырков, 1978). На всех этапах развития формирование новых систем происходит за счет специализации нейронов относительно систем поведенческих актов в процессе научения.

В системной психофизиологии нейроны считаются не просто проводниками возбуждения, а активными агентами, реализующими свою генетическую программу и поддерживающими своё существование за счет веществ, получаемых ими из своей микросреды. Таким образом, нейрон существует как организм в организме, активно получая метаболиты от своего нейро-глиального окружения. В свою очередь, вновь сформированная система объединяет в себе и генетическую память нейронов, и память об условиях среды, в которых формировалась система (Швырков, 2006).

В рамках системной психофизиологии выявлена феноменология вовлечения новых нейронов во вновь формируемый поведенческий акт в самых разных областях мозга, включая первичные проекционные зоны (Александров, 1989). Указанный факт не противоречит известным из нейрофизиологии фактам специализации областей мозга, причем паттерны специализации (наборы специализаций и их процентное соотношение) оказываются разными в разных областях (см., например, Александров и др., 1999). Следовательно, системная психофизиология, говоря о целостности организма, не утрачивает структурную специфичность.

В системной психофизиологии признается существование количественных отличий между морфологическими структурами. Так как нейроны различных

структур мозга различаются по своим свойствам, связям с другими нейронами и способности включаться в новые системы, то возникает определенная морфологическая специфичность (по числу специализированных нейронов) отдельных структур мозга в обеспечении реализации поведенческих актов (Александров, 1989; Александров и др., 1997а; Александров и др., 1999; Александров и др., 2015; Gavrilov et al., 1998; Svarnik et al., 2003).

Для примирения подходов локализации и децентрализации еще в начале прошлого века К.С. Лешли было сформулировано представление, что «для объяснения этих фактов неправильно было бы решить вопрос или в пользу теории локализации, или в пользу теории децентрализации. Имеются факты в пользу обеих точек зрения, и всякая теория, претендующая на удовлетворительное разрешение вопроса, должна быть достаточно гибкой, чтобы объяснить все эти факты» (Лешли, 1933, с. 140).

Ключевой особенностью системно-эволюционного подхода является селекционный принцип специализации нейронов (Швырков, 2006; Shvyrkov, 1986). Суть этого принципа в том, что вначале формируется набор преспециализированных нейронов, обладающих определенными индивидуальными свойствами, уникальными связями с другими нейронами (но при этом проявляющими невысокую активность), а затем во время акта научения из этого набора отбираются те нейроны, которые встраиваются в систему, специализируются. Эти две группы нейронов соответствуют «первичному ассортименту» и «вторичному ассортименту» нейронов в селекционной модели Дж. Эдельмана (Edelman, 1987).

Высказываются предположения, что первичный ассортимент нейронов для специализации может пополняться в течение жизни за счет появления новых нервных клеток — нейрогенеза (Соколов, 2004). На это указывают работы ряда авторов (Пущина и др., 2016; Paton, Nottebohm, 1984; Kempermann et al., 1998; Xue, 1998; Shors et al., 2001; Carleton et al., 2003; Prickaerts et al., 2004; Brenowitz et al., 2024; Hussain et al., 2024).

Считается, что формирование новых систем происходит за счет добавления специализированных нейронов к уже существующим системам. При этом уже специализированные нейроны сохраняют свою специализацию (Горкин, 1988; Горкин, Шевченко, 1990). Это подтверждается работами ряда лабораторий (Schmidt et al., 1976; Thompson, Best, 1990; Wilson, McNaughton, 1993; Swadlow, Hicks, 1997; Williams et al., 1999; Greenberg, Wilson, 2004; Brecht et al., 2005; Chestek et al., 2007; Jackson et al., 2007; Fraser, Schwartz, 2012).

Сохранение специализации нейроном не означает его полную статичность. Еще И.П. Павлов считал, что новые условные рефлексы изменяют состояние имеющихся (Павлов, 1949). При надстраивании системы уже специализированные нейроны модифицируются для адаптации к новым нейронам (Александров, 1989; Alexandrov et al., 2001; Сварник и др., 2007; Горкин, 2011; Сварник, 2016; Горкин, 2021; Горкин, 2023). Число нейронов, в которых наблюдается экспрессия «ранних» генов, во много раз превышает число нейронов, приобретающих в поведении обнаруживаемую в эксперименте новую специализацию (Сварник, 2003). В системной психофизиологии этот процесс, помимо вовлечения новых нейронов, считается основой консолидации памяти (Созинов, Александров, 2022).

Таким образом, выделяют два типа механизмов, лежащих в основе научения: формирование новой системы и «аккомодационную» или «реорганизационную» реконсолидацию уже существующих систем (Александров, 2005; Alexandrov et al., 2001). Еще Ж. Пиаже указывал, что перестройка памяти может происходить как за счет ее рутинной реорганизации, так и за счет эвристического акта (Piaget, 1962).

«С системных позиций *формирование новой системы рассматривается как формирование нового элемента индивидуального (субъективного) опыта в процессе научения*» (Александров, 2011, с. 6). В системной психофизиологии под «элементом опыта» (системой) подразумевается компонент знания о взаимодействии индивида с миром, который фактически можно рассмотреть как необходимую составляющую единицы памяти. При актуализации элемента опыта

происходит комплексная активация большого числа анатомических структур, причем все эти элементы связаны между собой таким образом, чтобы обеспечить достижение результата системы.

В системной психофизиологии подчеркивается индивидуальное отношение субъекта к собственному опыту, так как любая система формируется для достижения какого-либо результата. Для обозначения информации, фиксированной в функциональных системах и межсистемных отношениях (Александров и др., 1997а; Alexandrov et al., 2000), предложено использовать такие термины, как «индивидуальный опыт» (Александров и др., 1997а), «индивидуальное знание» (Максимова и др., 1998; Александров И.О. и др., 1999), «жизненный опыт индивида» (Александров И.О., 2006, с. 162).

Опыт человека и животного формируется в процессе индивидуального развития в актах научения. Научение происходит в том случае, если невозможно удовлетворение потребностей индивида при помощи уже сформированной памяти. Предполагается, что на клеточном уровне начинается рассогласование метаболических потребностей клеток и метаболического притока. Это рассогласование может быть устранено, как было сказано выше, либо плавной реконсолидацией имеющихся систем (перестройкой межсистемных отношений), либо формированием нового элемента индивидуального опыта (Александров, 2011).

#### **1.1.5. Приобретение индивидуального опыта и дифференциация систем**

В системной психофизиологии проводится параллель между филогенетическим и онтогенетическим развитием. В обоих случаях процесс развития характеризуется нарастанием системной дифференциации. Ещё Ч. Дарвин рассматривал дифференциацию и специализацию частей организма в качестве критерия повышения организации живых существ при повышении разнообразия их отношений с силами окружающей среды (Дарвин, 2019).

В онтогенетическом развитии формирование новых элементов индивидуального опыта приводит к большей дифференцированности в

соотношении организма со средой (Александров, 1989; Чуприкова, 1997; Werner, Kaplan, 1956; Tononi, Edelman, 1998). При развитии ребенка обогащение его речи соответствует большей дифференцированности поведения (Кошелёв, 2009; Колбенева, 2013). По словам Е.А. Сергиенко, «весь ход развития ребёнка, в том числе и когнитивного, можно представить в виде циклов развития, направленных от недифференцированного к дифференцированному, от неспецифического к специфическому» (Сергиенко, 2006, с. 109).

Поведение и восприятие определяется степенью дифференцированности систем. Дифференциация систем определяет те свойства среды, которые индивид способен выделять в своем экологическом окружении (Гибсон, 1988; Швырков, 2006). В свою очередь, актуализация систем в поведении определяет разнообразие поведенческих актов.

Предполагается, что системы, формируемые на поздних этапах развития, обладают большей степенью дифференцированности, чем системы, сформированные на ранних этапах развития. При этом в поведении, осуществляемом при помощи «новых» систем, актуализируется большое число более «старых» систем и межсистемных отношений (Александров, Александрова, 2009). Таким образом, возможно изучение связи между историей формирования систем и характеристиками поведения и параметрами физиологической активности субъекта (Марченко, Безденежных, 2008; Колбенева, Александров, 2010; Колбенева, 2013; Александров и др., 2020; Савицкая и др., 2020; Kolbeneva, Alexandrov, 2016), включая регистрацию активности структур мозга (Александров и др., 1997б).

#### **1.1.6. Сознание, эмоции и дифференцированность систем (единая концепция сознания и эмоций)**

В различных психологических школах выдвигались предположения о тесной связи сознания и эмоций. Л.С. Выготский говорит о неразрывном синтезе интеллектуального и эмоционального процессов. В ходе развития происходит изменения соотношения этих процессов, эмоциональный процесс начинает играть

ведомую роль (Выготский, 1999). С.Л. Рубинштейн считал, что познавательные и эмоциональные процессы являются «зависимыми компонентами конкретной жизни и деятельности индивида, в которой в единстве и взаимопроникновении включены все стороны психики» (Рубинштейн, 2002, с. 514). Э. Даффи отмечала, что в континууме состояний сознания нет точки, в которой «неэмоциональное» состояние сознания переходит в «эмоциональное» (Бреслав, 2004).

Если рассмотреть определения понятия «эмоции» у ряда авторов, то можно выявить сходные черты. П.К. Анохин считал, что эмоции являются первичной оценкой афферентных сигналов в акцепторе результатов действия, сформированных в эволюции для устранения избытка или недостатка каких-либо факторов взаимодействия со средой (Анохин, 1978). В информационной теории эмоций П.В. Симонова выделяется отражательно-оценочная функция эмоций — как отражение мозгом человека и животных какой-либо актуальной потребности и возможности ее удовлетворения при помощи извлечения имеющейся в памяти информации (Симонов, 2021). Д. Дьюи считал, что эмоция возникает при рассогласовании плана действия с его реализацией (Бреслав, 2004). С. Шехтер считал, что основным фактором, определяющим свойства эмоций является интерпретация индивидом доступной информации о внешнем воздействии и о собственном состоянии (Бреслав, 2004). Р. Лазарус полагал, что эмоции включают в себя восприятие и оценку вредности или пользы (Бреслав, 2004).

В системной психофизиологии сформулирована единая концепция сознания и эмоций (Александров, 1995; Александров Ю.И., 2006; Alexandrov, 1999; Alexandrov, Sams, 2005). Ю.И. Александров определяет сознание следующим образом: *«сознание может быть сопоставлено с оценкой субъектом этапных и конечного результатов своего поведения, осуществляемой, соответственно, в процессе реализации поведения (как «внешнего», так и «внутреннего») и при его завершении»* (Александров, 2011, с. 15). Это определение фактически совпадает с определениями основы эмоций у различных авторов, которые приведены выше, что подчеркивает принципиальное единство природы этих явлений. При этом постулируется, что эмоции связаны с актуализацией низкодифференцированных

систем, сформированных преимущественно на ранних этапах развития, а сознание — это актуализация высокодифференцированных систем, сформированных на поздних этапах развития и обеспечивающих детальное взаимодействие организма со средой (Александров, 1995; Александров Ю.И., 2006).

Таким образом, за счет связи истории формирования систем и эмоций оказываются связанными исследования памяти и эмоций. Нарботанный в мире инструментарий исследования эмоций может быть использован для исследования структуры и истории формирования индивидуального опыта. Например, было установлено, что алкогольное подавление «новых» систем (Alexandrov et al., 1990a; Alexandrov L.I., Alexandrov Yu.I., 1993) вызывает эйфорию (Alexandrov et al., 1998) и статистически значимое повышение эмоциональности (Бодунов и др., 1997). Предполагается, что такое подавление высокодифференцированных систем смещает характеристики поведения от «сознательных» к «эмоциональным» (Александров, 2011).

В психологии описаны естественные механизмы смещения поведения в сторону более низких уровней развития в ситуации стресса, эмоциональности, называемые регрессией (Фресс, Пиаже, 1975). Предполагается, что такой возврат к менее дифференцированным формам поведения является не только механизмом адаптации к текущим условиям, но возможностью для появления нового знания: «регрессия, по существу, есть также основное условие творческого акта» (Юнг, 2000, с. 119). В системной психофизиологии считается, что регрессия обеспечивает ускоренное формирование новых элементов опыта (Александров, 2016; Александров и др., 2017; Alexandrov et al., 2020a; Alexandrov et al., 2020b).

### **1.1.7. Домены индивидуального опыта**

Прежде чем продолжить анализ вариантов применения системно-эволюционного подхода к исследованию памяти, требуется некоторый экскурс в историю различных классификаций памяти. Эти классификации основаны как на поведенческих экспериментах, так и на физиологических механизмах памяти.

Традиционные исследования памяти основываются на понятии «энграммы» или «следа», тем или иным образом фиксированном в нейрональном субстрате. Обсуждаются и исследуются вопросы об анатомических локализациях и способах хранения энграмм, кодирующих информацию разных видов.

Существуют различные классификации видов памяти. Ранние исследователи начали разделять память по временному свойству — на кратковременную и долговременную (Hebb, 1949; Weiskrantz, 1966). К настоящему времени существует большое число подходов к определению временных границ для этих видов памяти, но не выработано общепринятой системы (Данилова, 2004). За основу разделения памяти по временному признаку принимаются различные нейрональные механизмы.

В концепции активной памяти Т.Н. Греченко считается, что вся память является долговременной, но часть ее может становиться активной в определенных условиях. Только активные энграммы могут участвовать в обеспечении поведения. Активные энграммы существуют на уровне электрической активности нервных клеток (Греченко, Лебедев, 1997). Эта концепция сформирована на основе анализа исследований ретроградной амнезии кратковременной памяти, спонтанного восстановления памяти (Греченко, 1979), а также амнезии реактивированной долговременной памяти (Mactatus et al, 1979). Было предположено, что электрошоковое амнестическое воздействие нарушает только электрофизиологические механизмы, требуемые для воспроизведения энграммы, а после восстановления этих механизмов память также восстанавливается (Греченко, Лебедев, 1997).

Позже были обнаружены другие — не электрические, а молекулярные механизмы, — которые могут объяснить амнезию реактивированной долговременной памяти. Показано, что при реактивации долговременной памяти происходит локальная активация синтетазы оксида азота и нитрозилирование находящихся в синапсе белковых молекул оксидом азота (Balaban et al., 2014). После этого требуется процесс реконсолидации, восстановления связанных с памятью белковых молекул в синапсе, для восстановления долговременной

памяти. Если в это время произвести амнестическое воздействие, то произойдет амнезия реактивированной долговременной памяти.

Таким образом, постоянное уточнение молекулярных механизмов памяти обновляет представления о физиологической основе для классификации памяти по временному признаку.

Другие исследователи для энграмм, извлеченных из долговременной памяти, применяют термин «рабочая память» (Данилова, 2004). Термин же «кратковременная память» используется только для механизмов хранения вновь полученной информации. Предполагается, что функции рабочей памяти обеспечиваются преимущественно префронтальной корой, в которую энграммы переписываются из долговременной памяти, расположенной в нижневисочной и теменной коре (системы «Что» и «Где»), а также обратно (Данилова, 2004).

Затем появились классификации памяти по *типу* сохраняемой информации. В работах Л. Сквайра и Н. Коена была предложена широко используемая и принятая классификация типов памяти: декларативная (осознаваемые воспоминания) и процедурная (навыки) (Squire, Cohen, 1984). Э. Тульвинг разделил декларативную память на подтипы: эпизодическую и семантическую (Данилова, 2004).

Дальнейшее развитие классификации памяти по типу сохраняемой информации привело к появлению концепции доменно-специфичного хранения — более подробных механизмов для хранения различных категорий информации (Caramazza, Shelton, 1998; Diesendruck, Gelman, 1999; Lee, 2018). Причем в этих концепциях не отрицаются и доменно-неспецифичные механизмы, существующие параллельно (Camos, 2017; Izmalkova et al., 2022; Martin et al., 2020; Tian et al., 2022). Выделяют визуальные, семантические, орфографические, фонетические домены; домены слов, обозначающих живых существ и неживые объекты; числа, пространство; домен приближения и домен избегания и т.д. В настоящее время это направление активно развивается, однако нет универсальной общепринятой системы категоризации доменов памяти.

Обращаясь к системной психофизиологии, следует повторить, что в ней под памятью понимается индивидуальный опыт индивида, фиксированный в функциональных системах и их взаимодействиях. При этом в системной психофизиологии также развивается концепция доменов как способ классификации памяти. Домены индивидуального опыта — «наборы систем, объединенных общностью результатов» (Созинов, Александров, 2022, с. 177). При таком рассмотрении системной организации происходит переход от анализа нейронального состава актуализируемой системы к анализу набора систем, актуализируемых при реализации поведенческого акта (включая мыслительные операции). Концепция доменов может дать новые способы объяснения экспериментальных результатов, связанных с активностью нейронов в различных задачах. Например, предполагается, что соотношение активности корковых и подкорковых структур мозга при актуализации различных доменов будет выявлять различия структуры этих доменов и историю их формирования.

Среди основных доменов, формируемых уже на ранних стадиях онтогенеза, выделяют два: домен приближения и домен избегания (approach — withdrawal, см. рисунок 1.1) (Анохин, 1978; Швырков, 1984; Александров, 1995; Schneirla, 1959; Zajonc, 1980; Davidson et al., 1990; Berntson et al., 1993; Alexandrov, 1999; Panksepp, 2000).

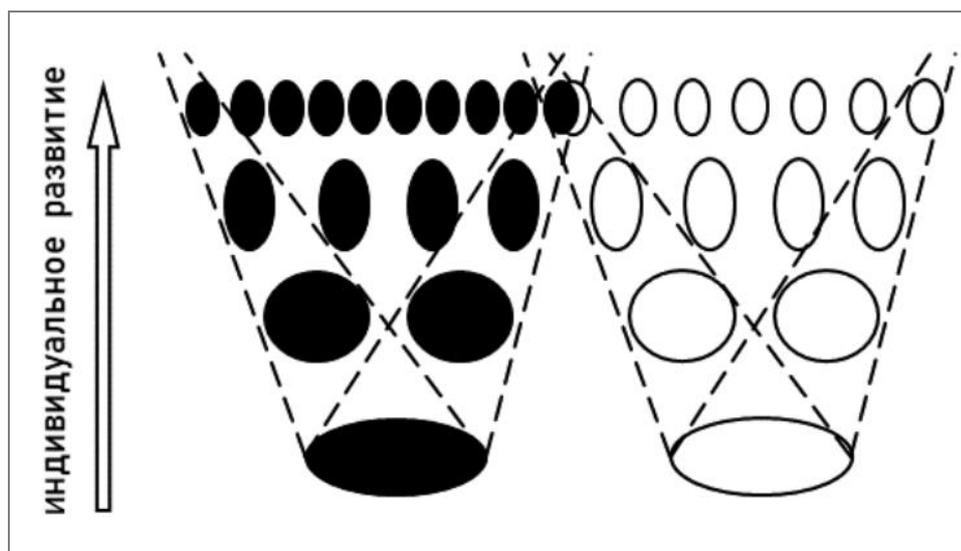


Рисунок 1.1 — Иллюстрация доменов избегания и приближения (рисунок из публикации А.А. Созинова и Ю.И. Александрова, адаптирован, — Созинов, Александров, 2022). «Большие овалы внизу обозначают системы наименьшей дифференциации, обеспечивающие реализацию поведенческих актов приближения (... положительные эмоции, белые овалы) и избегания (... отрицательные эмоции, черные овалы) на самом раннем этапе онтогенеза. Пунктирные линии отграничивают наборы систем разного возраста и дифференциации, одновременная актуализация которых обеспечивает достижение результатов поведенческих актов, соответствующих тому или иному набору» (Там же, с. 172)

Существует ряд экспериментальных свидетельств в пользу того, что домен избегания, ассоциируемый с отрицательными эмоциями, более дифференцирован, чем домен приближения, связанный с положительными эмоциями. Например, негативные визуальные стимулы воспринимаются как более сложные, чем позитивные (Peeters, Czapinski, 1990). Воспоминания о негативных событиях более детализированы, чем воспоминания о позитивных событиях (Kensinger, 2009). Действия в отрицательном эмоциональном состоянии характеризуются большей сосредоточенностью, чем в положительном состоянии (Peeters, Czapinski, 1990; Schwarz, 1990; Erk et al., 2005).

Указанные поведенческие различия доменов позволяют предположить, что домен избегания содержит больше систем, связанных с большим числом специализированных нейронов, и его актуализация связана с большей суммарной нейрональной активностью.

Действительно, было показано, что характеристики активаций нейронов соматосенсорной коры и состав нейронов зависят от того, в каком поведении происходит стимуляция — в поведении приближения или избегания (Александров, 1995). Амплитуда компонентов N100 связанных с событиями потенциалов мозга в слуховой коре человека была достоверно больше в поведении избегания, чем в поведении приближения, при категоризации слов (Alexandrov et al., 2007). Вспышка света вызывает в первичной зрительной коре мозга животных активацию большего числа нейронов, если животному требуется реализовать поведение избегания, чем в случае поведения приближения (к пищевому объекту) (Shvyrkova, Shvyrkov, 1975).

Большая дифференцированность домена избегания не вызывает удивления, так как поведение избегания требует более детального анализа среды, чем поведение приближения (Alexandrov L.I., Alexandrov Yu.I., 1993; Khayutin et al., 1997). Отрицательные эмоции, по мнению некоторых авторов, требуют более сильного изменения поведения, чем положительные эмоции (Baumeister et al., 2001).

Тем не менее, остаются определенные неясности и экспериментальные противоречия при рассмотрении «вертикальной» структуры доменов (рисунок 1.1), связанной с историей их формирования — онтогенетического «возраста» систем, фиксирующих индивидуальный опыт взаимодействия организма со средой. Этот вопрос подробнее разбирается в следующем разделе.

## **1.2. Исследования актуализации индивидуального опыта разного онтогенетического возраста и разной сложности**

Т.Н. Греченко отмечает, что механизмы воспроизведения памяти исследованы менее детально, чем механизмы запоминания (Греченко и др., 2023). Это указывает на необходимость развития инструментальных и методических средств исследования актуализации памяти, в том числе различающейся по времени своего формирования в онтогенезе.

Вначале следует кратко описать способы исследования актуализации индивидуального опыта (воспроизведения памяти) вне рамок системной психофизиологии.

Одним из способов индуцирования контролируемой актуализации памяти в эксперименте является предъявление слов (Hauk et al., 2004; Galese, Lakoff, 2005; Pulvermüller, 2005; Alexopoulos, Ric, 2007). Согласно У. Матуране, язык не передает совершенно новую информацию, а предназначен для ориентации человека в его собственном уже сложившемся когнитивном пространстве (Матурана, 1996).

Представления о процессах, происходящих при актуализации памяти, существенно различаются у различных групп исследователей. В когнитивной психологии существуют различные подходы к пониманию того, какова природа репрезентаций (нейрональных моделей мира), лежащих в основе мышления и памяти (Величковский, 2006; Ребеко, 1998), и выделяется два направления со своей экспериментальной базой и аргументацией: модальный и амодальный подходы.

Амодальный подход предполагает, что сенсорные сигналы преобразуются в абстрактный набор признаков, пропозиций, составляющих репрезентацию (Pylyshyn, 2002). В памяти сохраняются абстрактные интерпретации, а не образы стимулов (Чуприкова, 1997). Приводятся экспериментальные свидетельства того, что когнитивные процессы осуществляются с использованием этих абстрактных признаков без реконструкции сенсорного образа (Friedman, 1978).

В модальном подходе предполагается, что репрезентации изоморфны объектам физического мира (Kosslyn, 2005). В процессе извлечения из памяти и мышления происходит реконструкция или реактивация сенсорно-двигательных состояний, сформированных в ходе восприятия (Barsalou et al., 2003). Причем эту реактивацию можно вызвать с помощью предъявления слов. В настоящее время существует достаточно большое количество экспериментальных данных об активации определенных участков проекционных зон коры головного мозга при предъявлении слов, обозначающих действия с определенными частями тела

(Pulvermüller, 2005). Одним из возможных механизмов, объединяющих реальные и воображаемые действия, называются «зеркальные» нейроны (Rizzolatti, Craighero, 2004), активирующиеся при наблюдении и воображении действий.

Развитие модального подхода выражается в теориях «эмбодимента» (embodiment, theories of embodied cognition), которые предполагают не только реактивацию памяти, связанной с анализом сенсорных сигналов, но и использование тела в когнитивных процессах (Niedenthal, 2007). Например, было показано появление лицевой экспрессии при категоризации прилагательных, обозначающих эмоции (см. там же). При воображении упражнений для ног учащается дыхание и увеличивается частота сердечных сокращений, как и при реальном выполнении упражнений (Jeannerod, Decety, 1995).

В системной психофизиологии предполагается, что субъективный опыт составляют системы — модели целостных взаимодействий индивида со средой. Актуализация этих моделей в эксперименте возможна при взаимодействии со средой, наблюдении за взаимодействием, а также, как уже было сказано выше, при предъявлении и использовании слов, связанных с соответствующим взаимодействием.

Для исследования индивидуального опыта различного «возраста» и различной сложности (дифференцированности) предложено использовать экспериментальные задачи со словами, относящимися к доменам опыта, связанного с поведением различной дифференцированности. В частности, исследовались домены избегания и приближения, рассмотренные в предыдущем разделе, а также другие способы категоризации слов. В качестве измеряемых параметров использовались: время отчетного действия, активность структур мозга по данным ЭЭГ, ПЭТ и фМРТ, периферические сигналы, такие как КГР. Проведено достаточно большое число подобных исследований, результаты которых в части случаев противоречат друг другу.

Было показано, что время оценки прилагательных, связанных с доменом избегания, больше, чем связанных с доменом приближения (Kolbeneva, 2008). Для неприятных слов время отчетного действия было больше, чем для приятных

(Марченко, Безденежных, 2008). Исходя из этого, а также учитывая аргументы и нейрофизиологические экспериментальные данные, приведенные в предыдущем разделе, делается вывод о большей дифференцированности домена избегания и прямой связи между дифференцированностью и временем ответа.

На то, что операции с опытом, принадлежащим к более дифференцированным доменам, требуют большего времени для выполнения категоризации, указывают также данные исследования доменов другого типа — сравнивались домены слов, обозначающих живых существ и неживые объекты. Было показано большее время отчетного действия для слов домена неживых объектов (Марченко, Безденежных, 2008). Учитывая, что в языке к домену неживых объектов принадлежит больше слов, а также принимая во внимание данные о меньшем объеме биологического знания (и связанных с ним слов) в современных городских культурах по сравнению с периодом столетия назад (Wolff et al., 1999), делается вывод о большей дифференцированности домена неживых объектов и о прямой связи между дифференцированностью и временем ответа.

М.Г. Колбенева проводилось психофизиологическое исследование категоризации людьми прилагательных, относящихся к разным модальностям (Колбенева, 2013). В основе работы лежало основанное на эмпирическом материале представление о более раннем онтогенетическом развитии кожных ощущений, обоняния и вкуса по сравнению со зрением и слухом (Gottlieb, 1971; Lickliter, Bahrick, 2000); психолингвистические данные о большем числе слов для зрительной и слуховой модальности по сравнению с остальными (Колбенева, Александров, 2010; Wilson, 1998; Chernigovskaya, Arshavsky, 2003); а также психофизиологические данные о большей анатомической и поведенческой дифференцированности зрения, осязания и слуха по сравнению со вкусовыми и обонятельными ощущениями (Сеченов, 2011). Было показано большее время категоризации прилагательных, связанных со зрением и слухом, по сравнению с прилагательными, связанными с обонянием и вкусом, а также большее время категоризации слов, усвоенных позже, т.е. имеющих больший «возраст

понимания» («age of acquisition» — Walley, Metsala, 1992) в онтогенезе (Колбенева, Александров, 2010; Колбенева, 2013; Kolbeneva, Alexandrov, 2016). То есть также наблюдалась *прямая* связь между дифференцированностью и латентностью ответа.

В этом же исследовании измерялась эмоциональность предъявляемых слов, и была показана *обратная* связь между дифференцированностью и эмоциональностью (то есть нейтральные стимулы показали большее время отчетного действия по сравнению с эмоциональными). Авторы связывают большую дифференцированность и меньшую эмоциональность с системами зрения и слуха (развиваются позднее в онтогенезе) по сравнению с обонянием и вкусом (развиваются раньше в онтогенезе). Эти выводы находятся в согласии с единой концепцией сознания и эмоций, описанной выше.

Однако в работах зарубежных авторов при измерении времени отчетного действия в схожих задачах встречаются противоречивые данные. С одной стороны, в работе М. Виникайна при оценке эмоциональных изображений получены аналогичные приведенным выше результаты — время отчетного действия при оценке нейтральных изображений больше, чем эмоциональных (Vinikainen et al. 2010). С другой стороны, встречаются работы, в которых получены прямо противоположные результаты. Например, в работе Д. Фарроу с соавторами оценка звуков, изображений и предложений потребовала больше времени в случае угрожающей коннотации по сравнению с нейтральной (см. рисунок 1.2) (Farrow et al., 2013).

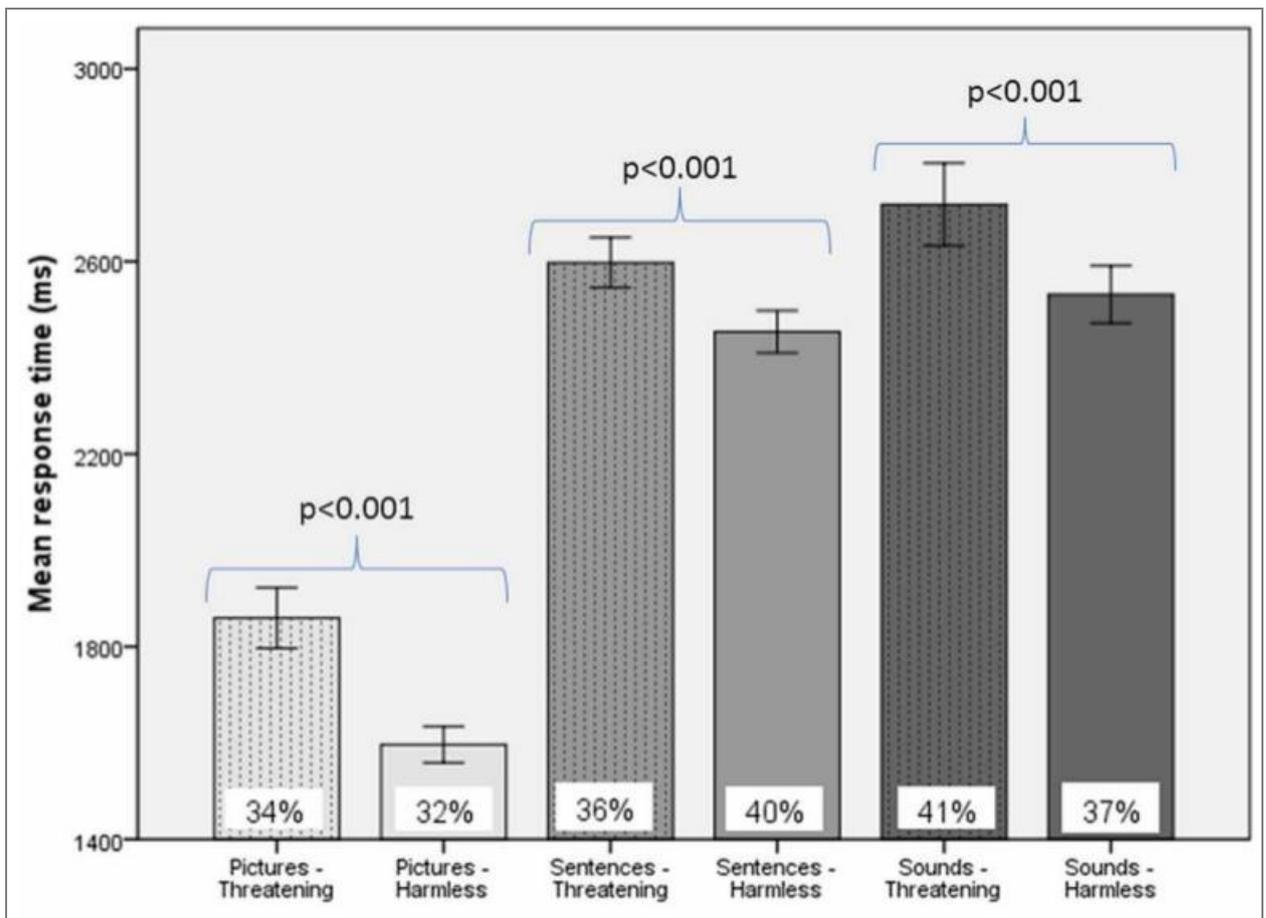


Рисунок 1.2 — Время оценки угрожающих и нейтральных изображений, предложений и звуков (рисунок из публикации Farrow et al., 2013)

Более того, в работе ряда авторов (Canli et al., 1998; Estes, Verges, 2008) встречаются противоположные результаты по времени отчетного действия в одном и том же исследовании (т.е. с одним стимульным материалом) при изменении экспериментальной задачи (см. рисунок 1.3). Чтобы снизить «эффект стратегий, целей и стимульного материала» на результаты исследований «нейронных механизмов эмоциональной регуляции» путем обобщения данных, был выполнен мета-анализ (Morawetz et al., 2017). Подобные результаты подчеркивают справедливость указанного выше тезиса (см. раздел 1.1.3) о том, что варьирование экспериментальной задачи может приводить к изменению цели, достигаемой участником, субъективной значимости той или иной информации для человека и к существенному изменению поведения и физиологических сигналов при выполнении задачи.

Данные по времени отчетного действия позволяют предположить, что и физиологические процессы, включая активность структур мозга, могут существенным образом зависеть от инструкции участнику эксперимента и его понимания задачи, вплоть до инверсии выявленных закономерностей.

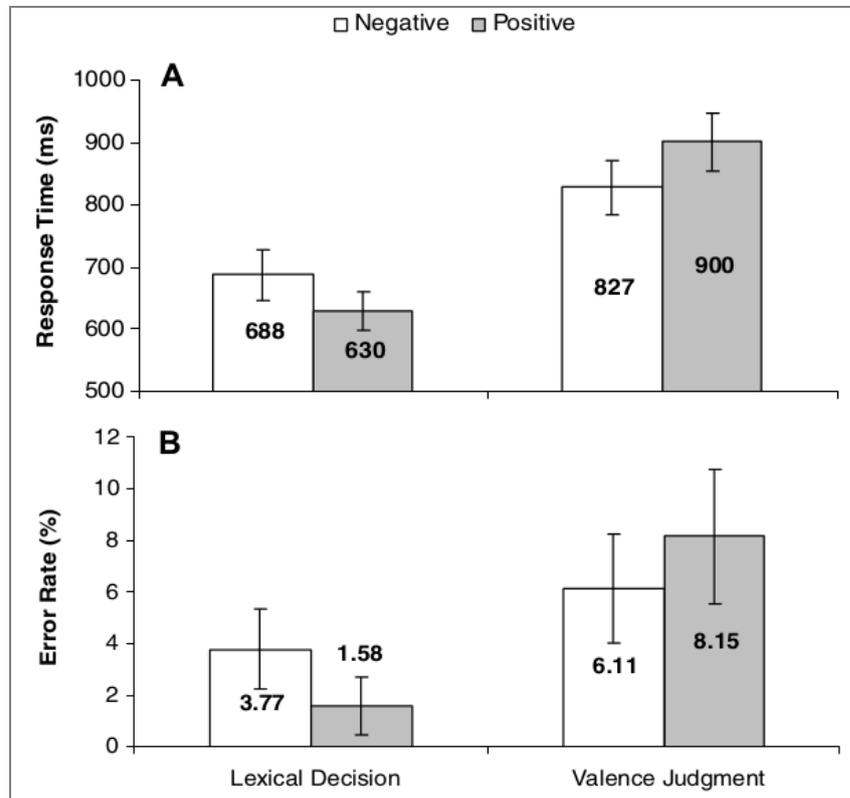


Рисунок 1.3 — Изменение времени оценки угрожающих и нейтральных изображений, предложений и звуков при изменении задачи для участника эксперимента (рисунок из публикации Estes, Verges, 2008)

В этой же серии исследований (Колбенева, Александров, 2010; Колбенева, 2013; Kolbeneva, Alexandrov, 2016) оценивался сигнал КГР и время категоризации прилагательных в связи с их валентностью. Вначале была установлена прямая связь величины КГР с интенсивностью приятных и неприятных переживаний, что согласуется с данными других исследователей, показавших связь КГР с эраузalom, но не с валентностью эмоций (Winton et al., 1984; Lang et al., 1993; Bensafi et al., 2002; Khalfa et al., 2002). Более детальный анализ позволил выявить большую амплитуду КГР в связи с неприятными эмоциями по сравнению с приятными. Такой эффект также был обнаружен рядом

авторов (Букзайн, 1994; Levenson et al., 1990; Robin, 1999; Baumeister et al., 2001; Eilola, Havelka, 2011). Однако в соответствии с изначальной логикой исследования возникает противоречие между указанными показателями: параметры сигнала КГР указывают на большую эмоциональность негативных эмоций, а параметр времени категоризации указывает на меньшую эмоциональность негативных эмоций (так как время категоризации больше для негативных эмоций по сравнению с позитивными).

Можно предположить, что существует более комплексная, многомерная связь между параметрами КГР, временем категоризации, интенсивностью эмоций, дифференциацией систем, возрастом систем, валентностью актуализируемого домена и другими параметрами.

Как уже предполагалось в предыдущем разделе, рано формируемый в онтогенезе домен систем может пополняться новыми системами, но при этом содержать и старые, ранее сформированные низкодифференцированные системы. Поэтому физиологическая картина при актуализации такого домена может сильно зависеть от множества параметров, определяющих состояние участника эксперимента, включая мотивацию (Alexandrov, Sams, 2005). Такое предположение согласуется с представлениями исследователей о развитии значения слова в онтогенезе: от аффективного до системы сложных связей (Лурия, 1979), от врожденного базового концепта до инструмента коммуникации (Вежбицкая, 1999; Сергиенко, 1998). При этом в соответствии с концепцией о неизменности специализации нейронов, принятой в системной психофизиологии, рано формируемые домены должны содержать в своем составе и низкодифференцированные системы, особенно сильно проявляющиеся в состоянии аффективной регрессии, и высокодифференцированные, добавленные в процессе развития.

Для объяснения возможных противоречий в работе Ю.И. Александрова и М.Е. Самса интенсивность эмоций рассматривается не только в связи с дифференцированностью систем, но и с учетом других факторов, таких как уровень мотивации, с которым может быть связана степень активации систем

(Alexandrov, Sams, 2005). Таким же образом можно объяснить различия в физиологической активности при реализации одного и того же поведения. Например, было показано изменение частоты потенциалов действия (характеризующей уровень активности) отдельного нейрона в связи с изменением потребности организма в определенных питательных веществах (солей натрия и пищи) — см. рисунок 1.4 (Kendrick, Baldwin, 1989).

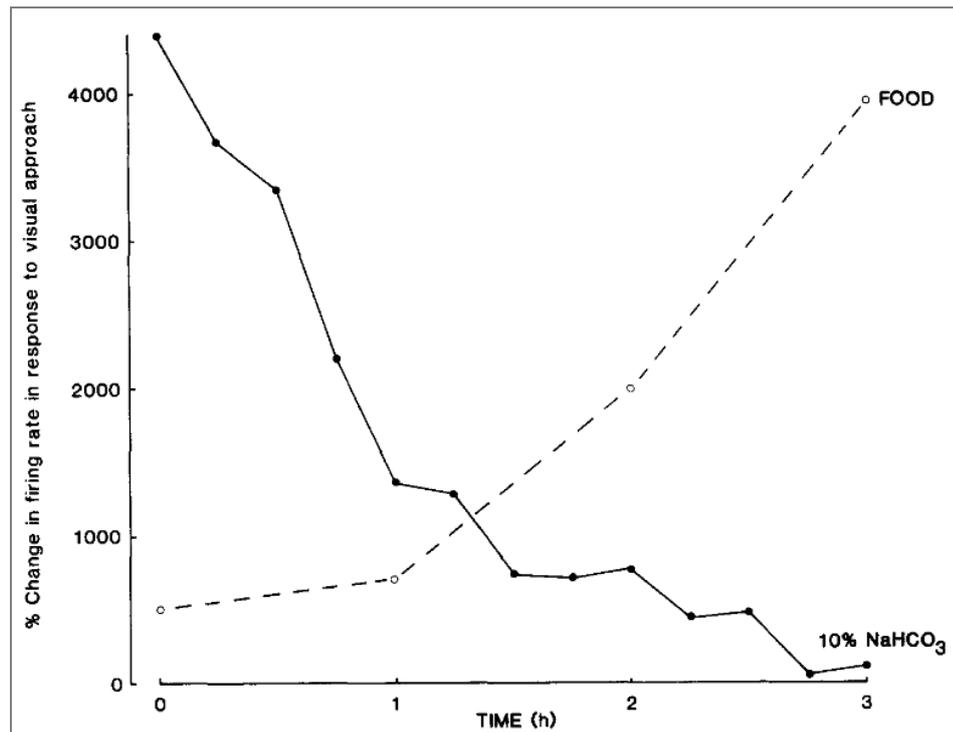


Рисунок 1.4 — Активность отдельного нейрона при предъявлении животному пищи и источника солей натрия, зарегистрированная у овец. Со временем животному предоставлялась возможность восполнить запасы натрия в организме, в результате чего снижалась значимость натрия и возрастала значимость пищи, что отразилось в активности нейрона (рисунок из публикации Kendrick, Baldwin, 1989)

Так как все системы по определению предназначены для достижения целей, можно предположить, что структура актуализируемого домена будет зависеть не только от содержания предъявляемой фразы, но и от текущих целей индивида, и от того, как предъявляемая фраза с ними соотносится. Как уже говорилось выше в определении субъективной значимости, связь информации с целями индивида определяет уровень субъективной значимости этой информации. Такая связь должна модулировать свойства (включая набор, число и степень актуализации

вовлекаемых систем) вовлеченного домена. Из этого следует, что с уровнем субъективной значимости можно сопоставить размер вовлеченного домена субъективного опыта (число систем, число принадлежащих к ним нейронов, а также степень активированности этих нейронов), что должно отражаться в увеличении выраженности активности структур головного мозга и прямой корреляции этой активности с КГР при увеличении уровня субъективной значимости актуализируемой информации. В связи с этим в модели ожидаемой активности структур мозга можно увеличить количество факторов, которые определяют уровень активности в экспериментальных задачах, добавив субъективную значимость стимулов (см. рисунок 1.5).

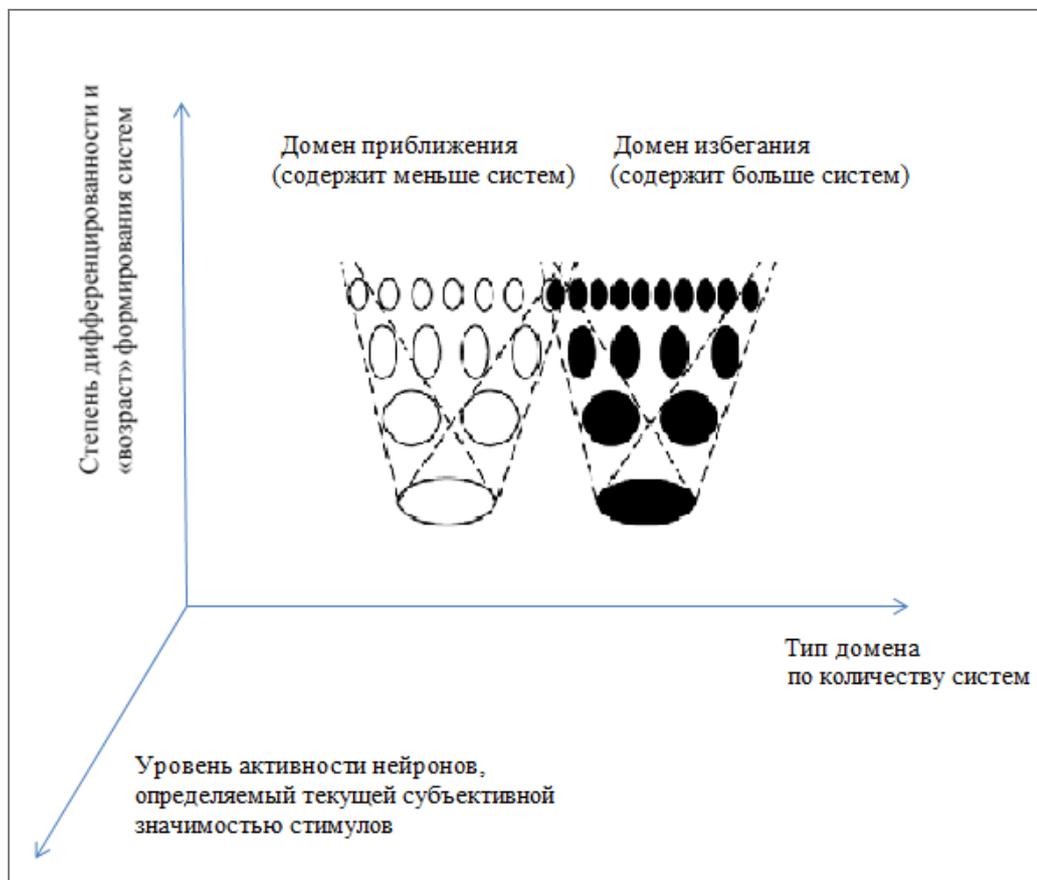


Рисунок 1.5 — Гипотетическое обобщение некоторых возможных факторов, определяющих уровень суммарной нейрональной активности в эксперименте

В приведенных выше определениях понятий «эмоции», «сознание» и «субъективная значимость», сформулированных различными авторами (см. разделы 1.1.3 и 1.1.6), имеется определенное сходство. Все они, так или иначе,

связаны с «оценкой субъектом [достигнутых] этапных и конечного результатов своего поведения» (Александров, 2011, с. 15), либо с соответствием или рассогласованием между запланированными и реально полученными параметрами этих результатов. Различия между сознанием и эмоциями в единой концепции сознания и эмоций определяются в значительной степени как количественные. В этой концепции различия этих понятий связаны с филогенетическим и онтогенетическим возрастом и степенью дифференциации соответствующих систем. В свою очередь, субъективная значимость была выше технически определена как характеристика информации, показывающая отношение этой информации к достижению целей индивида. Таким образом, для разграничения понятий «эмоции», «сознание» и «субъективная значимость» становится актуальной психофизиологическая задача выявления не просто наличия связей, а количественных соотношений активности структур мозга и других физиологических параметров при воспроизведении памяти различного онтогенетического возраста.

В процитированных выше работах по классификации изображений авторы в своих выводах сосредоточиваются на свойствах предъявляемых участнику эксперимента изображений. Но если посмотреть на экспериментальную ситуацию с точки зрения участника эксперимента, то субъективно значимым для него является выполнение экспериментальной задачи (то есть классификация изображений), а не переживание эмоций, связанных с изображениями. В свою очередь, классификация нейтральных стимулов может оказаться когнитивно более сложной и ресурсоемкой задачей, чем классификация эмоциональных стимулов. В результате физиологическая активность, связанная с классификацией нейтральных стимулов, по некоторым параметрам может иметь картину, свойственную эмоциональным стимулам. В результате становится затруднительно определить психофизиологические закономерности, связанные с изучаемыми факторами (в данном случае эмоциями).

Например, увеличение электрической проводимости кожи (в данной работе обозначается как КГР), как уже было отмечено, нередко связывают с

интенсивностью эмоций (Winton et al., 1984). Однако не во всех исследованиях эта закономерность воспроизводится (Harris et al., 2003; Farrow et al., 2013; Pavlenko, 2013). Можно предположить, что увеличение КГР связано не с эмоциональностью предъявляемых стимулов как таковой, а с субъективной значимостью их для участника эксперимента в контексте выполняемой им задачи (подразумевая, очевидно, что эти понятия, хотя и схожи, имеют определенные различия).

Более детально исследовать активность мозга с хорошим пространственным разрешением позволяет технология фМРТ. Интересной особенностью фМРТ является то, что временные характеристики фМРТ-сигнала примерно соответствуют свойствам физиологических сигналов, регистрируемых с помощью полиграфа (общая длительность нарастания и спада примерно 10 с). Это позволяет применить технологию ИПП, предназначенную для диагностики субъективной значимости стимулов (см. раздел 1.3 далее), в комплексном фМРТ-МРТсП исследовании.

Известны работы по исследованию актуализации воспоминаний с помощью фМРТ. Например, в одной из работ предъявляли имена известных и неизвестных людей, которые жили в разные эпохи (Douville et al., 2005). Была обнаружена большая активность гиппокампа и парагиппокампальной извилины при предъявлении имен известных людей. Однако разница в сигнале по фактору времени жизни этих людей (эпохе, в которой они жили) проявилась только в небольшом изменении формы сигнала в правом гиппокампе и парагиппокампальной извилине. Другие структуры мозга при этом не анализировались.

В другой работе исследовалось воспроизведение эпизодической автобиографической памяти по пяти интервалам жизни участника эксперимента (Viard et al., 2007). Возраст участников эксперимента составлял в среднем 67 лет. Им предъявляли подсказки о событиях их жизни, полученные от родственников, и просили вспомнить соответствующие эпизоды жизни. Во время этих воспоминаний была обнаружена активация левой верхней лобной извилины,

предклинной коры, задней цингулярной коры, язычной извилины (левых и правых), левой угловой извилины и левого гиппокампа. При этом различия в активности мозга между интервалами жизни оказались невелики — активность только правого гиппокампа была несколько больше для средних интервалов жизни, при этом альтернативные способы обработки данных показали активность гиппокампа для всех эпизодов.

В публикации (Smith, Squire, 2009) использовался тест, в котором участников эксперимента просили отвечать на вопросы о новостных событиях за последние 30 лет. Было показано уменьшение вовлеченности левого гиппокампа, левой амигдалы и некоторой части правой лобно-височной области при актуализации воспоминаний с давностью более 5 лет (см. рисунок 1.6).

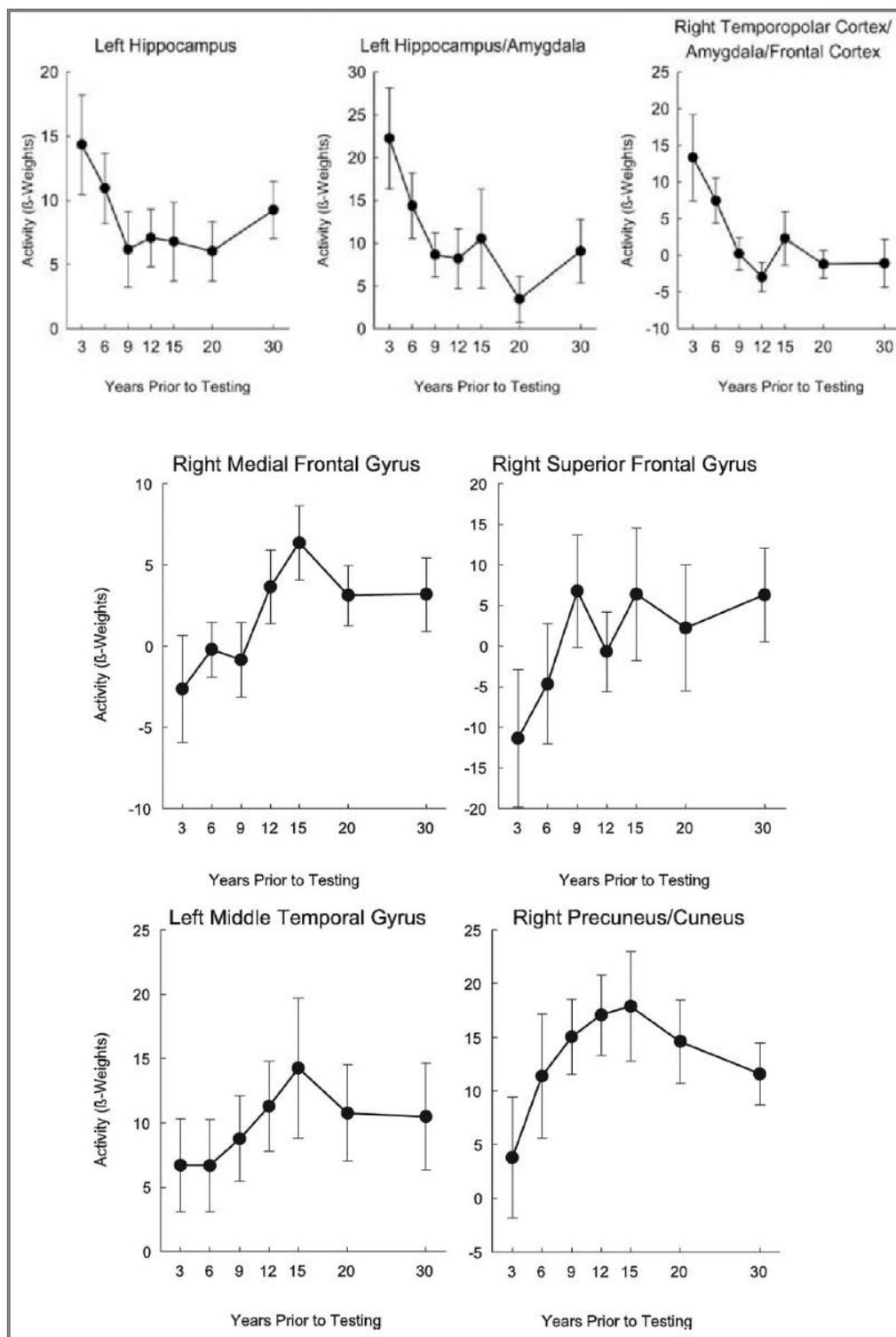


Рисунок 1.6 — Активность структур мозга при воспоминании информации о новостных событиях за последние 30 лет (рисунок из публикации Smith, Squire, 2009)

Наоборот, в структурах правой лобной доли, левой височной коры и париетальной коры активность увеличивалась с давностью воспоминаний. Из более ранней публикации (Bailey et al., 2006) авторам было известно, что у людей с поражением гиппокампа затруднено воспоминание информации о событиях,

случившихся в период последних 5 лет, и эти данные хорошо согласуются с полученными авторами закономерностями активности гиппокампа по фМРТ (рисунок 1.6 выше). В более ранних работах была обнаружена сходная закономерность в менее детализированном виде — уменьшение активности гиппокампа и увеличение активности неокортекса по мере увеличения давности воспоминаний (Bontempi et al., 1999; Frankland et al., 2004; Maviel et al., 2004; Takashima et al., 2006).

Процитированные исследования актуализации памяти с помощью фМРТ показывают изменение соотношения активности гиппокампа и ассоциативных областей неокортекса (лобных отделов коры, цингулярной коры, височной коры, угловой и язычковой извилины и т.д.). Такая феноменология относится к достаточно давно известному явлению переноса (или по некоторым данным параллельного формирования) памяти в гиппокампе и неокортексе с последующим переносом ведущей роли в неокортекс. Тем не менее, данные пока недостаточно систематизированы и воспроизводимы, чтобы можно было построить обобщенные количественные модели активности мозга, соотносящие воспоминания различной эмоциональной насыщенности, знака эмоций, субъективной значимости и времени приобретения материала памяти.

### **1.2.1. Межполушарная асимметрия**

Остается недостаточно хорошо изученным вопрос межполушарной асимметрии при актуализации памяти по данным фМРТ: среди имеющиеся результатов в сходных задачах обнаруживается преимущественная активность как левосторонних, так и правосторонних структур, а также и их одновременная активность (см. предыдущий раздел). Требуется разработать более аккуратные критерии межполушарной асимметрии при актуализации памяти, определяемые по данным фМРТ и основанные на прямом статистическом сравнении левых и правых анатомических структур, а не на подсчете числа структур, прошедших порог статистической значимости.

Анализ межполушарной асимметрии при актуализации памяти может оказаться информативным по ряду причин.

Во-первых, имеются данные многих авторов о функциональной межполушарной асимметрии, обобщенные, в частности, П.В. Симоновым в связи с большей «эмоциональностью» правого полушария по сравнению с левым (Симонов, 1987). При этом было отмечено, что такая специализация может являться примером «вторичности эмоциональной специализации полушарий» (Там же, с. 92), а основная причина, по мнению П.В. Симонова, заключается в межполушарных различиях протекания информационных процессов (Там же), что требует более детального изучения в связи с процессами актуализации памяти. М.Н. Русалова в своем обзоре работ отмечает, что «ряд исследователей акцентируют внимание на причастности передних отделов мозга в генерации эмоций, при этом обнаруживают фронтальные асимметрии для эмоций различного знака» (Русалова, 2004, с. 466). В ряде обзоров под данной теме приведены и другие функциональные асимметрии, связанные практически со всеми психическими функциями в их классическом понимании — речью, восприятием, мышлением, памятью и т.д. (см., например, Бианки, 1985; Сергиенко, Дозорцева, 2004). По мнению многих авторов, «между полушариями существует не жесткая дихотомия, а скорее континуум функций» (Бианки, 1985, с. 11). Отмечается, что специализации полушарий могут меняться в онтогенезе, адаптируясь к локальным повреждениям мозга, вплоть до замещения функций противоположным полушарием в раннем возрасте (Сергиенко, Дозорцева, 2004).

Во-вторых, имеются сведения о гетерохронности созревания левого и правого полушарий (с более ранним созреванием правого полушария) (Марютина, Ермолаев, 2001; Ротенберг, 2009; Strauss et al., 1983), что является важной характеристикой системогенеза в рамках системной психофизиологии, указывая на большее отношение правого полушария к менее дифференцированным систем.

В-третьих, ряд авторов прямо связывают левое и правое полушария с различиями по возрасту сохраняемой информации. Левое полушарие головного мозга связывают с запоминанием новой информации (особенно семантической)

(Доброхотова, Брагина, 2004), а правое — с более онтогенетически старой, в том числе автобиографической памятью (Александров С.Г., 2014).

В обзоре М.Н. Русаловой со ссылкой на экспериментальные работы отмечается, что указанные выше асимметрии проявляются, в частности, в том, что «при положительных эмоциях в большей степени активируются левые, а при негативных — правые лобные области коры» (Русалова, 2004, с. 466). Возвращаясь к описанному выше понятию доменов приближения (положительные эмоции) и избегания (отрицательные эмоции) с точки зрения системной психофизиологии, можно заметить некоторое противоречие с приведенным утверждением. Выше приводились эмпирические данные в пользу того, что домен избегания является более дифференцированным, чем домен приближения (см. раздел 1.1.7). В соответствии с изложенными выше положениями системной психофизиологии, можно предположить, что более дифференцированный домен избегания формируется в онтогенезе позже, чем домен приближения. Соответственно, тогда домен избегания должен иметь основное представительство в левом полушарии, а это противоречит высказываниям (основанным также на экспериментальных результатах) о том, что с левым полушарием ассоциируются положительные эмоции, то есть домен приближения (Симонов, 2004). По мнению П.В. Симонова, «поскольку имеются основания считать, что положительные эмоции возникали в процессе эволюции позднее, чем отрицательные, их преимущественная локализация в левом полушарии выглядит закономерной» (Симонов, 2004, с. 462). Той же последовательности, по мнению Е.А. Сергиенко, следует онтогенетическое развитие (Сергиенко, 2006) — что положительные эмоции формируются у человека позже отрицательных. Приведенные утверждения находятся в противоречии с представлениями системной психофизиологии не только в отношении последовательности развития доменов приближения и избегания, но и в плане рассмотренной выше (см. раздел 1.1.6) интерпретации эмоций как оценки достижения результата — организм не может существовать и эволюционировать

без достижения результатов, то есть без появления положительных эмоций в той или иной форме.

Указанные противоречия свидетельствуют о недостаточной разработанности проблемы в рамках единой методологической парадигмы, а смешивание результатов, полученных в различных школах, с неизбежностью приводит к эклектике вплоть до несопоставимости экспериментальных данных. Не претендуя на решение этой достаточно глубокой проблемы, можно рассмотреть несколько возможных вариантов устранения противоречий.

Во-первых, следует более детально проанализировать экспериментальные методы, так как они, как уже было показано выше, принципиальным образом определяют полученные результаты, вплоть до знака зависимости. Например, П.В. Симонов приводит экспериментальные несостыковки, заключающиеся в том, что «мотивационные состояния голода и жажды, которые трудно отнести к классу положительных эмоций, также преимущественно сказываются на электрической активности левого полушария и у человека ..., и у животных» (Симонов, 2004, с. 463). Эти данные можно объяснить тем, что состояния голода и жажды, хотя и не являются приятными эмоциями, могут быть отнесены, скорее, к домену приближения, поиска воды и пищи, чем к домену избегания опасности. По заключению М.Н. Русаловой, «эмоции, независимо от их знака, могут генерироваться в обоих полушариях мозга, а разнородность данных может быть обусловлена различиями методических приемов, разной интенсивностью исследуемых эмоций, индивидуальными особенностями исследуемых лиц, а также тем что разные авторы изучали эмоции не только разного знака, но и разного класса» (Русалова, 2004, с. 472).

Во-вторых, доменные категории избегания и приближения могут содержать в себе более сложные конструкты, которые формируются на разных этапах развития, включая самые ранние, и по-разному проявляются в поведении. В результате исследователи могут иметь разное мнение по поводу того, в какой последовательности эмоции развиваются в раннем онтогенезе.

В-третьих, если все-таки допустить, что домен избегания начинает формироваться раньше (в правом полушарии по версии П.В. Симонова), с уровня низкодифференцированных систем, нельзя исключать, что на поздних этапах онтогенеза он может приобрести более высокую степень дифференциации, усложняясь и обгоняя по дифференциации более поздний (возможно) домен приближения путем формирования новых систем за счет добавления специализированных нейронов к уже существующим системам и реконсолидации существующих систем. Таким образом, правое полушарие оказывается не менее дифференцированным, чем левое, оставаясь при этом более архаичным за счет преобладания старых систем. Наличие компонентов низкодифференцированных старых систем в правом полушарии мозга подтверждается данными коллектива Э.А. Костандова, показавших, в терминологии авторов, меньшее время восприятия словесных стимулов в правом полушарии (Костандов, 1983).

Аргументом в пользу того, что в правом полушарии локализуются компоненты систем, связанных преимущественно с отрицательными эмоциями (домен избегания), говорит исследование Е.Д. Хомской и Н.Я. Батовой, которое показало, что при поражении правого полушария страдают механизмы, связанные с отрицательными эмоциями (и наоборот) (Хомская, Батова, 1998). Но в этой же работе было показано, что правое полушарие имеет преимущество при обработке любой эмоциональной информации, а не только отрицательных эмоций (Хомская, Батова, 1998).

В исследовании отрицательных и положительных эмоций с использованием фМРТ (Canli et al., 1998) была показана большая суммарная активность левого полушария в связи с положительными эмоциями, а правого — с отрицательными (см. рисунок 1.7). К настоящему времени в работах зарубежных авторов считается общепринятой «латерализация эмоциональной обработки, но остается дискуссионным вопрос об определенной роли каждого полушария» (Palomero-Gallagher, Amunts, 2022).

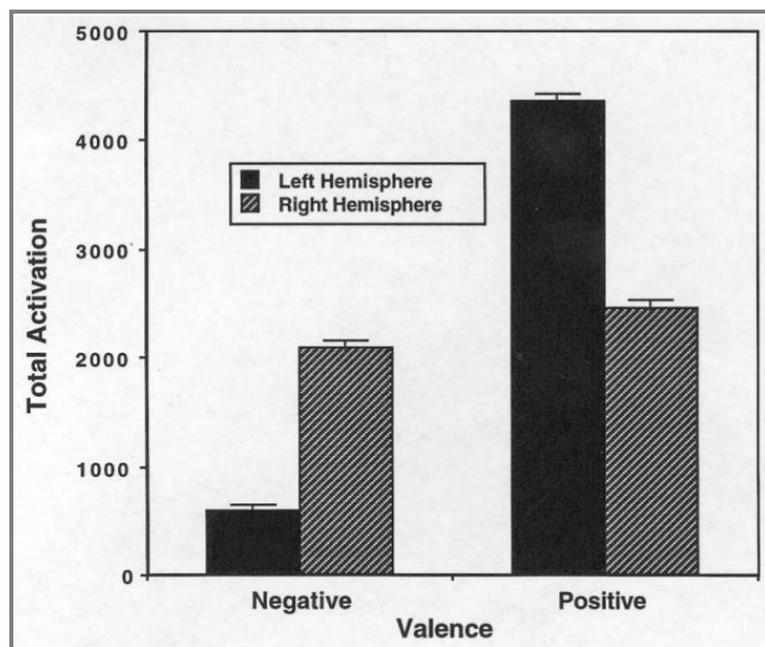


Рисунок 1.7 — Суммарная активность мозга по фМРТ-данным в связи с положительными и отрицательными эмоциональными изображениями (рисунок из публикации Canli et al., 1998)

Как уже было сказано, в настоящее время теоретические основания межполушарной асимметрии плохо разработаны. Различными авторами были выдвинуты необычные теории. Например, Д.И. Шапиро полагает, что «...правое полушарие работает с опорой на прошлое, а левое — с опорой на будущее» (Шапиро, 2000, с. 81), формируя тем самым, по мнению указанного автора, репрезентацию оси времени. В.Л. Бианки выдвигалось предположение, что в основе работы правого и левого полушария мозга у человека и животных может лежать дедуктивный и индуктивный принцип обработки информации<sup>1)</sup> (Бианки, 1985, с. 236).

Указанные противоречия и эклектичность методологических подходов свидетельствуют о недостаточной разработанности проблемы в рамках единой методологической парадигмы. В свою очередь, в системной психофизиологии эта тема недостаточно разработана, хотя еще в 1980-х годах были сформулированы «системогенетические представления о становлении системоспецифичности нейронов», основанные на данных о более позднем созревании структур левого

<sup>1</sup> Если эти представления верны, то в природе индуктивный и дедуктивный методы не противопоставляются (как в философии науки), а используются одновременно. Более подробно возможность и перспективность такой реализации в технической системе рассматривается в главе 3.

полушария, о «специфичности нейронов этого [левого] полушария по отношению к более «молодым» дифференцированным системам, чем нейронов правого» (Александров, 1989, с. 178). Поэтому актуально изучить системные аспекты межполушарной асимметрии при актуализации материала памяти, различающегося по времени приобретения в онтогенезе.

### **1.2.2. Половой диморфизм**

Затрагивая тему межполушарной асимметрии, невозможно обойти достаточно стереотипную тему различий функционирования мозга между мужчинами и женщинами. В диссертационной работе не планируется детальный анализ половых различий активности мозга. Разделение выборки по полу осуществлялось в целях кроссвалидационной проверки устойчивости результатов к изменению состава выборки. Информация о межполовых различиях функционирования мозга может потребоваться в прикладных целях — например, при определении референсных значений для диагностических шкал.

Хотя накоплено много экспериментальных свидетельств определенных количественных различий в анатомическом строении, гормональных взаимодействиях и функционировании мозга, связанных с полом (Горошко, 2005), при этом современные представления не предполагают принципиально разных механизмов, лежащих в основе таких различий. По словам специалиста в этой области Дж. МакГлоун, общие закономерности строения и функционирования мозга мужчин и женщин имеют, по-видимому, больше сходства, чем различий (McGlone, 1980). Основная тенденция заключается в том, что мозг у мужчин несколько более асимметричен, чем у женщин, что, как предполагается авторами, может быть обусловлено гормональными факторами во время развития (Горошко, 2005).

Функциональные различия по данным фМРТ носят несистематический характер, существенно различаясь у разных авторов в зависимости от экспериментальной задачи. По рисунку 1.8 (Gur et al., 2000) можно заметить, что в целом уровень фМРТ-сигнала в различных задачах у женщин меньше, чем у

мужчин, что определяет во многом получающийся паттерн статистического параметрического картирования после отсечки по уровню значимости.

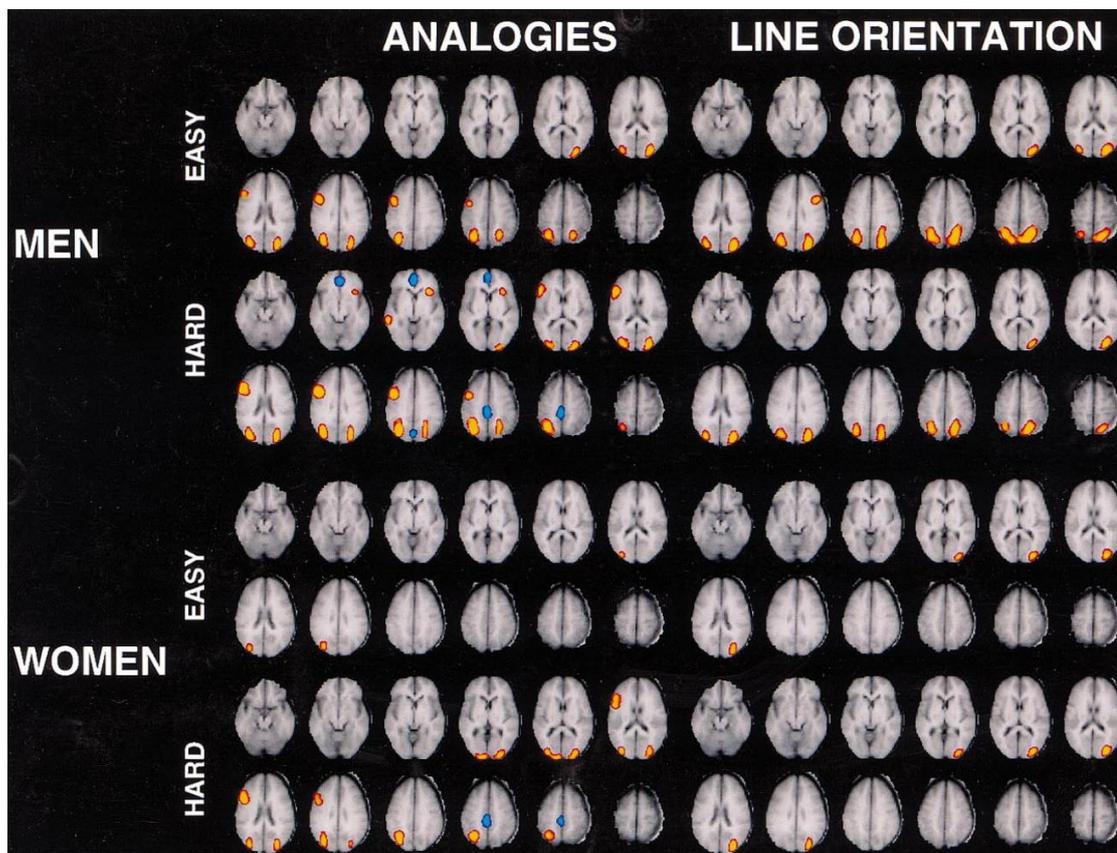


Рисунок 1.8 — фМРТ-активации для мужчин (сверху) и женщин (снизу) во время выполнения простых (easy) и сложных (hard) вербальных (analogies) и пространственных (line orientation) задач (рисунок из публикации Gur et al., 2000)

Авторы указанной работы перечисляют различия в терминах «деактивации» какой-либо области и т.д., приводя лишь карты для двух выборок отдельно. Однако другой автор замечает, что визуального анализа карт недостаточно, чтобы сделать суждение о статистически значимых различиях между выборками (Kaiser et al., 2009). Требуется прямое статистическое сопоставление выборок. В целом можно отметить, что при наличии большого числа работ с анализом фМРТ-данных у мужчин и женщин, трудно сделать надежный вывод о воспроизводимых половых различиях функционирования мозга.

### 1.3. Исследование памяти в криминалистике и нейрокриминалистике

Диссертационная работа выполнена на базе исследовательских методик, применяемых в криминалистических ИПП. Соответственно, требуется выполнить краткий обзор этой области знания. Исследования памяти в криминалистике имеют обычно прикладную цель — выявление скрываемой человеком информации в тех случаях, когда единственным доступным носителем информации о расследуемых событиях является память человека. Достижение этой цели потребовало обращения к фундаментальным основам психологии и психофизиологии, разработке методического аппарата. Большой вклад в развитие теоретической и методической базы ИПП внес Ю.И. Холодный. Созданные и проверенные в криминалистической практике методические основы могут быть использованы для проведения психофизиологических исследований самой разнообразной направленности (от фундаментальной психофизиологии до медицинской диагностики) (Холодный и др., 2021; Холодный, 2023; Kovalchuk, Kholodny, 2020).

Попытки реализовать психофизиологический метод выявления у человека скрываемой им информации впервые были предприняты в древности при помощи наблюдения за тремором рук, слюноотделением, частотой пульса (Холодный и др., 2021; Холодный, 2023). А.Р. Лурия в 1920-е годы сформулировал общий принцип психофизиологических методов выявления у человека скрываемой им информации: «единственная возможность изучить механику внутренних «скрытых» процессов сводится к тому, чтобы соединить эти скрытые процессы с каким-нибудь одновременно протекающим рядом доступных для непосредственного наблюдения процессов, ... в которых внутренние закономерности и соотношения находили бы свое отражение» (Лурия, 1984, с. 231).

В 1930-е годы метод выявления скрываемой информации был дополнен созданным в США специальным прибором — полиграфом, который позволил контролировать одновременно динамику артериального давления, частоты сердечных сокращений, КГР и дыхания; и показал перспективность применения

совместной регистрации перечисленных физиологических параметров (Холодный Ю. И., 2000).

Применение метода совместной регистрации вегетативных показателей оказалось успешным в деятельности полиции и спецслужб США, и вскоре за полиграфом закрепилось неверное, но ставшее популярным, название — «детектор лжи»<sup>1)</sup>. Отмечая в 1980-е годы полезность использования ИПП в практике, эксперты Конгресса США, тем не менее, констатировали, что «базовая теория проверки на полиграфе разработана лишь частично» (U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1983, p. 101). В СССР в 1930-1980 гг. существовало мнение о лженаучности ИПП, задержавшее применение этой технологии. Ограниченное использование полиграфа (в интересах спецслужб) было начато в 1970-е годы. Развитием ИПП в СССР занимался, в частности, П.В. Симонов (Холодный, 2015). В 1993 г., при активном участии Ю.И. Холодного, ИПП были легализованы в России, а годом позднее — признаны криминалистическим методом и стали активно использоваться в работе федеральных ведомств и негосударственных организаций. Однако, в силу различных обстоятельств, для этой технологии не была создана «прочная теоретическая база» (о чем говорили и американские эксперты).

В 90-х годах XXI века стали активно развиваться методы нейровизуализации — МЭГ, фМРТ, ПЭТ — среди которых метод фМРТ оказался особенно интересен с точки зрения нейрокриминалистики в силу своей неинвазивности и схожести динамики регистрируемых физиологических сигналов с сигналами, регистрируемыми полиграфом. В 2001-2002 гг. были проведены первые эксперименты по изучению возможности применения фМРТ в целях диагностики у человека наличия информации о скрываемых им событиях прошлого (Spence et al., 2001; Langleben et al., 2002; Lee et al., 2002). Эти эксперименты положили начало еще одному направлению прикладной

---

<sup>1</sup> Автор диссертационной работы не является сторонником широкого распространения ИПП, хотя и признает ценность некоторых научных результатов, полученных с помощью этой технологии, для общенаучных целей (Холодный и др., 2021).

психофизиологии, позднее названному «криминалистические нейронауки» или «нейрокриминалистика» (Ward et al., 2018).

Необходимо отметить вклад НИЦ «Курчатовский институт» в создание данного направления. Для контроля динамики текущего состояния человека в условиях фМРТ в НИЦ «Курчатовский институт» (при участии автора данной диссертационной работы) был создан МРТ-совместимый компьютерный полиграф (МРТСП), обеспечивающий совместную регистрацию вегетативных показателей — дыхания, частоты сердечных сокращений, ФПГ и КГР в условиях фМРТ-исследования (Патент RU 2756566 С1).

Рассматривая технологию ИПП, невозможно пройти мимо этических вопросов применения этой технологии:

1. Обычно аргументация против ИПП для целей выявления скрываемой информации сводится к тому, что имеющиеся методы недостаточно надежны. Так, Национальный исследовательский совет (США) с участием большой группы специалистов в соответствующих областях знания (включая П. Экмана) выполнил детальный анализ научных работ по теме ИПП в целях проверки госслужащих и заключил, что «в целом доказательства [в пользу этой технологии] скудны и научно слабы» (National Research Council, 2003, с. 212), при этом отмечая и ограниченность возможностей улучшения методики в будущем. Тем не менее, как уже отмечалось выше, к тематике выявления скрываемой информации привлекаются новые способы исследования.

2. В связи с этим возникает вторая, более сложная, проблема: многие исследователи отмечают, что повышение надежности ИПП с применением современных технологий только увеличивает возможные пути нарушения прав человека (Nemeth, 1983; Sententia, 2004; Bublitz, 2013; Ienca, Andorno, 2017). В этом случае возникает противоречие с правом не свидетельствовать против себя, закрепленного, в том числе, в Конституции РФ. В настоящее время возможно отказаться от прохождения ИПП по причине низкой надежности этой технологии. Однако если методы ИПП будут усовершенствованы до определенного уровня (например, с помощью технологии фМРТ или других), то отказ от их

прохождения может автоматически трактоваться как признание виновности, при этом проведение такого исследования остается нарушением конституционного права несвидетельствования.

Так как в диссертационной работе по тем или иным причинам были использованы методические подходы, выработанные в практике нейрокриминалистических ИПП (для исследования механизмов актуализации памяти), необходимо рассмотреть требования к экспериментальной процедуре.

Зарубежные исследователи, стремясь объяснить естественнонаучные механизмы ИПП, к концу XX века предложили около десятка теоретических концепций или так называемых «теорий полиграфа», но ни одна из них так и не стала «базовой теорией проверки на полиграфе». Поэтому первые эксперименты по применению фМРТ для диагностики у человека скрываемой им информации вызвали большой интерес у исследователей: они полагали, что нашли путь создания «базовой теории», поскольку открылась возможность изучать «орган, который производит ложь, — мозг... Эта нейробиологически обоснованная стратегия основывается на выявлении специфических паттернов нейронной активности, лежащих в основе лжи» (Ganis et al., 2003, p. 830).

После первых экспериментов, в 2006 г. в США две фирмы на коммерческой основе стали оказывать услуги по «детекции лжи с помощью фМРТ» (fMRI-based lie detection) (Farah et al., 2014). Однако надежды на быстрый успех фМРТ-диагностики в криминалистике — как в широком внедрении в практику, так и в создании «базовой теории» ИПП — не оправдались. Теоретические разработки пока далеки от желаемого (Bell, Grubin, 2010), а специалисты в области ИПП подвергли работы упомянутых организаций аргументированной критике (Vendemia, 2014; Wagner, 2010), хотя метод «детекции лжи с помощью фМРТ» продолжает использоваться в тех или иных целях в США (Farah et al., 2014).

Технология зарубежных научных исследований, выполненных в целях «детекции лжи с помощью фМРТ», имеет следующие особенности:

а) исследования осуществляются преимущественно в парадигме выявления лжи, в то время как другая школа полиграфологии предполагает анализ следов

событий прошлого, хранящихся в памяти человека, и требует использования парадигмы выявления скрываемой информации (Rosenfeld, 2018). В первом подходе анализируется непосредственно процесс лжи и связанные с ним стрессовые факторы (Учаев, Александров, 2022а). В рамках этой школы были выдвинуты предположения о том, что поведение лжи реализуется посредством специальных функциональных систем, и в процессе проверки на полиграфе происходит конфликт «системы лжи» и «системы правды» (Исайчев, Исайчев, 2016). В других работах этого направления ложь связывают с актуализацией функциональных систем, специализированных относительно скрываемой информации, плюс актуализацией «функциональной системы лжи», направленной на достижение соответствующих целей (Учаев, Александров, 2022б). Такой вариант фактически объединяет оба подхода: помимо упомянутой «функциональной системы лжи» существенным компонентом здесь является актуализация базовых функциональных систем, специализированных относительно скрываемой информации (по принципу наложения систем, рассмотренному выше). В данной диссертационной работе использовался второй подход, направленной на анализ субъективной значимости актуализируемой информации (Kholodny et al., 2021a; Kholodny et al., 2021б) без акцента на процесс сокрытия этой информации;

б) использование в дизайнах экспериментов лишь отдельных элементов технологии ИПП (формат теста, формулирование вопросов и т.д.), без учета жестких методических требований, выдвигаемых криминалистической психофизиологией. Например, стимулы предъявляли с периодичностью менее 10 с (Ofen et al., 2017); либо в ходе исследования участников экспериментов просили давать ответы, нажимая на кнопки, а не произнося их; или предъявляли стимулы визуально (Peth et al., 2015);

в) в исследованиях нейрокриминалистической направленности требуется анализ данных на индивидуальном уровне — такие работы проводились (Davatzikos et al., 2005; Langleben et al., 2005; Finn et al., 2015), но в небольшом количестве. «Большинство публикаций сообщают только о групповом анализе»

(Farah et al., 2014), что подходит только для фундаментальных исследований, предназначенных для выявления психофизиологических закономерностей;

г) исследователи лишь в редких работах сообщают о контроле динамики физиологической активности в процессе фМРТ (Peth et al., 2015), либо проводят контрольные ИПП до или после фМРТ-сканирования (Gordon et al., 2018).

Таким образом, чтобы воспроизвести технологию ИПП в условиях одновременной регистрации фМРТ-данных в целях психофизиологических исследований прикладной и фундаментальной направленности, необходимо учесть описанные выше методические недостатки. Для этого требуется создать технологию комплексного фМРТ-МРТсП-исследования, которая бы удовлетворяла требованиям проведения ИПП, а именно — обеспечивала методически корректный контроль динамики текущего состояния человека в условиях фМРТ, обосновывала необходимые временные параметры предъявления стимулов, и в процессе обработки данных позволяла получить количественные оценки разнородных физиологических сигналов, пригодные для взаимного сопоставления и объединения.

#### **1.4. Актуальные проблемы проведения комплексного психофизиологического исследования с использованием полиграфа и фМРТ**

Реализация выдвинутых выше требований и применение комплексных методик для психофизиологических исследований с одновременным использованием полиграфа и фМРТ до выполнения диссертационной работы было сопряжено с рядом технических и методических трудностей:

а) отсутствовали технические средства для проведения ИПП в условиях одновременной регистрации фМРТ, позволяющие регистрировать необходимые физиологические параметры с отображением в режиме реального времени;

б) требовалось решить задачу выбора оптимальных способов и параметров обработки физиологических сигналов, регистрируемых с помощью полиграфа и фМРТ;

в) требовалось разработать методику получения автоматических количественных оценок сигналов полиграфа и фМРТ в задачах ИПП. Проведение комплексных психофизиологических исследований требовало разработки способа получения унифицированных количественных оценок регистрируемых разнородных физиологических показателей.

#### **1.4.1. Регистрация физиологических данных с помощью полиграфа и их обработка**

После создания МРТ-совместимого полиграфа (Патент RU 2756566 C1) потребовалось выбрать наилучшие способы и параметры обработки сигналов. В силу размытости границы между свойствами сигнала и шума, существует проблема влияния субъективных факторов на выбор этих параметров и, как следствие, на экспериментальные результаты. Эта проблема усугубляется фундаментальным недостатком *объективных критериев* качества измерения и обработки данных.

В технических науках в контексте решения аналогичной задачи выделяется ряд подходов:

а) на основе теоретического анализа заведомо известного или хорошо прогнозируемого сигнала. Например, если заранее известен частотный диапазон источника сигнала, а также параметры шума, можно задать параметры частотных фильтров на основе этих данных (Колосовский, 2007);

б) на основе эмпирической настройки приемной системы по специально сгенерированному *тестовому сигналу*, совмещенному с источниками помех. Наличие тестового сигнала решает проблему сомнений в том, насколько верна была теоретическая модель процесса обработки данных — если тестовый сигнал детектируется верно, то не так важно, насколько верна была теория обработки, и была ли она вообще, но только в том случае, если сам тестовый сигнал и шум соответствуют реальным сигналам. В технике хорошие результаты нередко показывают системы, оптимальность которых не совсем очевидна с точки зрения теории, но являющиеся более простыми в реализации и меньше искажающие

сигнал (например, использование параметрической статистики, даже если нормальность распределения данных не очевидна) — именно благодаря проверке на тестовом сигнале. Современные искусственные нейронные сети являются примером такого подхода к автоматической оптимизации параметров обработки, причем без анализа этих параметров вручную по причине их слишком большого числа (Николенко и др., 2019);

в) в случае отсутствия возможности создать реалистичный тестовый сигнал (в силу его сложности или малоизученности) прибегают к детектированию сигнала альтернативным способом, так как физические эффекты жестко связаны друг с другом. Таким образом, один из способов регистрации может использоваться в качестве контроля для совершенствования другого способа.

В психологических науках, включая психофизиологию, все эти подходы также применяются (Бурлачук, 2006), но сталкиваются со специфическими сложностями. Например, можно иметь общее представление о частотных параметрах сигнала, но при этом не знать в точности, какая часть этого сигнала важна в конкретном эксперименте, особенно это касается редко используемых диапазонов сигнала. Так, ведутся споры относительно того, следует ли вообще применять частотную фильтрацию к сигналу КГР (Kalafati, Krapohl, 2018).

Точно также возникают трудности с созданием реалистичного тестового сигнала, так как просто нет достаточных и точных знаний о том, как работает источник этого сигнала — мозг. Тем не менее, стоит отметить появление в последнее время работ по моделированию сигналов КГР (Bach et al., 2009; Bach et al., 2010; Bach et al., 2013; Bach, 2014; Tronstad et al., 2015).

С развитием технических средств получают все большее распространение альтернативные способы контроля сигналов (в психодиагностике такой контроль можно сопоставить термину конкурентной валидности — Бурлачук, 2006). Например, для взаимного контроля проводится одновременная регистрация одних и тех же источников сигнала несколькими методами: ЭЭГ, МЭГ, экстраклеточная регистрация нейронов, фМРТ, ПЭТ и т.д. Однако такая регистрация, помимо своей очевидной сложности, может быть в принципе невозможна во многих

случаях. При этом даже после преодоления технических трудностей и получения физиологических данных по-прежнему остаются вопросы к валидности соотнесения их с психологической феноменологией, в том числе такой принципиально важной, как субъективная значимость экспериментальных заданий, от которой существенно зависит активность мозга, обеспечивающая поведение у участников эксперимента (Иванов, 2019; Alexandrov, 2008).

Отдельно стоит рассмотреть важную технологию настоящего времени — искусственные нейронные сети и машинное обучение. Применение нейросетей напрямую для обработки данных в психофизиологии сталкивается с рядом трудностей: помимо очевидного дефицита примеров в обучающих наборах данных, которые добываются в весьма трудозатратных экспериментах, остаются проблемы валидности разметки естественных сигналов мозга, а также теоретической интерпретации полученных в итоге результатов. Однако нейросетевой подход закрепил в рутинной практике ряд полезных методических приемов оптимизации, которые ранее были известны, но не применялись так широко, и которые можно использовать для работы с классическими способами обработки данных: использование количественных метрик в качестве критерия оптимизации, формализация итерационных приемов (метод градиентного спуска, полный перебор параметров, если это возможно, и т.д.), а также проверка результата на валидационной выборке.

В литературе для определения информативных параметров физиологических сигналов нередко применяется парадигма «период активности — пауза» (Bach et al., 2013; Posada-Quintero et al., 2016), когда определение параметров осуществляется по разнице сигналов между периодом выполнения задачи и паузой. Такой подход имеет недостаток, заключающийся во влиянии помех, непосредственно не связанных с исследуемым психологическим явлением (например, наличие или отсутствие движений конечностей, вербальных ответов, глазодвигательной активности во время чтения и т.д.).

Таким образом, в диссертационной работе актуально было разработать методику сопоставления способов обработки данных и настройки параметров

обработки, применимую в психофизиологических исследованиях. В частности, в публикациях по обработке сигналов полиграфа обсуждается необходимость подбора следующих параметров: частотные диапазоны фильтрации и типы фильтров, временные интервалы анализа, а также способ преобразования сигнала КГР и ФПГ в численные оценки величин реакций (Калафати, 2021; Elaad, Ben-Shakhar, 2006; Kalafati, Krapohl, 2018; Vandenbosch et al., 2009).

#### **1.4.2. Регистрация и обработка фМРТ-данных**

В области фМРТ-исследований существует проблема объективной оценки различных методов обработки фМРТ-данных (Fusar-Poli et al., 2010). Например, на рисунке 1.9 показаны результаты обработки фМРТ-данных с помощью двух разных программных пакетов, и выделенные «области активности» заметно различаются между собой. При выборе метода аргументация сводится к доказательству математической корректности процедуры (Worsley, Friston, 1995) (это не устраняет проблему, так как такую проверку проходит множество альтернативных методов), к визуальной оценке получившихся изображений, как в приведенном примере (Fusar-Poli et al., 2010), к сравнению количества «выделившихся» в результате анализа статистически значимых вокселей и т.д., что трудно назвать объективным подходом. В отличие от технических систем, при исследовании психофизиологических закономерностей нет возможности проверить измерения с помощью тестового сигнала и откалиброванного прибора, так как эталонных методов измерения просто не существует.

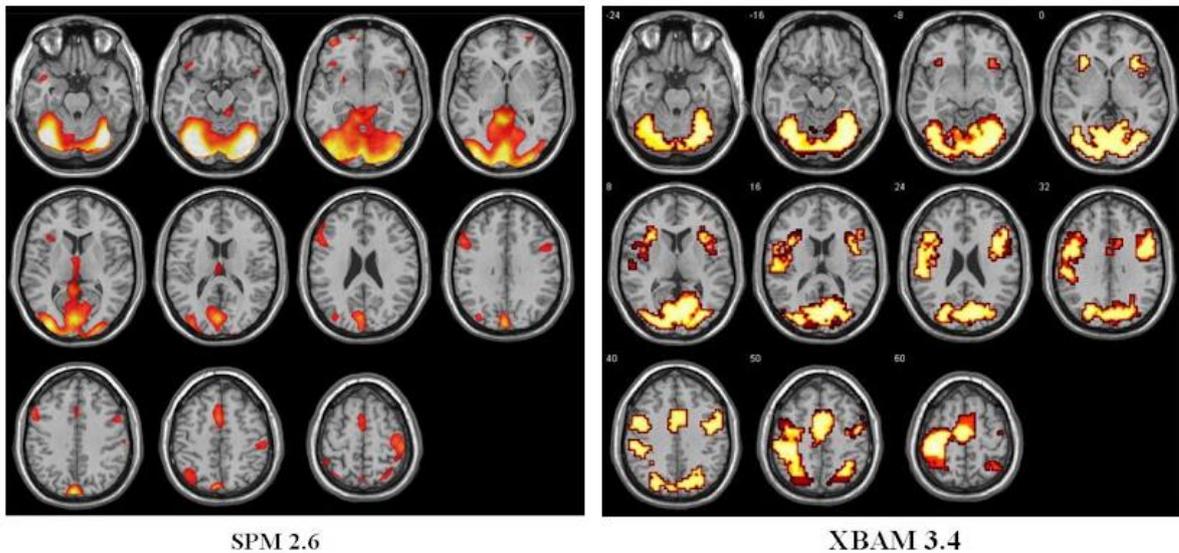


Рисунок 1.9 — Пример фМРТ-картирования, полученного с помощью различных программных пакетов, показывающий, что результаты существенно зависят от метода обработки данных (рисунок из публикации Fusar-Poli et al., 2010)

Одним из базовых экспериментальных подходов к решению указанной проблемы является регистрация фМРТ-сигнала<sup>1)</sup> в относительно простых задачах, связанных с движением конечностей (перебор пальцев, сжатие руки в кулак и т.д.). В этом случае ожидается устойчиво сильный сигнал от двигательных областей коры головного мозга, который требуется обнаружить с помощью алгоритмов обработки фМРТ-сигналов. Проблемой является то, что даже в такой простой экспериментальной задаче в мозге человека работают далеко не только двигательные области коры (Witt et al., 2008). При этом наше знание о работе мозга не позволяет точно спрогнозировать работу всего мозга в этой задаче. Соответственно, с помощью такого подхода невозможно установить объективный критерий по оценке качества обработки сигнала от вокселей, расположенных за пределами двигательной коры.

Второй проблемой является недостаточная разработанность амплитудного анализа фМРТ-данных. Финальным этапом обработки фМРТ-данных в

<sup>1</sup> Для обозначения фМРТ-сигналов нередко используется термин BOLD-сигнал. Этот термин подразумевает определенную трактовку источника фМРТ-сигналов, которая встречает критику среди некоторых специалистов. Так как обсуждение природы фМРТ-сигналов выходит за рамки диссертационной работы, то, чтобы не вступать в дискуссию по этому вопросу, был выбран более общий термин.

большинстве современных публикаций является статистический анализ. Наиболее широко используется обобщенная линейная модель (GLM — General Linear Model) и статистическое параметрическое картирование на основе полученных с помощью нее параметров. В большом критическом обзоре GLM указывается, что существующие проблемы этого метода в литературе «почти полностью игнорируются» (Monti, 2011). К сожалению, исследователи редко предоставляют явным образом амплитудную информацию об активности структур мозга с сохранением амплитудных пропорций между параметрами активности вокселей, а фокусируются главным образом на демонстрации статистических критериев. При этом информация о количественных соотношениях активности областей мозга является важной в некоторых задачах. В одной из публикаций, специально посвященных затрагиваемому вопросу, изложенная мысль сформулирована следующим образом: «...статистические показатели являются дополнительным свидетельством существования исследуемого эффекта, а центр исследования — непосредственно сама величина эффекта, изучаемое физическое свойство ... при этом в области нейровизуализации обычной практикой остается публикация только карт статистических параметров...» (Chen et al., 2017, p. 952).

Одним из возможных решений для анализа амплитуды активаций является использование альфа-коэффициентов GLM (в отличие от широко используемых бета-коэффициентов, они не проходят повоксельную нормировку). Однако этот способ имеет существенный недостаток — как и все подходы, основанные на GLM, он полагается на априорную информацию о форме гемодинамического ответа. В свою очередь, форма гемодинамического ответа отличается от стандартной в различных областях мозга и в различных задачах (Monti, 2011). Например, последнее время исследуется даже отрицательный гемодинамический ответ в некоторых структурах (Bressler et al., 2007; Liu et al., 2011; Van Niftrik et al., 2023). Также предполагается высокая изменчивость формы гемодинамического ответа в ассоциативных областях мозга, представляющих наибольший интерес в когнитивных исследованиях.

Среди исследователей начинает складываться представление о том, что гемодинамический ответ, регистрируемый с помощью фМРТ, является не «ответом», а антиципирующим механизмом, «который поставляет дополнительную артериальную кровь к мозгу в предвосхищение ожидаемых задач» (Sirotin, Aniruddha Das, 2009). Появляется все больше данных, что такое предвосхищение метаболической активности несет не только «обслуживающую» функцию, но и лежит в самой основе механизмов научения (Luczak et al., 2022). Соответственно, фМРТ-анализ не может быть адекватно выполнен без учета факторов, связанных с предвосхищением будущей активности, таких как субъективная значимость для участника эксперимента предъявляемых ему стимулов, экспериментальных условий, инструкции и т.д.

В настоящее время в среде специалистов по фМРТ-анализу обсуждается проблема воспроизводимости экспериментальных результатов и предлагается пересмотреть базовые методологические подходы к построению фМРТ-экспериментов и трактовке получаемых в них данных (Westlin et al., 2023). Подходы, предлагаемые авторами, приближаются к тем, которые используются при интерпретации данных настоящего диссертационного исследования. В частности, авторами предлагаются следующие изменения (см. рисунок 1.10):

а) концепцию локальной фМРТ-активности предлагается заменить на представление о том, что активность всего мозга связана с психическими явлениями;

б) однозначное сопоставление психической функции с паттерном активности предлагается заменить на допущение, что психическое явление может быть связано с разными паттернами активности мозга;

в) независимость разных психических функций (и соответствующих им паттернов активности), таких как память, исполнительная функция, внимание, зрение и т.д. друг от друга предлагается заменить на неизбежность получения сложной комбинации активности мозга, тела и мира.

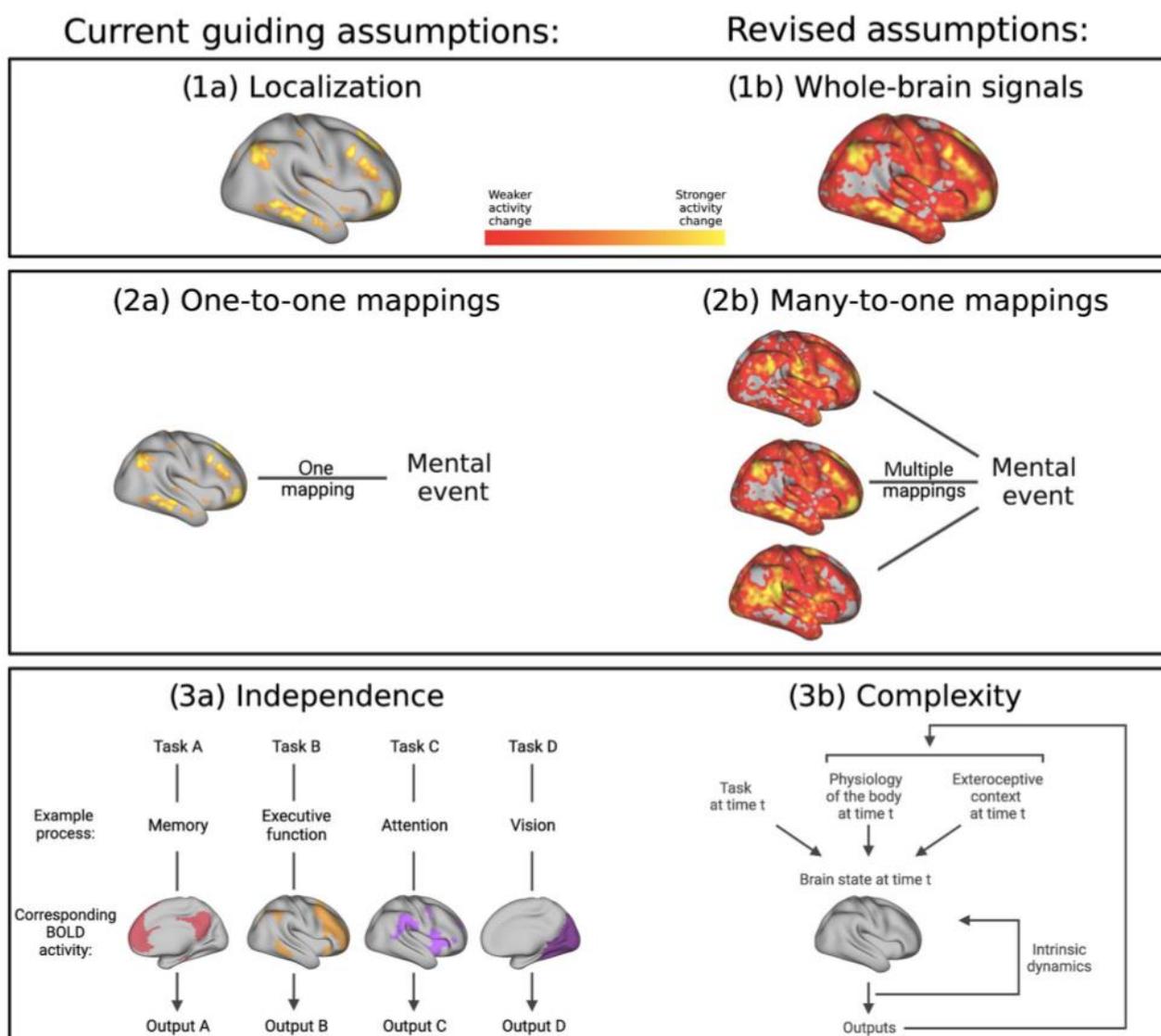


Рисунок 1.10 — Пересмотр подходов к построению исследования и анализу фМРТ-данных (рисунок из публикации Westlin et al., 2023)

Указанные направления переосмысления методологии фМРТ-эксперимента находятся в согласии с принципами системной психофизиологии и требуют практической реализации в соответствующих средствах анализа данных.

Применение статистического параметрического картирования и GLM во многом объясняет сложившуюся ситуацию в корне неверной интерпретации фМРТ-данных с выделением «активных» и «неактивных» областей, тогда как практически все структуры мозга в той или иной мере активируются в экспериментальных задачах. Учитывая изложенное, актуально разработать и апробировать способ амплитудного анализа фМРТ-данных без привязки к

фиксированной форме гемодинамического ответа либо с возможностью ее адаптации для разных областей мозга и задач исследования.

### **1.5. Заключение по обзору литературы**

По результатам обзора литературы были выделены актуальные проблемы (на основании которых сформулированы задачи диссертационной работы, приведенные во «Введении»):

1. В связи с тем, что диссертационное исследование проводилось на базе созданного при участии автора комплекса МРТсП-фМРТ, требовалось выбрать оптимальные параметры обработки данных, полученных в новых условиях. Обнаружилось, что в литературе недостаточно развит методический аппарат сопоставления психофизиологических методов. Поэтому актуально было разработать метод сопоставления способов обработки данных и настройки параметров обработки, применимый в психофизиологических исследованиях. Апробировать этот метод на данных КГР и ФПГ, а затем применить к данным фМРТ.

2. Совместная регистрация КГР-, ФПГ- и фМРТ-данных потребовала разработки методического аппарата для оценки информативных параметров этих сигналов с целью их количественного сопоставления в психофизиологических задачах. Актуально было разработать методику автоматической оценки сигналов КГР и ФПГ, сопоставимую с экспертной оценкой; а также разработать способ амплитудного анализа фМРТ-данных без привязки к фиксированному шаблону «стандартного» гемодинамического ответа (задаваемому в программе обработки фМРТ-данных) либо с возможностью адаптации параметров для разных областей мозга и задач исследования. Апробировать эти методы анализа на материале комплексного МРТсП-фМРТ-исследования.

3. Выявить психофизиологические характеристики актуализации памяти, различающейся по субъективной значимости.

4. Для психофизиологических характеристик, имеющих информативность в отношении субъективной значимости актуализируемой информации, выявить

возможные особенности, связанные с различным онтогенетическим возрастом (фактором времени приобретения) актуализируемой информации, включая системные аспекты межполушарной асимметрии мозга.

При выполнении указанных задач требуется установить количественные соотношения активности структур мозга (например, по амплитудным характеристикам фМРТ-сигнала) и других физиологических параметров (таких как КГР и ФПГ), регистрируемых с помощью полиграфа, в связи с исследуемыми факторами субъективной значимости и времени приобретения материала памяти.

## Глава 2. Материалы и методы

Во второй главе описана общая организация получения экспериментальных данных — экспериментальная процедура, используемое оборудование и программное обеспечение.

### 2.1. Выборка

В фМРТ-МРТсП-исследовании приняли участие 74 человека (37 мужчин и 37 женщин, студенты технического вуза, возраст 21-23 года), которые сообщили об отсутствии у них каких-либо заболеваний на момент участия в исследовании. Разрешение на проведение фМРТ-МРТсП-исследований было предоставлено этическим комитетом НИЦ «Курчатовский институт».

### 2.2. Процедура эксперимента

Эксперименты были выполнены в парадигме выявления скрываемой информации, использовались криминалистические тесты — ТСИ и ТЗВ. Первый тест использовался в качестве модели сокрытия значимой информации, сохраняемой в памяти человека на протяжении десятилетий (старая информация). Второй — сокрытие информации, сформированной в памяти человека менее чем за час до эксперимента (новая информация).

При проведении ТСИ участник эксперимента скрывал от экспериментатора своё собственное имя, предъявляемое в ряду с пятью другими именами: шесть имён предъявлялись в ходе теста пять раз (таблица 2.1). Ряд имен начинался одним и тем же именем, которое в дальнейшем исключалось из анализа. Все остальные имена (включая имя участника эксперимента) задавали в случайном порядке, который был участнику эксперимента неизвестен. Имена задавали в вопросе — «Вас по паспорту зовут ...?». Скрывая своё имя в ряду других имён, участники эксперимента на все вопросы отвечали — «нет».

Таблица 2.1 — Порядок предъявления вопросов ТСИ участнику эксперимента

Номер вопроса	Вопрос	Номер вопроса	Вопрос
1.0.	«Вас по паспорту зовут Петр?»	4.0.	«Вас по паспорту зовут Петр?»
1.1.	«Макар?»	4.4.	«Сергей?»
1.2.	«Олег?»	4.5.	«Никита?»
1.3.	«Семен?»	4.1.	«Макар?»
1.4.	«Сергей?»	4.2.	«Олег?»
1.5.	«Никита?»	4.3.	«Семен?»
2.0.	«Вас по паспорту зовут Петр?»	5.0.	«Вас по паспорту зовут Петр?»
2.2.	«Олег?»	5.5.	«Никита?»
2.4.	«Сергей?»	5.3.	«Семен?»
2.5.	«Никита?»	5.4.	«Сергей?»
2.3.	«Семен?»	5.1.	«Макар?»
2.1.	«Макар?»	5.2.	«Олег?»
3.0.	«Вас по паспорту зовут Петр?»		
3.3.	«Семен?»		
3.1.	«Макар?»		
3.2.	«Олег?»		
3.5.	«Никита?»		
3.4.	«Сергей?»		

При проведении ТЗВ участник эксперимента выбирал в случайном порядке одну из пяти визитных карточек неизвестных ему людей, записывал на лист бумаги и запоминал фамилию и место работы человека, указанного на этой визитке. Участнику эксперимента давалась установка скрыть от экспериментатора признаки (фамилию и место работы) выбранной им самим визитки — парадигма, в которой оператор МРТ и обработчики данных не знали номер выбранной карты (Киреев, 2017). Признаки визитки предъявлялись в порядке, указанном в таблице 2.2. Перед ними в каждом из шести предъявлений ТЗВ предъявлялись данные с визитки, отсутствовавшей среди пяти предлагаемых на выбор, и исключаемые из анализа. Признаки визитки задавались в вопросе — «У Вас на визитной карточке была фамилия ...?» или «Человек с визитной карточки работает в ...?».

Таблица 2.2 — Порядок предъявления вопросов ТЗВ участнику эксперимента

Номер вопроса	Вопрос	Номер вопроса	Вопрос
1.0.	«У Вас на визитной карточке была фамилия <Фамилия_0>?»	4.0.	«У Вас на визитной карточке была фамилия <Фамилия_0>?»
1.1.	«<Фамилия_1>?»	4.4.	«<Фамилия_4>?»
1.2.	«<Фамилия_2>?»	4.5.	«<Фамилия_5>?»
1.3.	«<Фамилия_3>?»	4.1.	«<Фамилия_1>?»
1.4.	«<Фамилия_4>?»	4.2.	«<Фамилия_2>?»
1.5.	«<Фамилия_5>?»	4.3.	«<Фамилия_3>?»
2.0.	«Человек с визитной карточки работает в <Место_работы_0>?»	5.0.	«Человек с визитной карточки работает в <Место_работы_0>?»
2.2.	«<Место_работы_2>?»	5.5.	«<Место_работы_5>?»
2.4.	«<Место_работы_4>?»	5.3.	«<Место_работы_3>?»
2.5.	«<Место_работы_5>?»	5.4.	«<Место_работы_4>?»
2.3.	«<Место_работы_3>?»	5.1.	«<Место_работы_1>?»
2.1.	«<Место_работы_1>?»	5.2.	«<Место_работы_2>?»
3.0.	«У Вас на визитной карточке была фамилия <Фамилия_0>?»	6.0.	«У Вас на визитной карточке была фамилия <Фамилия_0>?»
3.3.	«<Фамилия_3>?»	6.1.	«<Фамилия_1>?»
3.1.	«<Фамилия_1>?»	6.2.	«<Фамилия_2>?»
3.2.	«<Фамилия_2>?»	6.3.	«<Фамилия_3>?»
3.5.	«<Фамилия_5>?»	6.4.	«<Фамилия_4>?»
3.4.	«<Фамилия_4>?»	6.5.	«<Фамилия_5>?»

Скрывая признаки выбранной визитки в ряду других фамилий и мест работы, участники эксперимента на все вопросы отвечали — «нет». С целью повышения сосредоточенности в ходе теста, участник эксперимента после его завершения должен был сказать, сколько раз в ТЗВ прозвучали фамилия и место работы человека с визитки. При выполнении ТСИ, после его завершения, участник эксперимента также должен был сказать, сколько раз прозвучало его имя.

В диссертационной работе для обозначения типов стимулов использовалась терминология, заимствованная из практики ИПП: скрываемая информация

(собственное имя в ТСИ и информация с выбранной визитной карточки в ТЗВ) обозначалась как «субъективно значимые стимулы», а остальные стимулы назывались «субъективно незначимыми» (рабочее определение субъективной значимости, принимаемое в диссертационной работе, приведено в разделе 1.1.3). При этом с точки зрения системной психофизиологии информация не может быть совсем незначимой, если она зафиксировалась в памяти, так как системогенез, лежащий в основе памяти, служит для достижения целей организма (раздел 1.1.4). В этом случае можно говорить лишь о большей или меньшей значимости актуализируемой информации в текущий момент времени и в условиях, частично индуцированных инструкцией.

Существуют различные парадигмальные, методологические и терминологические подходы для разделения стимулов на группы в соответствии с инструкцией для участника эксперимента. Например, в когнитивной психофизиологии в сходных задачах применяются термины «таргет-» (целевые) и «нонтаргет-» (нецелевые) стимулы. Такой подход может быть неудобен в том случае, если субъективная значимость информации определяется не только экспериментальными условиями и инструкцией («ситуационная значимость»), но и личностными свойствами человека («личностная значимость») (Холодный и др., 2021, с. 22).

Поэтому, чтобы унифицировать формулировки, в работе использовались технические обозначения для стимулов, приведенные выше. В связи с этим возникает определенная схожесть терминов «субъективная значимость» и «статистическая значимость», если они применяются в сокращенном варианте (как просто «значимость»). Для их разделения в работе уточняется, какая значимость имеется в виду, если это не следует однозначно из контекста.

ТСИ и ТЗВ длились, соответственно, 6-7 и 8-9 мин. В ходе тестов экспериментатор задавал вопросы с интервалом примерно 12-20 с (не менее 10 с). Разброс времени объясняется тем, что перед предъявлением каждого следующего стимула производился обязательный учет текущей динамики физиологических показателей участника эксперимента (в реальном времени), регистрируемых с

помощью МРТсП, чтобы минимизировать наложение случайных флуктуаций сигнала (рисунок 2.1).

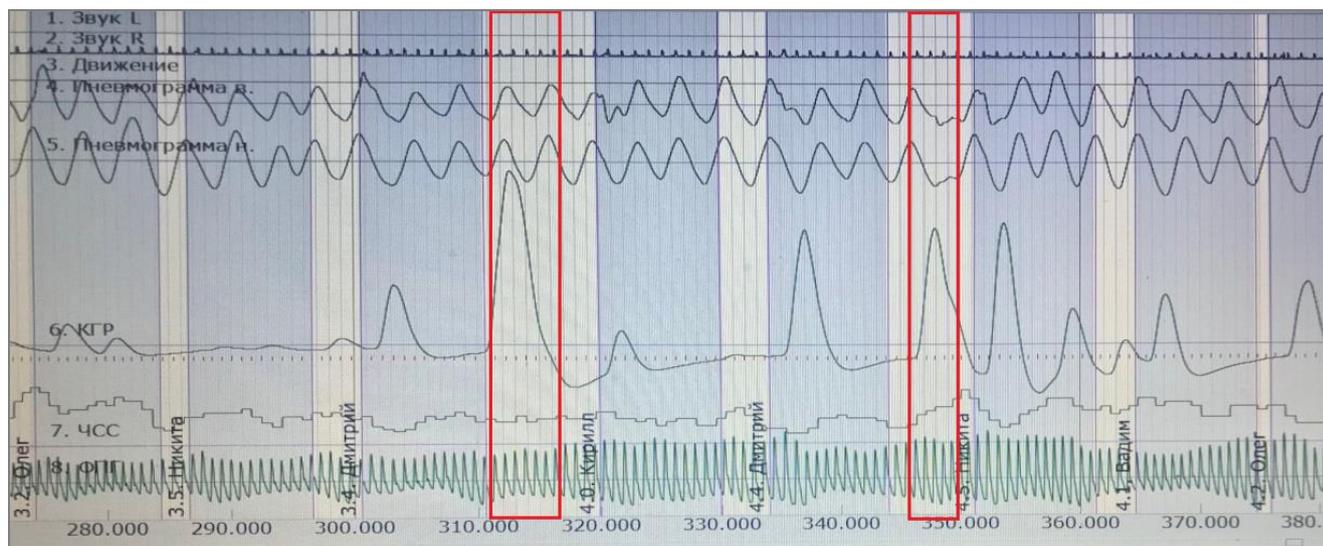


Рисунок 2.1 — Полиграмма ТСИ. Эпохи анализа (10 с) отображены темной вертикальной заливкой. По каналам 1 и 2 записывается звук голоса экспериментатора и участника эксперимента (а также шумы томографа); 3 — движение головы участника эксперимента, регистрируемое пневматическим датчиком; 4 — пневмограмма грудного дыхания; 5 — пневмограмма брюшного дыхания; 6 — КГР; 7 — ЧСС; 8 — ФПГ. Красным выделены спонтанные реакции в каналах КГР, ФПГ и дыхания, возникшие между эпохами анализа и не относящиеся к стимулам (представляющие в данном случае помеху)

### 2.3. Регистрация и предобработка физиологических сигналов

Регистрация сигналов ФПГ и КГР осуществлялась с помощью средств, разработанных автором диссертационной работы в НИЦ «Курчатовский институт»: МРТсП — «Система одновременного контроля и оценки динамики физиологических процессов в условиях проведения функциональной магнитно-резонансной томографии человека» (Патент RU 2756566 С1) (см. рисунки 2.2 и 2.3); системы синхронизации предъявляемых стимулов и физиологических данных с магнитно-резонансным томографом; а также ряда компьютерных программ для сбора, обработки и визуализации данных — компьютерного обеспечения психофизиологического эксперимента (Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2021618804; и № 2022662059) (рисунок 2.1).

Датчики во всех экспериментах располагались на левой руке участников эксперимента. Частота дискретизации ФПГ и КГР составляла 1000 Гц для унификации формата данных с остальным оборудованием с понижением до 100 Гц при обработке данных. Сигнал ФПГ регистрировался на длине волны 940 нм в режиме «отражения» (reflective) (Park et al., 2022, p. 4).

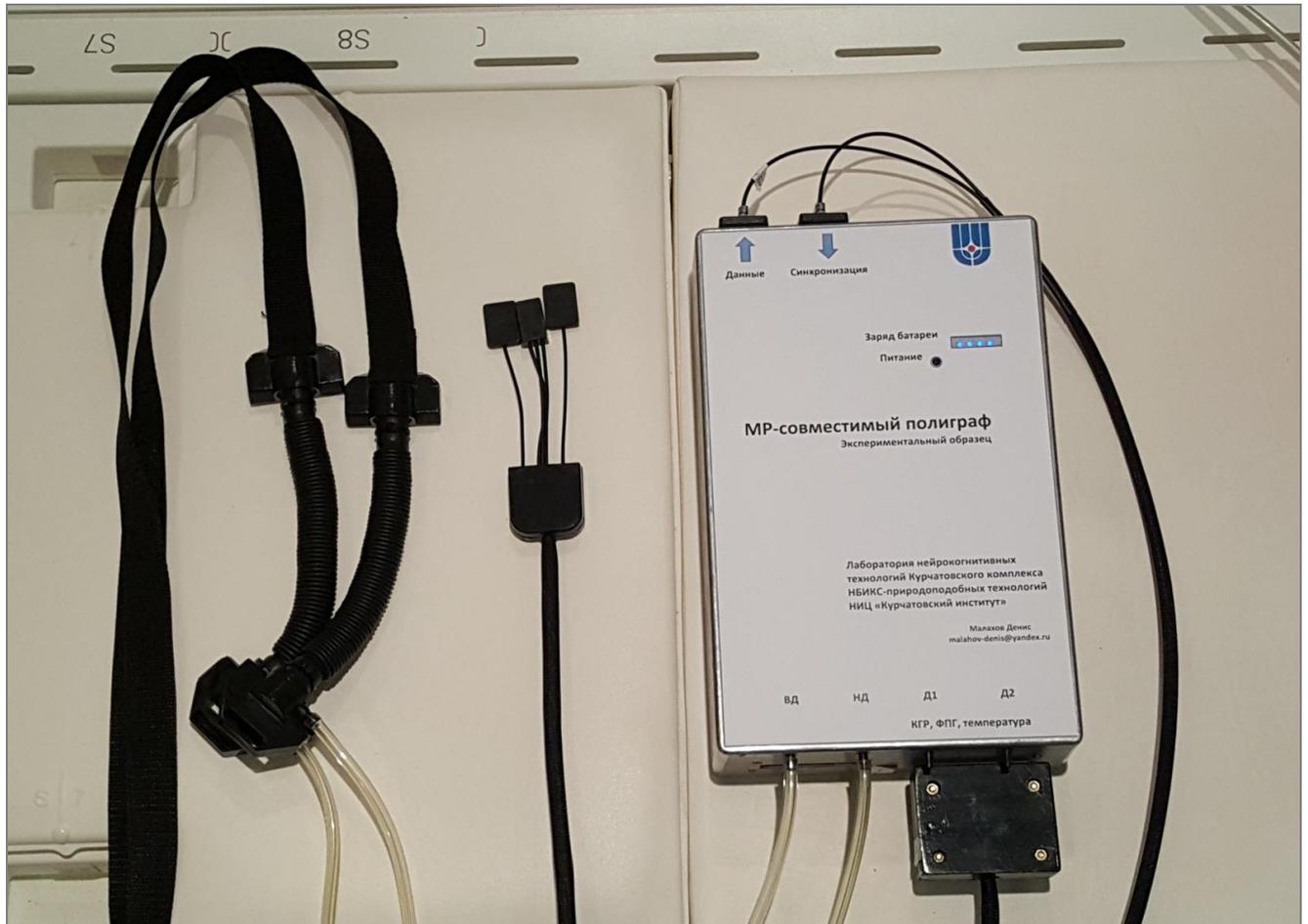


Рисунок 2.2 — Общий вид некоторых компонентов МРТСП. Показаны датчики дыхания, КГР, ФПГ, а также передающий электронно-оптический модуль

Одновременно регистрировались фМРТ-данные при помощи томографа 3T SIEMENS Magnetom Verio MR (рисунок 2.3). Во время эксперимента осуществлялась непрерывная голосовая связь с участником эксперимента при помощи МРТ-совместимых микрофона и наушников с активным шумоподавлением.

Синхронизация всего комплекса лабораторного оборудования с томографом осуществлялась с помощью устройств и программного обеспечения, разработанных автором диссертационной работы.

Созданный комплекс оборудования и программного обеспечения был апробирован в ряде работ (Холодный и др., 2021; Малахов и др., 2023; Ushakov et al., 2019; Orlov et al., 2020; Kholodny et al., 2021a; Kholodny et al., 2021б).



Рисунок 2.3 — Компоненты экспериментальной установки фМРТ-МРТсП в работе

Для получения структурного T1-взвешенного сагиттального трехмерного изображения использовалась последовательность быстрого градиентного-эха со следующими параметрами: 176 срезов,  $TR = 1900$  мс,  $TE = 2,19$  мс, толщина среза = 1 мм, угол поворота =  $90^\circ$ , время инверсии = 900 мс,  $FOV = 250$  мм x 218 мм<sup>2</sup>, размер вокселя 1x1x1 мм<sup>3</sup>. Данные фМРТ были получены со следующими параметрами: 51 срез,  $TR^{1)}$  = 1110 мс,  $TE = 24$  мс, толщина среза = 2 мм, угол поворота =  $90^\circ$ ,  $FOV = 192 \times 192$  мм<sup>2</sup>, размер вокселя 2x2x2 мм<sup>3</sup>. Применялись многосрезовые фМРТ-последовательности (Larkman et al., 2001).

#### 2.4. Средства обработки данных

Запись и обработка МРТсП-данных осуществлялась программным обеспечением, разработанным автором диссертационной работы, на языках

<sup>1</sup>  $TR$  (Time of Repetition) — период циклического повторения регистрации функциональных данных по объему мозга во время выполнения фМРТ.

Ассемблер, C++ и Python (Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ № 2021618804; и № 2022662059). Статистические расчеты проводились с помощью открытого программного обеспечения JASP версии 0.14.1 (Амстердам, Нидерланды). Обработка фМРТ-данных осуществлялась в программном пакете FSL версии 6.0 (Оксфорд, Великобритания). Численное моделирование фильтров проводилось при помощи пакетов TINA-TI версии 7.0.30.267 (Будапешт, Венгрия) и Octave версии 4.4.0 (лицензия GNU GPLv3). Более подробно специфика обработки данных описана в последующих главах.

## **2.5. Анатомический атлас, используемый в работе**

Для соотнесения фМРТ-данных со структурами мозга в диссертационной работе используется широко применяемый при обработке фМРТ-данных объединенный атлас структур мозга человека, включенный в программный пакет CONN (Whitfield-Gabrieli et al., 2012). Некоторые исследователи считают, что более корректно ссылаться не на «объединенный атлас CONN», а на несколько других известных атласов, из которых он собран — «FSL Harvard-Oxford Atlas» (Frazier, 2005; Desikan et al., 2006; Makris et al., 2006; Goldstein et al., 2007) и «AAL Atlas» (Tzourio-Mazoyer et al., 2002), что и указывается в документации к программному пакету CONN. Такая ситуация обусловлена тем, что авторы пакета CONN не составили исходные атласы, не выполнили их обобщенную публикацию в рецензируемых журналах и представили их только в составе программного пакета CONN. Вместе с тем, такой объединенный атлас представляет собой самостоятельный интерес — он встроен в пакет CONN, а также успешно используется множеством специалистов по всему миру для самых разнообразных задач. В диссертационной работе для упрощения терминологии для этого атласа используется условное название — «Атлас CONN».

В приложении А приведена иллюстрация (рисунок А.1) одного из срезов «Атласа CONN», выполненная в специально разработанной автором работы палитре цветов, а также таблица сокращенных и полных названий областей мозга по указанному атласу вместе с переводом их на русский язык (таблица А.1). На

рисунке А.2 приведены трехмерные проекции структур головного мозга человека по «Атласу CONN».

Необходимо отметить, что указанные в приложении А и используемые в диссертационной работе названия областей мозга по «Атласу CONN» (Clark et al., 2020, table S1) не соотносятся напрямую с цитоархитектоническими полями Бродмана и другими классическими анатомическими атласами в силу специфики выделения таких областей по МРТ- и фМРТ-данным. Указанные названия следует использовать лишь для примерного соотнесения с классическими системами нотации анатомических областей.

В силу указанных особенностей, перевод названий областей мозга на русский язык (также приведенный в приложении А) следует воспринимать лишь как примерное указание на анатомическую область, но не ее точное определение.

## **2.6. Предобработка фМРТ-данных**

Диссертационная работа выполнялась в формате комплексного проекта, регистрация и предобработка данных осуществлялась с участием сотрудников лаборатории прикладной и экспериментальной психофизиологии НИЦ «Курчатовский институт» при участии автора диссертационной работы. Структурные МРТ и фМРТ-данные были предобработаны экспертом (В.А. Орлов) для устранения помех и искажений сигнала различной природы. Подробно процедура предобработки фМРТ-данных, полученных с помощью многосрезовых фМРТ-последовательностей, описана в ряде работ (Орлов, 2021; Орлов и др., 2024). Краткий алгоритм действий:

- а) преобразование форматов файлов;
- б) центрирование изображений в передней комиссуре;
- в) коррекция артефактов движения головы участника эксперимента с помощью библиотеки BROCCOLI;
- г) исправление артефактов неоднородности магнитного поля с помощью взвешивающих функций, рассчитанных на основе измеренных параметров неоднородности;

д) коррекция временного сдвига, в рамках которой фазы сигналов интерполируются к указанному временному отсчету внутри одного  $TR$ ;

е) трансформация данных в пространство MNI-152;

ж) для удаления артефактов, создаваемых многосрезовыми фМРТ-последовательностями с  $TR=1110$  мс, было выполнено ICA-преобразование. Перед ним удалены немозговые воксели, «выполнена нормализация медианы интенсивности всего набора функциональных данных одним мультипликативным фактором» (Орлов и др., 2024), удалены низкочастотные компоненты сигнала — «подгонка по Гауссу по методу наименьших квадратов по прямой линии с сигмой 50 с» (Орлов и др., 2024). «Шумовые» компоненты ICA выбирались вручную (Griffanti et al., 2017) и удалялись из фМРТ-сигнала;

з) сглаживание данных Гауссовым фильтром с ядром  $6 \times 6 \times 6$  мм<sup>3</sup> (ширина на половине максимального значения).

## **2.7. Особенности технологии повышения частоты дискретизации фМРТ-данных при обработке и визуализации временных рядов фМРТ-сигнала**

При вычислении амплитудных оценок и визуализации временных рядов фМРТ-сигнала (см. раздел 4.2.3 ниже) использовалось повышение частоты дискретизации ( $f_s$ ) записи с 0,9 Гц ( $TR = 1110$  мс) до 10 Гц. Эта процедура при ее корректном выполнении не дает новой частотной информации о сигнале (Лайонс, 2006), в отличие от сокращения  $TR$ , но необходима для предотвращения искажения фазовой компоненты сигнала с помощью более точного совмещения сигналов с временными отметками подачи стимулов; а также полезна для более наглядной визуализации сигналов.

Процедура повышения частоты дискретизации фМРТ-данных требует специального рассмотрения, так как она не применяется при стандартном GLM-анализе (в этом случае она некорректна и избыточна — см. далее). Опасность передискретизации данных в случае фМРТ-анализа заключается в следующем: повышение  $f_s$  может привести к появлению гармоник выше частоты Найквиста,

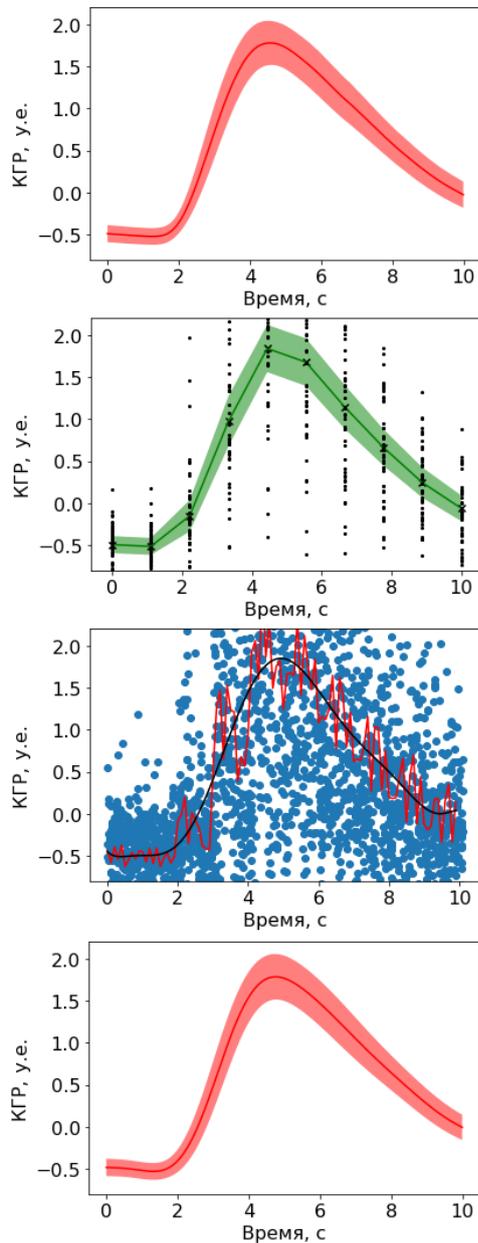
отсутствовавших в исходном сигнале (если процедура выполнена некорректно); увеличение числа отсчетов в сигнале понизит  $p$ -значение при статистическом анализе, если это число отсчетов используется в качестве числа  $n$  при вычислении статистики (как это имеет место в случае GLM-анализа первого уровня).

Для решения первой проблемы при интерполяции следует использовать удаление гармоник (антиальясинг) с частотой выше исходной частоты Найквиста (Лайонс, 2006). Для этого применяется, например, сглаживание интерполированного сигнала прямоугольной оконной функцией, которое эффективно устраняет гармоники выше исходной частоты Найквиста, или другие методы. Что касается анализа фазы сигнала при повышении  $f_s$ , то следует учесть, что частота Найквиста ограничивает только спектральные свойства сигнала, но никак не ограничивает точность определения фазы низкочастотного сигнала. Поэтому даже относительно медленный фМРТ-сигнал пригоден для фазового анализа активаций с точностью намного превышающей  $TR$  (при соотношении сигнал-шум, достаточном для определения фазовых характеристик), если использовать для этого усреднение сигнала с повышением  $f_s$  (или другие специально предназначенные для этого техники).

Вторая приведенная выше проблема (понижение  $p$ -значения при повышении числа отсчетов) возникает только в случае GLM-анализа первого уровня, в котором число отсчетов непосредственно входит в формулу вычисления статистических параметров. Если же число отсчетов не участвует в вычислении  $p$ -значений (далее в диссертационной работе в качестве числа  $n$  при групповом анализе на основе амплитудных оценок применяется исключительно размер выборки), то нет никаких формальных препятствий для повышения частоты дискретизации фМРТ-сигнала.

Для демонстрации корректности и необходимости повышения частоты дискретизации при обработке временных рядов фМРТ-сигнала далее был выполнен анализ хорошо изученного сигнала — КГР. Этот сигнал был записан с высокой частотой дискретизации, а затем  $f_s$  была принудительно понижена до значений, характерных для сигнала фМРТ (0.9 Гц). Далее приведено сравнение

различных способов обработки такого сигнала с исходными данными (рисунок 2.4).



а) исходный сигнал КГР,  $f_s=100$  Гц

б) понижение  $f_s$  сигнала КГР до 0,9 Гц без фазовых коррекций. Черными точками показаны усредненные по предъявлениям сэмплы для отдельных испытуемых ( $n=46$ ), расположенные кратно периоду сигнала

в) понижение  $f_s$  сигнала КГР до 0,9 Гц с фазовой коррекцией каждого сэмпла. Синими точками обозначены сэмплы для отдельных предъявлений с поправкой на индивидуальную фазу сэмпла относительно стимула. Красная и черная линия — аппроксимация различными способами (усреднением по бином 0,1 с и полиномом 10-й степени)

г) обратное повышение  $f_s$  сигнала КГР с 0,9 до 100 Гц перед усреднением

Рисунок 2.4 — Усредненный сигнал КГР ( $n=46$ , ТСИ, значимые стимулы, нормировка амплитуды на общее стандартное отклонение сигнала в записи) в условных единицах (arbitrary units, у.е.), обработанный с помощью различных способов повышения частоты дискретизации. Заливкой показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок,  $p<0,05$

На рисунке 2.4 «а» показан сигнал с исходной  $f_s=100$  Гц. Следует обратить внимание на конфигурацию начального двухсекундного отрезка, характеризующегося отсутствием повышения сигнала в течение почти всего этого интервала.

На рисунке 2.4 «б» показан сигнал с понижением  $f_s$  до 0,9 Гц без каких-либо фазовых коррекций. Все точки сигнала (показаны черным цветом) расположены кратно периоду, обратному  $f_s$ . Такой сигнал не только хуже воспринимается визуально, но и содержит фазовые искажения — возрастание сигнала начинается уже с 1 с. При этом пиковое значение по времени совпадает с исходным, что говорит о невозможности исправления искажений в этом случае простым сдвигом данных.

На рисунке 2.4 «в» использовалась технология восстановления фазовых свойств сигнала без повышения  $f_s$ . При наличии большого количества данных возможно разместить каждый сэмпл (без усреднения по предъявлениям) на диаграмме рассеяния с поправкой на индивидуальную фазу сэмпла (аналогично методу коррекции срезов — slice timing correction, — но по отношению к объемам). Далее может быть выполнена аппроксимация различными способами (красная и черная линия здесь — аппроксимация усреднением по бинам 0,1 с и полином 10-й степени, соответственно). Такой способ анализа может быть использован в некоторых случаях, но обладает существенными недостатками: в сигнале могут появиться частотные компоненты, которых не было в исходном сигнале (красная линия на рисунке 2.4 «в»); этот метод труден в реализации; происходит инфляция данных, так как число  $n$  умножается на число предъявлений.

Более простой и в тоже время более математически корректный способ сохранить фазу исходного сигнала в данном случае — повысить частоту дискретизации путем интерполяции с удалением гармоник с частотой выше исходной частоты Найквиста, отсутствовавших в повышаемом сигнале (Лайонс, 2006). В зависимости от конкретной реализации метода передискретизации может потребоваться также сдвиг массива данных на половину периода предыдущей  $f_s$ . Этот способ позволяет легко сопоставить сигнал с временными отметками предъявления стимулов с достаточной точностью и предотвратить фазовые искажения.

Полученный в результате усредненный сигнал (рисунок 2.4 «г») практически полностью совпадает с исходным (рисунок 2.4 «а») — корректно воспроизведен двухсекундный начальный участок, при этом не добавились шумовые высокочастотные компоненты.

Далее была выполнена визуализация временных рядов фМРТ-сигнала таламуса ( $n=46$ , ТСИ, значимые стимулы), обработанных без повышения частоты дискретизации (рисунок 2.5 «а») и с повышением до 10 Гц описанным способом (рисунок 2.5 «б»).

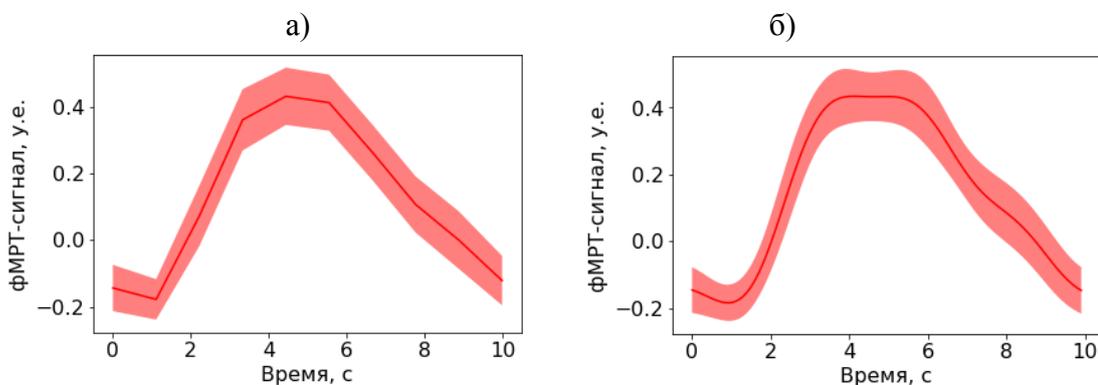


Рисунок 2.5 — Усредненный фМРТ-сигнал таламуса ( $n=46$ , ТСИ, значимые стимулы), без повышения  $f_s=0,9$  Гц,  $TR=1,11$  с (а); и с повышением  $f_s$  до 10 Гц (б). Заливкой показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок,  $p<0,05$

Визуализация без повышения частоты дискретизации и коррекции фазы (рисунок 2.5 «а») приводит к существенному искажению фазовых свойств сигнала. Сигнал «упрощается» и становится похож на «стандартный» гемодинамический ответ, затрудняется анализ точек перегиба, пропадает разделение сигнала на компоненты.

Визуализация с повышением  $f_s$  (рисунок 2.5 «б») показывает наличие в сигнале двух компонентов с пиками в районе 3,5 и 5,5 с (для таламуса). Такой анализ может давать важную информацию об активности мозга, недоступную стандартным способам; показывает индивидуальный характер гемодинамического ответа в различных областях мозга (что рассмотрено далее в главах 4 и 5).

### **Глава 3. Объективный критерий для выбора и оптимизации параметров обработки данных психофизиологических исследований**

В третьей главе рассматривается теоретически и апробируется экспериментально развиваемый автором данной диссертационной работы подход к выбору способов обработки данных психофизиологических исследований и настройке отдельных параметров обработки данных. Одной из особенностей описанного подхода является то, что в основе него лежит психологическое понятие субъективной значимости, при этом в качестве оптимизационной метрики используется объективный критерий — процент совпадений стимулов, заданных априорно как субъективно значимые, со стимулами, выделенными в процессе обработки данных (подробнее см. в следующем разделе). Слово «объективное» здесь используется не в философском понимании независимой от исследователя истины, а как техническое противопоставление явным образом «необъективному» — тем методам, критериям и т.д., которые не могут считаться объективными ни при какой интерпретации в рамках философии науки, которые изначально подразумевают существенный «человеческий фактор» (неправильное использование оборудования, некорректная обработка данных и т.д.). В более широком контексте разрабатываемый методологический подход может быть интересен в плане реализации той задачи психологии, которая была сформулирована В.П. Зинченко и М.К. Мамардашвили как объективное познание субъективной реальности: «Познать ее как таковую — единственная возможность для психологии как науки объективно развернуть субъективное и задать его в действиях вещей и мира» (Зинченко, Мамардашвили, 1977, с. 112).

В третьей главе с помощью разработанного подхода производится выбор параметров и способов обработки и сигналов ФПГ и КГР, полученных в ходе

исследований с применением совместной регистрации физиологических сигналов с помощью МРТсП и фМРТ.

### 3.1. Постановка проблемы и обоснование решения

При использовании широкого спектра современных средств психофизиологических исследований (ЭЭГ, фМРТ, полиграф и т.д.) в силу размытости границы между свойствами «сигнала» и «шума» существует проблема выбора оптимальных параметров обработки полученных физиологических сигналов. Недостатки существующих подходов к решению этой проблемы рассмотрены в обзоре литературы.

За основу решения может быть взят подход, выработанный в криминалистической практике использования полиграфа для выявления следов скрываемой информации. Для настройки параметров обработки используются стандартные тесты с заведомо значимым для человека стимулом (Холодный и др., 2021), что можно рассматривать как форму критериальной валидации на основе биографических данных (Малахов и др., 2023).

Для более последовательной и теоретически обоснованной формулировки решения требуется ввести термины *прямой* и *обратной психофизиологической задачи* (Малахов, 2024). Тогда в основе подхода будет лежать итерационное решение прямой и обратной задачи (в широком значении этих терминов), учитывая, что в общем случае качество решения обратной задачи зависит от качества решения прямой задачи. Прямая задача: установление наблюдаемых величин по заданным параметрам модели. Обратная задача: выявление параметров модели по наблюдаемым величинам.

Здесь следует сделать два примечания. Первое — указанные определения напоминают два типа логического вывода (*inference*) — дедуктивный (вывод следствий на основе теории) и индуктивный (построение обобщений на основе наблюдений), соответственно. Однако со времен Аристотеля эти понятия приобрели различные толкования и излишние ассоциации (например, гипотетико-

дедуктивный метод). Поэтому здесь приводятся более формальные определения, связанные непосредственно с вычислениями.

Второе примечание заключается в том, что указанное совместное использование индуктивного и дедуктивного вывода может иметь биоподобную основу. В методологии науки они нередко противопоставлялись, хотя ряд философов говорил об их взаимном дополнении (Маркс, Энгельс, 1961, с. 542-543). В.Л. Бианки было выдвинуто предположение, что эти механизмы используются совместно на уровне физиологии мозга человека и животных (со спецификой в правом и левом полушариях) (Бианки, 1985). Выше приведено обоснование эффективности такого сочетания — качество решения обратной задачи зависит от качества решения прямой задачи, что дает критерий для решения оптимизационных задач в условиях отсутствия разметки исходных данных и эталонных средств контроля. Возможно, в мозге производится постоянное сличение результатов, полученных на основе этих двух противоположных принципов. Эта идея развивается далее и обосновывается ее перспективность для исследования мозга.

Во многих психофизиологических методах используется математическое решение обратной задачи по нахождению модельной активности мозга по регистрируемым тем или иным способом сигналам (томография, электроэнцефалография и т.д.). Однако само психофизиологическое исследование во многих случаях можно рассмотреть как прямую задачу — в эксперименте при помощи инструкции задается психическое состояние объекта исследования, а найти требуется связанные с этим состоянием физиологические маркеры. При этом обратная томографическая задача встраивается в *прямую* психофизиологическую задачу как технический элемент анализа данных.

В психофизиологии можно найти примеры и *обратной* психофизиологической задачи: психофизиологическая диагностика функциональных состояний (Леонова, 1984), включая диагностику состояния сна и утомления оператора (Дорохов, 2013); криминалистическая диагностика скрываемой информации с помощью выявления субъективной значимости этой

информации психофизиологическими методами (Холодный, 2000); детектирование интенции субъекта в задачах нейроуправления на основе нейроинтерфейсов (Kaplan et al., 2009). Фактически все психофизиологические методы диагностики можно отнести к классу обратных психофизиологических задач.

Развернутое определение понятия «диагностика» дано Е.А. Кротковым и Т.В. Носовой (Кротков, Носова, 2009). Отличием диагностики от исследования по мнению этих авторов является фиксированный (априорный) набор диагностируемых свойств объекта, тогда как в исследовании могут обнаруживаться новые категории свойств объекта (Кротков, Носова, 2006; Кротков, Носова, 2009). С такой широкой трактовкой слова «диагностика» можно поспорить — все-таки в русском языке это слово обычно используется по отношению к нарушениям функционирования биологических или технических систем. Есть более подходящие слова для обозначения рассматриваемого понятия: «детектирование», «выявление», «обнаружение», «определение наличия», «классификация» и т.д. При этом слово диагностика остается только для обозначения выявления нарушений функционирования чего-либо.

Следует заметить, что психофизиологических исследований, решающих обратную психофизиологическую задачу и не являющихся при этом диагностикой (детектированием) известных состояний, относительно мало. В качестве примеров можно назвать исследование структуры индивидуального опыта животных по нейрофизиологическим данным, включая исследование изменений этой структуры в ходе экспериментальных воздействий, в школе системной психофизиологии (Швырков, 1995; Швырков, 2006; Александров И.О., 2006; Александров, 1989; Александров, Шевченко, 2004; Александров, 2003; Александров, 2020; Alexandrov et al., 1990б); обнаружение Ю. Азеринским, Н. Клейтманом и др. скрытой структуры сна с помощью полисомнографии (Дорохов и др., 2023); построение и сопоставление пространств цветового восприятия различных животных по активности нейронов (Измайлов и др., 2006). К этой же категории исследований можно отнести выявление прогностических

психофизиологических факторов в отношении будущих психологических проявлений, включая девиантное поведение (Корнеев и др., 2021).

Таким образом, предложенное решение для сопоставления психофизиологических методов и настройки параметров обработки данных можно сформулировать как итерационное повторение комбинации прямой и обратной психофизиологической задачи с варьированием параметров и оценкой метрики качества решения обратной задачи.

Одним из примеров применения такого решения является весь процесс разработки нейроинтерфейсов: успешность детектирования интенции субъекта (обратная задача) определяется качеством решения прямой задачи — выявления маркеров активности мозга, связанных с заданным психическим состоянием субъекта, включая все промежуточные задачи, такие как регистрация и обработка сигналов. При этом в процессе разработки эти две задачи постоянно повторяются с варьированием параметров в прямой задаче и измерением успешности решения обратной задачи.

В практическом плане может быть интересен и другой пример (вероятно, более ранний и более простой в реализации) — для настройки параметров обработки данных используются тесты с заведомо значимым для человека стимулом, разработанные в криминалистической практике исследований с применением полиграфа. Обратной задачей здесь является диагностика субъективной значимости стимулов с определением стимулов, имеющих максимальную субъективную значимость в ряду других. Успешность ее выполнения зависит от качества решения прямой задачи — регистрации и обработки физиологических сигналов и выявления информативных маркеров. В качестве численного критерия успешности выполнения обратной задачи здесь может выступать процент совпадений (ПС) стимулов, диагностированных как субъективно значимые, с априорно заданными (подробнее см. в следующем разделе).

В литературе для определения информативных параметров физиологических сигналов нередко применяется парадигма «период активности

— пауза» (Bach et al., 2013; Posada-Quintero et al., 2016), когда определение параметров осуществляется по разнице сигналов между периодом выполнения задачи и паузой. Такой подход имеет недостаток, заключающийся во влиянии помех, не связанных с исследуемым психологическим явлением (например, наличие или отсутствие движений конечностей, вербальных ответов, глазодвигательной активности во время чтения и т.д.). В предлагаемом подходе используется другой способ: *предъявляется ряд похожих стимулов, один из которых отличается по исследуемому психологическому свойству (субъективной значимости)*. Отчетное действие участника эксперимента, если оно требуется, также должно быть одинаковым. Оптимизационная задача (по аналогии с машинным обучением) состоит в том, чтобы настроить параметры обработки данных таким образом, чтобы определить по зарегистрированным данным, какой стимул был значимым. При этом требуется обрабатывать все активации одинаковым образом, чтобы не было предпочтения одному из стимулов.

Применение машинного обучения в чистом виде в психофизиологии сталкивается с недостаточным количеством данных для автоматического обучения, в результате чего проявляется проблема «переобучения»<sup>1)</sup> нейросетей. В диссертационной работе предложен компромиссный вариант между полностью автоматической и полностью экспертной настройкой. Сначала автоматически строится график ПС (путем полного перебора диапазона значений с заданным шагом, что возможно благодаря относительно небольшому числу настраиваемых параметров). Далее по графику выбираются параметры обработки. В случае выхода графика на плато оптимальных значений приоритет отдается более консервативным значениям, имеющим более широкое плато оптимумов. Описанная процедура соответствует по своей сути методу градиентного спуска (поиск минимума функции ошибки), но при этом позволяет избежать типичной проблемы «переобучения» нейросетей, фиксации на локальных оптимумах, свойственной небольшим выборкам. В результате, хотя полная автоматизация не

---

<sup>1</sup> То есть фиксация алгоритма на локальных оптимумах вместо продолжения поиска глобального оптимума (подробнее см., например, Николенко и др., 2019).

достигается, повышается объективность настройки параметров за счет использования при выборе параметров объективного критерия качества обработки данных.

Важным является вопрос релевантности стимулов, то есть то, что внешний критерий значимости соответствует действительной субъективной значимости. Может так оказаться, что по каким-то причинам в выборке будет некоторое количество людей, для которых произнесение собственного имени, обозначенного в паспорте, или визитная карточка, выбранная самим участником эксперимента, будут в текущий момент менее значимыми, чем альтернативное имя или визитная карточка. Это может произойти из-за высокой значимости в данный момент какого-либо из альтернативных имен, противодействием участника эксперимента и т.д. Эту проблему можно решить простым количественным способом — оценить на выборке величину ПС, полученную максимально эффективным методом. Например, если ПС по каналу КГР составляет примерно 90-100 %, это означает, что для оставшегося числа людей (0-10 %) несовпадения могут быть обусловлены двумя причинами: а) неточностью измерений; б) действительной нерелевантностью стимулов. Это число несовпадений (10 % и меньше) составляет относительно небольшую часть выборки, и им можно пренебречь в контексте данной работы. Для остальных же участников эксперимента стимулы можно считать релевантными.

Описанный подход имеет устойчивость к перекосу в сторону ошибок первого или второго рода, свойственному анализу данных, основанному только на статистических критериях. При использовании статистических критериев есть вероятность перекоса в сторону ошибок первого или второго рода в зависимости от произвольно задаваемого уровня значимости альфа. Если же в качестве критерия используется успешность выполнения обратной психофизиологической задачи, то ошибки и первого, и второго рода будут одинаково снижать критерий в процессе итерационной оптимизации, что потребует их балансировки для максимизации критерия.

### **3.2. Экспериментальная апробация предложенного решения**

С помощью описанного выше подхода далее выполняется выбор наиболее оптимальных (по метрике ПС) значений следующих параметров обработки сигналов КГР и ФПГ: частотный диапазон фильтрации, порядок фильтров, время начала и конца эпохи анализа.

#### **3.2.1. Наборы данных для оптимизации и валидации**

В данной задаче была использована подвыборка 46 человек (23 мужчины и 23 женщины, студенты технического вуза, возраст 21-23 года). В качестве оптимизационного (обучающего) набора данных были применены тесты ТСИ на мужской и женской выборке, а также тест ТЗВ на мужской выборке. В качестве валидационного набора данных применялся тест ТЗВ на женской выборке, причем ключи для этого теста не раскрывались во время подбора параметров. При создании валидационного набора данных преднамеренно не применялось расщепление выборки случайным образом на две статистически однородные половины, так как задача состояла в том, чтобы проверить устойчивость полученных параметров при переходе на новые выборки, которые могут отличаться по динамике физиологических процессов (Холодный и др., 2021).

#### **3.2.2. Процедура вычисления автоматических количественных оценок и ПС**

Сигнал КГР и ФПГ с аппаратной частотой дискретизации МРТсП 1000 Гц подвергался понижению частоты дискретизации до 100 Гц. Далее итерационно производилась цифровая частотная фильтрация при помощи фильтров Баттерворта. После фильтрации выделялись эпохи анализа с заданным интервалом от момента предъявления стимула (рисунок 3.1). Подробнее варьирование параметров фильтрации и эпох анализа описано в следующем разделе.

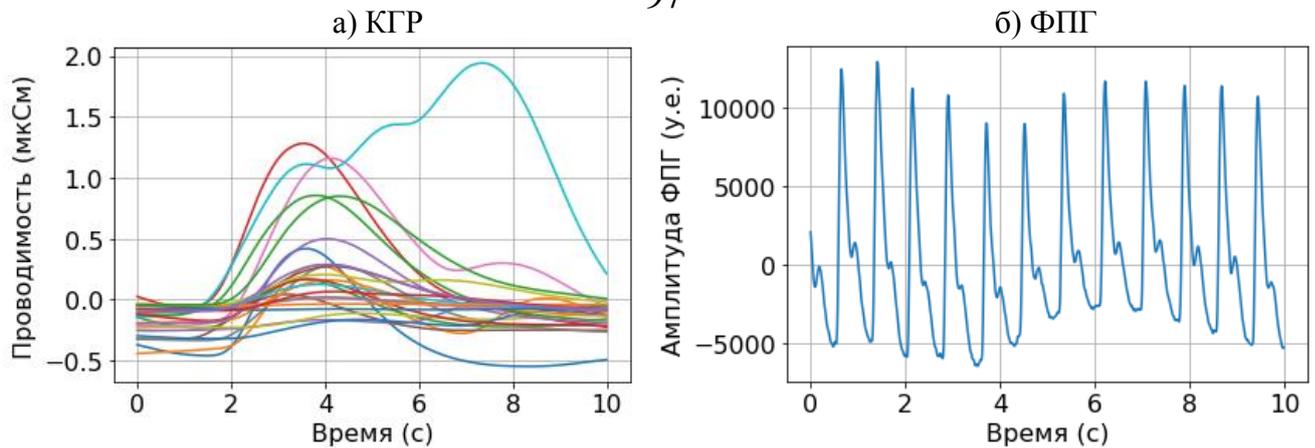


Рисунок 3.1 — Пример сигнала КГР (а), разделенного на эпохи по 10 с, для одного участника эксперимента; и одной эпохи сигнала ФПГ (б) в ненормированных условных единицах (arbitrary units, u.e.). Характерным признаком активации для сигнала ФПГ является понижение амплитуды (огигающей сигнала) в районе 2-6 секунд

Полученные полиграммы анализировались по следующему алгоритму (см. также рисунок 3.2):

а) вычисление величин активаций для отдельных стимулов. Сигналы КГР и ФПГ для унификации анализировались одинаковым способом — по «длине линии» (сравнение этого способа вычисления амплитуды активаций с альтернативными приводится в последующих разделах). На каждой эпохе анализа вычислялась величина изменения сигнала: подсчитывалась сумма модулей изменения амплитуды на каждом шаге дискретизации. Эта величина в определенном приближении соответствует графической длине линии сигнала, рассматриваемой в ряде работ (Калафати, 2021; Elaad, Ben-Shakhar, 2006; Vandenbosch et al., 2009), но при этом не приводит к возникновению нелинейности в случае маленьких реакций или при изменении графического масштаба амплитуды. В результате выполненной операции получают наборы чисел (по одному для каждого предъявления вопроса), характеризующие величину активаций;

б) далее, как было сказано в разделе 2.2, из анализа удалялись «нулевые» предъявления;

в) оставшиеся численные оценки активаций нормировались на стандартное отклонение по всем активациям для каждого участника эксперимента отдельно;

г) нормированные  $z$ -оценки активаций (25 для ТСИ и 30 для ТЗВ) усреднялись по предъявлениям, в результате чего получалось 5 чисел, соответствующих каждой группе стимулов. Эти  $z$ -оценки в дальнейшем называются автоматическими количественными оценками (АКО) величин активаций для каждой группы стимулов;

д) для сигнала ФПГ полученные оценки умножались на весовой коэффициент  $-1$ , так как в большинстве случаев лично значимые стимулы связаны с уменьшением амплитуды ФПГ (см. рисунок 3.1 «б» выше, а также раздел 3.3.3);

е) для некоторых задач на данном шаге вычислялась объединенная оценка по каналам КГР-ФПГ путем сложения  $z$ -оценок. На данном шаге определены АКО для каналов КГР, ФПГ и объединенная АКО КГР-ФПГ;

ж) по полученным АКО для каждой группы стимулов выбиралась та группа, которая получила максимальное значение АКО;

з) полученная группа сравнивалась с априорно заданной группы стимулов, которая должна иметь по условиям эксперимента высокую субъективную значимость. Например, в ТСИ такой группой были 5 предъявлений собственного имени человека; в ТЗВ — предъявления информации с визитки (фамилия человека с визитки, его место работы и т.д.), выбранной испытуемым. В результате выполнения этой операции получается число: 1 — в случае совпадения или 0 — в случае несовпадения;

и) указанные выше шаги повторялись для каждого участника эксперимента;

к) по итоговой таблице совпадений подсчитывался общий ПС (см. рисунок 3.2).

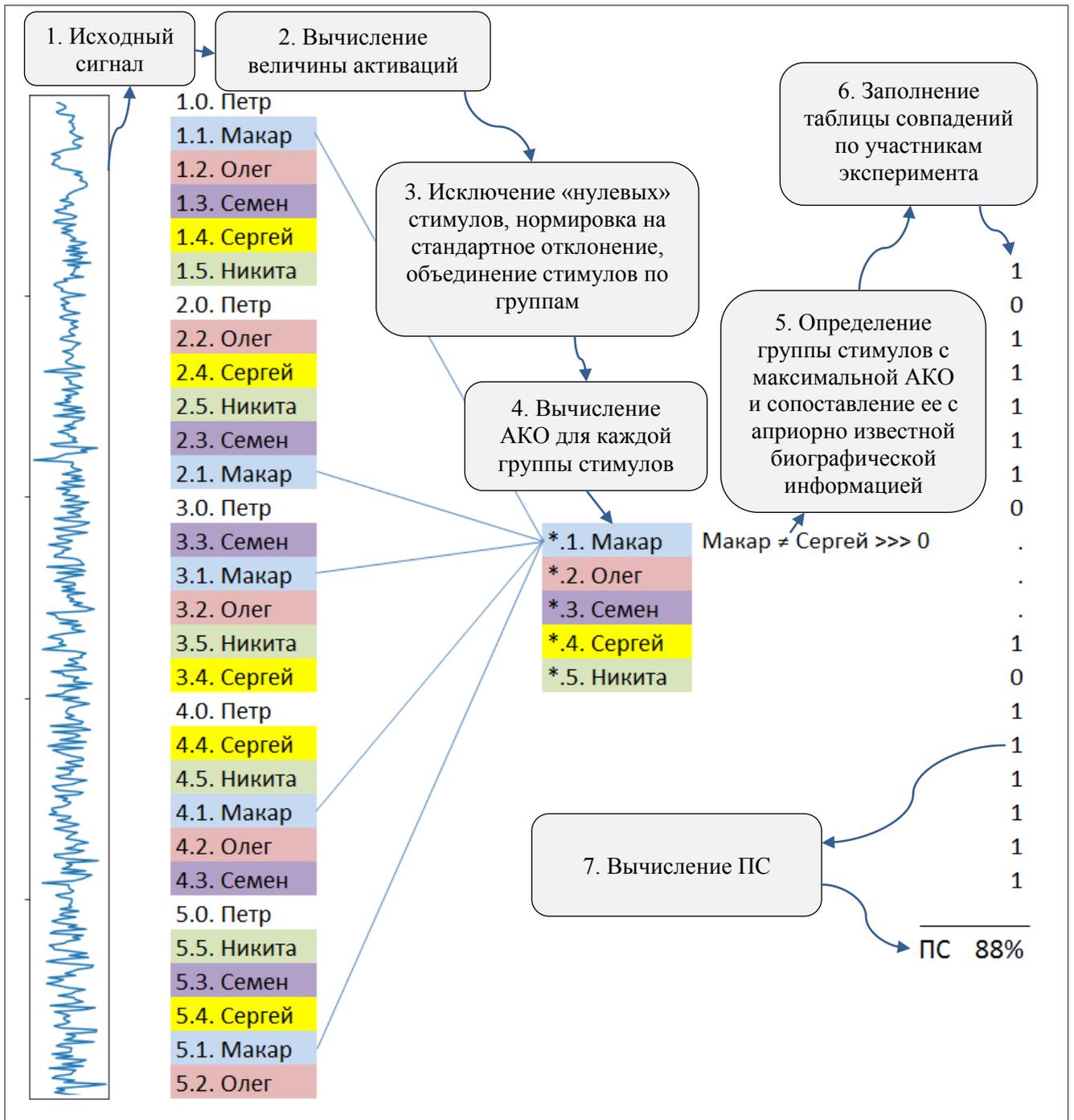


Рисунок 3.2 — Последовательность обработки данных для вычисления АКО и ПС. В качестве исходных данных брались сигналы КГР и ФПГ. Далее в четвертой главе по аналогичному алгоритму обрабатывались сигналы фМРТ

### 3.2.3. Процедура варьирования параметров

С целью графического отображения выходной метрики (в качестве которой используется ПС на основе АКО, как описано в предыдущем разделе) при различных параметрах обработки фильтрация сигнала проводилась итерационно с

варьированием параметров фильтров с заранее заданным шагом. Использовались фильтры Баттерворта верхних частот (ФВЧ) и нижних частот (ФНЧ). Порядок фильтров ФВЧ и ФНЧ задавался как ряд (1; 2; 3; 4; 8). Частота фильтров для сигнала КГР варьировалась в диапазоне 0,001-1,0 Гц в логарифмической шкале. Промежуточные значения частот были фиксированными и кратными ряду (1,0; 0,63; 0,4; 0,25; 0,16; 0,1). Частота фильтров для сигнала ФПГ варьировалась в диапазоне 0,02-20,0 Гц в логарифмической шкале. Промежуточные значения частот были фиксированными и кратными ряду (2,0; 1,25; 0,8; 0,5; 0,32; 0,2).

Интервалы анализа также варьировались. Для сигнала КГР начало интервала анализа в секундах от времени предъявления стимула соответствовало ряду (0,0; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0). Конец интервала анализа в секундах от времени предъявления стимула соответствовало ряду (4,0; 5,0; 7,0; 10,0; 12,0). Для сигнала ФПГ начало интервала анализа в секундах от времени предъявления стимула соответствовало ряду (0,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0). Конец интервала анализа в секундах от времени предъявления стимула соответствовало ряду (6,0; 7,0; 9,0; 10,0; 12,0).

### 3.2.4. Контрольные параметры для сравнения

В качестве контрольных параметров фильтрации и выделения эпох анализа использовались ранее вручную заданные экспертом-полиграфологом значения (приведены в таблице 3.1). Эти параметры задавались визуально по форме полиграмм с целью удобства экспертной балльной оценки полиграмм.

Таблица 3.1 — Контрольные параметры обработки сигналов полиграфа, заданные экспертно до выполнения процедуры оптимизации

Сигнал	Частота ФВЧ и ФНЧ	Порядок ФНЧ/ФВЧ	Начало и конец эпохи анализа от маркера предъявления вопроса
КГР	0,1-1,0 Гц	1/1	0-10 с
ФПГ	1-20 Гц	1/1	0-10 с

### 3.2.5. Оптимизация параметров обработки сигнала КГР

Вначале был произведен выбор порядка частотных фильтров Баттерворта. На рисунке 3.3 приведено распределение ПС в зависимости от порядка фильтров ФНЧ и ФВЧ, а также от их частоты среза.

По рисунку 3.3 видно, что наиболее устойчиво значимые стимулы выделяются при применении фильтров первого порядка — метрика ПС выходит на плато с широким диапазоном возможных частот фильтрации. При этом в случае применения фильтров второго порядка наблюдаются отдельные точки, в которых значение ПС выше. Однако эти выбросы нестабильны и, с высокой вероятностью, не будут воспроизведены в других условиях. Поэтому для сигнала КГР были выбраны для дальнейшей работы фильтры первого порядка.

Примечание — На иллюстрациях наблюдается симметрия распределений (за некоторыми исключениями) относительно диагонали, где частота ФНЧ меньше ФВЧ, а ФНЧ больше ФВЧ. Это может быть обусловлено особенностями реализации цифровых фильтров, так как фильтрация проводится не однопроходным полосовым фильтром, а двумя фильтрами ФНЧ и ФВЧ отдельно, при этом по амплитуде получившиеся сигналы выравниваются последующей нормировкой.

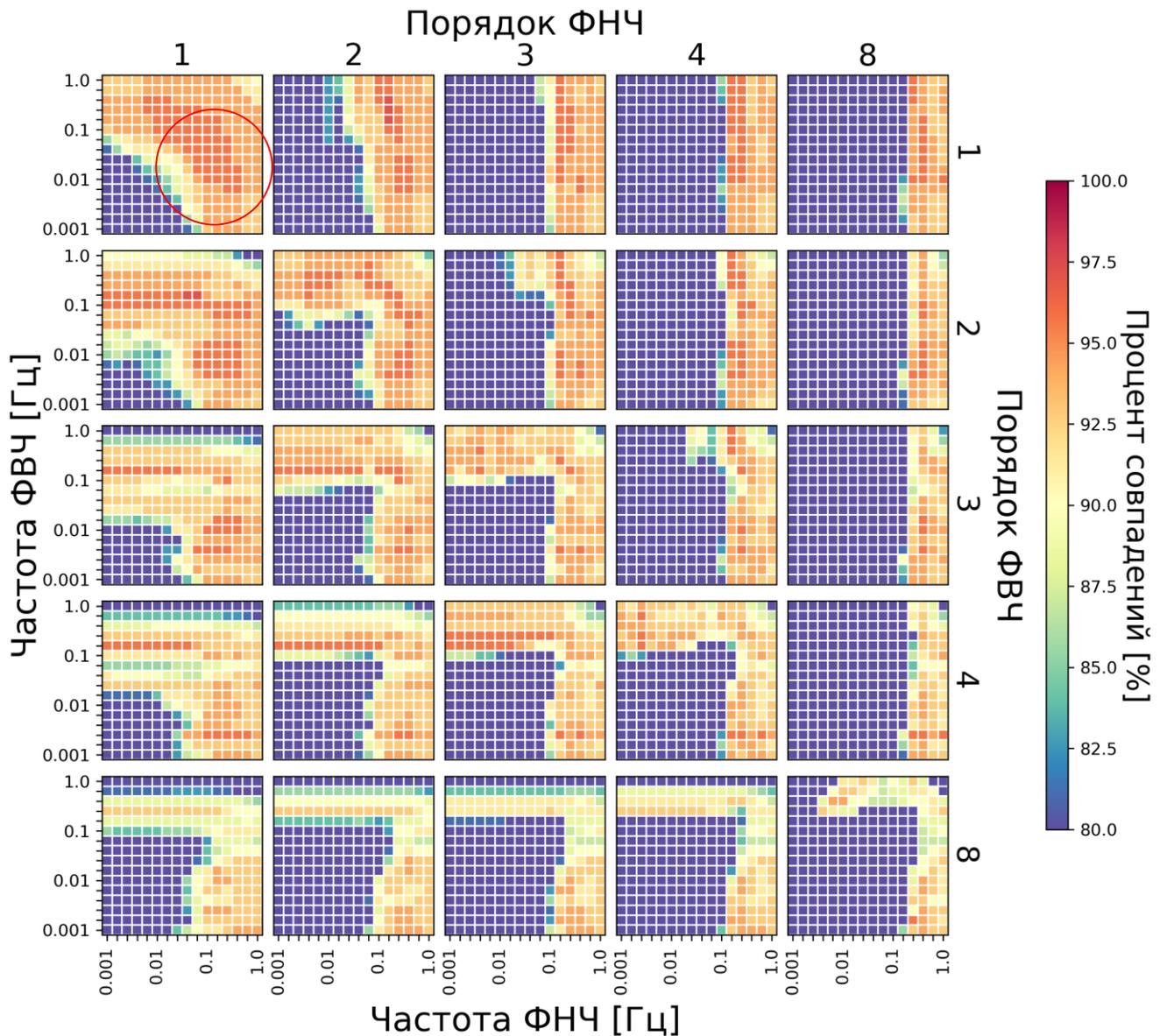


Рисунок 3.3 — Распределение ПС. Каждая точка на карте соответствует определенному диапазону частот фильтрации сигнала КГР, а также порядку фильтра. Приведены объединенные данные для трех тестов тренировочной выборки — ТСИ мужская, ТЗВ мужская и ТСИ женская

Далее, используя фильтры первого порядка, было построено распределение ПС в зависимости от интервалов анализа и также от частот фильтрации (рисунок 3.4). По данному распределению выбран интервал 1-7 с и частотный диапазон 0,025-0,25 Гц. Интервалы 1-5 и 2-5 с также показывают достаточно плотное распределение выходной метрики, но был выбран максимально широкий интервал для большей универсальности.

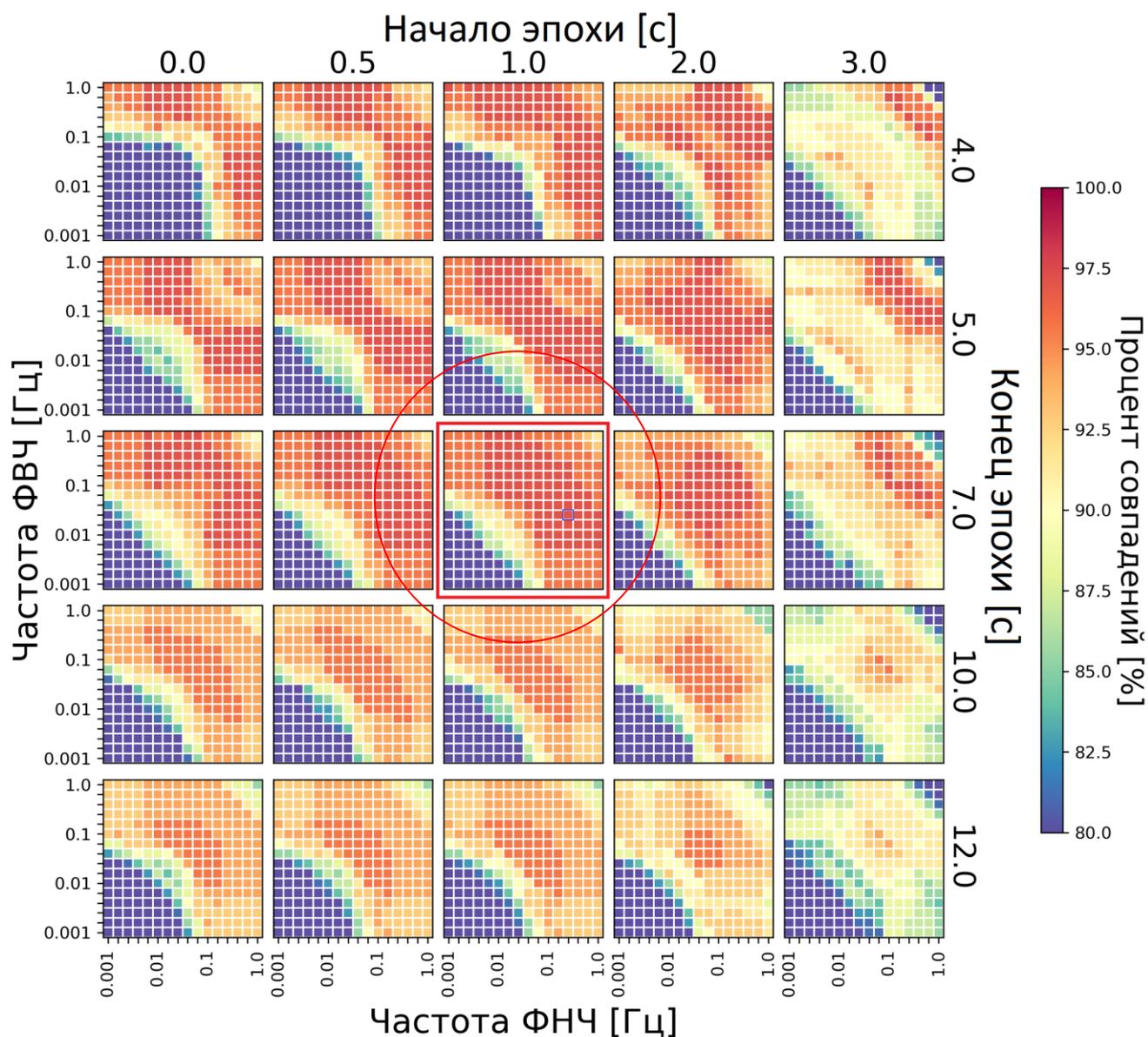


Рисунок 3.4 — Распределение ПС. Каждая точка на карте соответствует определенному диапазону частот фильтрации сигнала КГР, а также определенной эпохе анализа. Порядок фильтра фиксированный — первый. Красной и синей рамками выделен интервал 1-7 с и частотный диапазон 0,025-0,25 Гц. Приведены объединенные данные для трех тестов тренировочной выборки — ТСИ мужская, ТЗВ мужская и ТСИ женская

Графическая проверка на женской выборке ТЗВ (см. рисунок 3.5) показывает, что выбранные значения параметров (интервал 1-7 с и частотный диапазон 0,025-0,25 Гц) находятся вблизи центра плато максимальных значений ПС. Численно значение ПС составило 96 % и совпало с таковым для неоптимизированных контрольных параметров, заданных выше (таблица 3.1). При этом для контрольных параметров плато оптимумов имеет меньшую

площадь, что может говорить о том, что оптимизированные параметры более устойчивы к помехам, чем неоптимизированные.

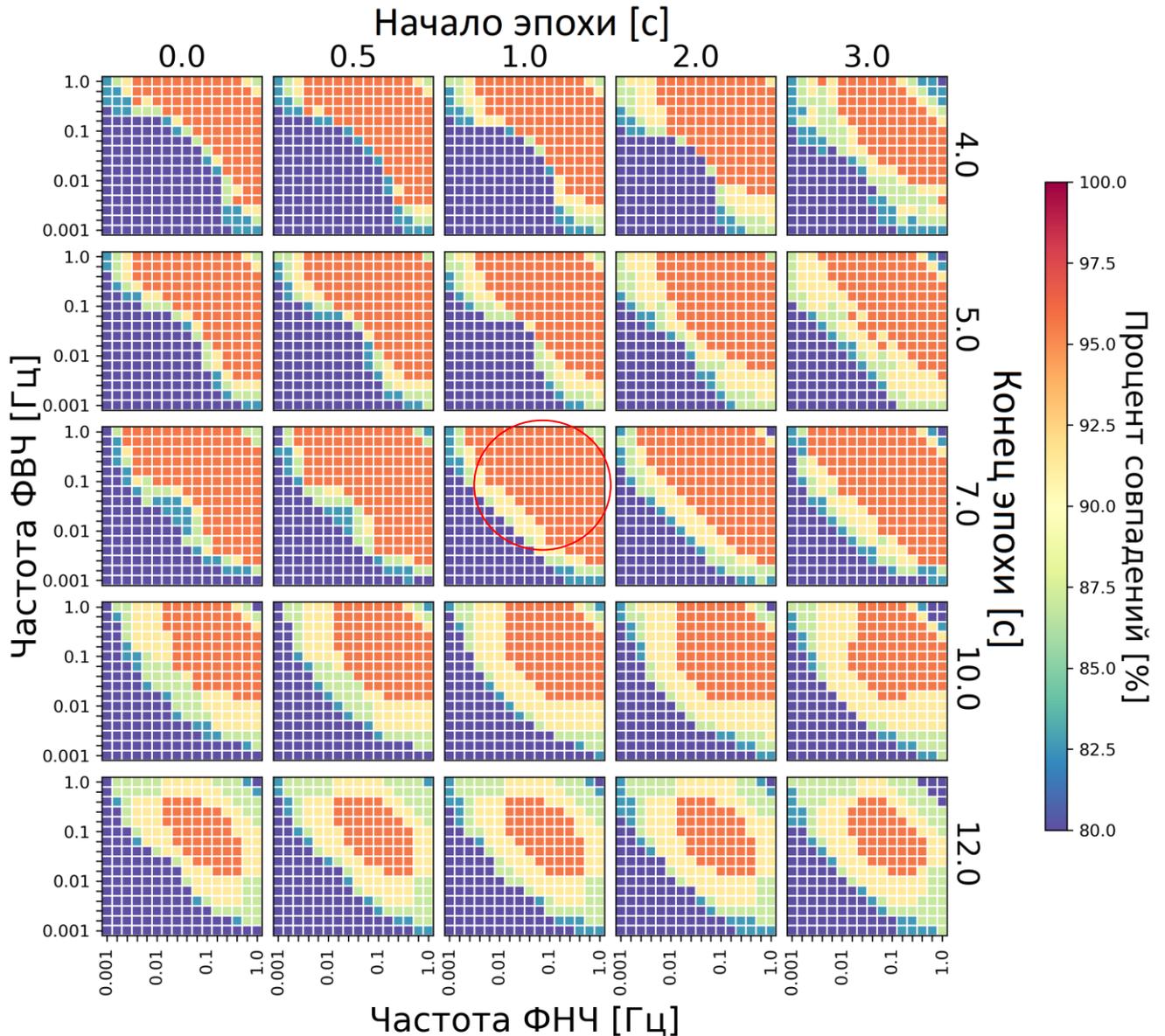


Рисунок 3.5 — Распределение ПС. Каждая точка на карте соответствует определенному диапазону частот фильтрации сигнала КГР, а также определенной эпохе анализа. Порядок фильтра фиксированный — первый. Приведены данные для валидационной женской выборки

ТЗВ

Сравнение (таблица 3.2) с контрольными параметрами (таблица 3.1) показывает, что применение оптимизированных параметров позволило численно улучшить частоту распознавания в одном из тестов (женская выборка ТЗВ) с 91 %

до 100 %. По остальным тестам результативность не изменилась, но надо заметить, что она и так была высокой.

Статистическая проверка различий выполнялась при помощи парного рангового критерия Вилкоксона по всем бинарным значениям совпадений или несовпадений, объединенных по всем тестам (N=92). Различия при применении оптимизированных и неоптимизированных параметров для КГР статистически незначимы ( $p > 0,05$ ). На валидационной выборке выходные значения совпадают. Это говорит о том, что сигнал КГР имеет высокую устойчивость к изменению параметров обработки.

Таблица 3.2 — Сравнение частоты совпадений для оптимизированных и неоптимизированных параметров обработки КГР с разбивкой на подвыборки

Способ обработки	ТСИ, мужская	ТЗВ, мужская	ТСИ, женская	ТЗВ, женская	Среднее
КГР, неоптимизированные параметры	91 %	91 %	100 %	96 %	95 %
КГР, оптимизированные параметры	91 %	100 %	100 %	96 %	97 %

### 3.2.6. Обсуждение результатов оптимизации по сигналу КГР

Полученные данные сопоставимы с результатами, описанными в литературе. В работе Н.Ф. Posada-Quintero с соавторами (Posada-Quintero et al., 2016) авторы сравнили Фурье-спектр сигнала КГР в состоянии покоя и во время выполнения стрессогенных когнитивных задач. Они заключили, что спектр электродермальной активности парасимпатической нервной системы может лежать в диапазоне 0,045-0,15 Гц, а симпатической — в диапазоне 0,045-0,25 Гц. Эти диапазоны практически совпадают с результатами, полученными в настоящем исследовании, основанном на симметричном сравнении реакций на стимулы различной субъективной значимости. Некоторая разница по нижней границе (не слишком существенная, что можно видеть по рисунку 3.4) может быть обусловлена тем, что в работе Н.Ф. Posada-Quintero с соавторами частоты задавались с большим шагом — в виде нескольких предустановленных широких

диапазонов. Высокая согласованность результатов тем более примечательна, что она была замечена уже после обработки данных и никак не повлияла на процесс подбора оптимальных параметров фильтрации.

В работе D.R. Bach (Bach et al., 2013), в число соавторов которой входит известный специалист по анализу фМРТ-сигналов К. Фристон, пришли к выводу, что оптимальные параметры фильтра верхних частот следующие: двунаправленный фильтр Баттерворта первого порядка с частотой среза 0,016 Гц (постоянная времени 10 с). Следует заметить, что авторы применяли двухпроходный фильтр, реализованный в пакете Matlab (Натик, США) в функции `filtfilt`, при этом два прохода фильтра несколько смещают частоту среза относительно номинально заданной. Итоговая частота среза по уровню 3 dB после применения этой функции становится равна 0,025 Гц (это следует из моделирования амплитудно-частотной характеристики двухпроходного фильтра, см. рисунок 3.6). Это значение численно совпадает с выявленным в диссертационной работе. Обзор работы D.R. Bach с соавторами также выполнялся после обработки данных и не влиял на принятие решения об оптимальном значении частоты фильтрации.

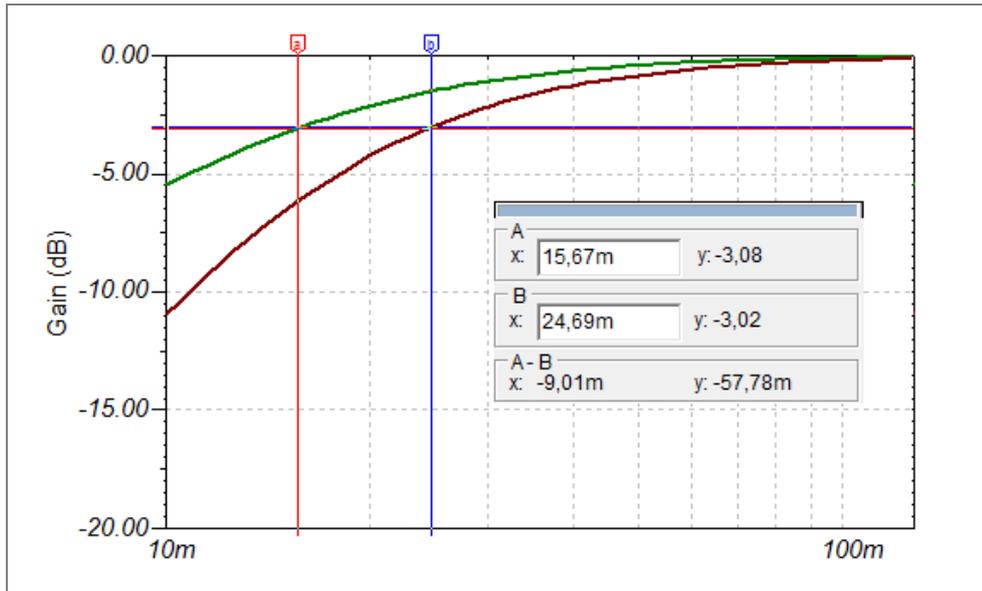


Рисунок 3.6 — Моделирование амплитудно-частотной характеристики двухпроходного фильтра с частотой среза первого прохода 0,016 Гц (зеленая кривая) в программе TINA-TI версии 7.0.30.267. Второй проход тем же фильтром (коричневая кривая) дает частоту среза 0,025 Гц на уровне 3 dB. По горизонтали задана частота в миллигерцах. Такие же результаты получаются при сравнении однопроходной функции filter и двухпроходной filtfilt в Octave версии 4.4.0. Поэтому применение двух проходов фильтрации (как с помощью функции filtfilt, так и при двойном применении функции filter) не эквивалентно фильтру второго порядка, так как происходит смещение стандартной частоты среза по уровню 3 dB почти в два раза

Для ФНЧ в процитированной выше работе D.R. Vach с соавторами выбрана частота 5 Гц, не оказывающая существенного влияния на сигнал КГР. Однако при наличии различного рода помех (как, например, при регистрации сигнала в условиях фМРТ-сканирования) имеет смысл ограничивать полосу пропускания только полезным сигналом, то есть до 0,25 Гц.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности сохранения выбранных в процессе оптимизации параметров для применения в дальнейших расчетах. Выбранные параметры в целом согласуются с данными литературы, но при этом имеют следующие преимущества:

- а) верхние и нижние границы частотного диапазона максимально приближены к диапазону сигнала;
- б) выбран оптимальный порядок фильтра;
- в) выбраны наилучшие эпохи анализа.

### 3.2.7. Оптимизация параметров обработки сигнала ФПГ

Для сигнала ФПГ вначале также был произведен выбор порядка частотных фильтров Баттерворта. На рисунке 3.7 приведено распределение ПС в зависимости от порядка фильтров ФНЧ и ФВЧ, а также от их частоты среза.

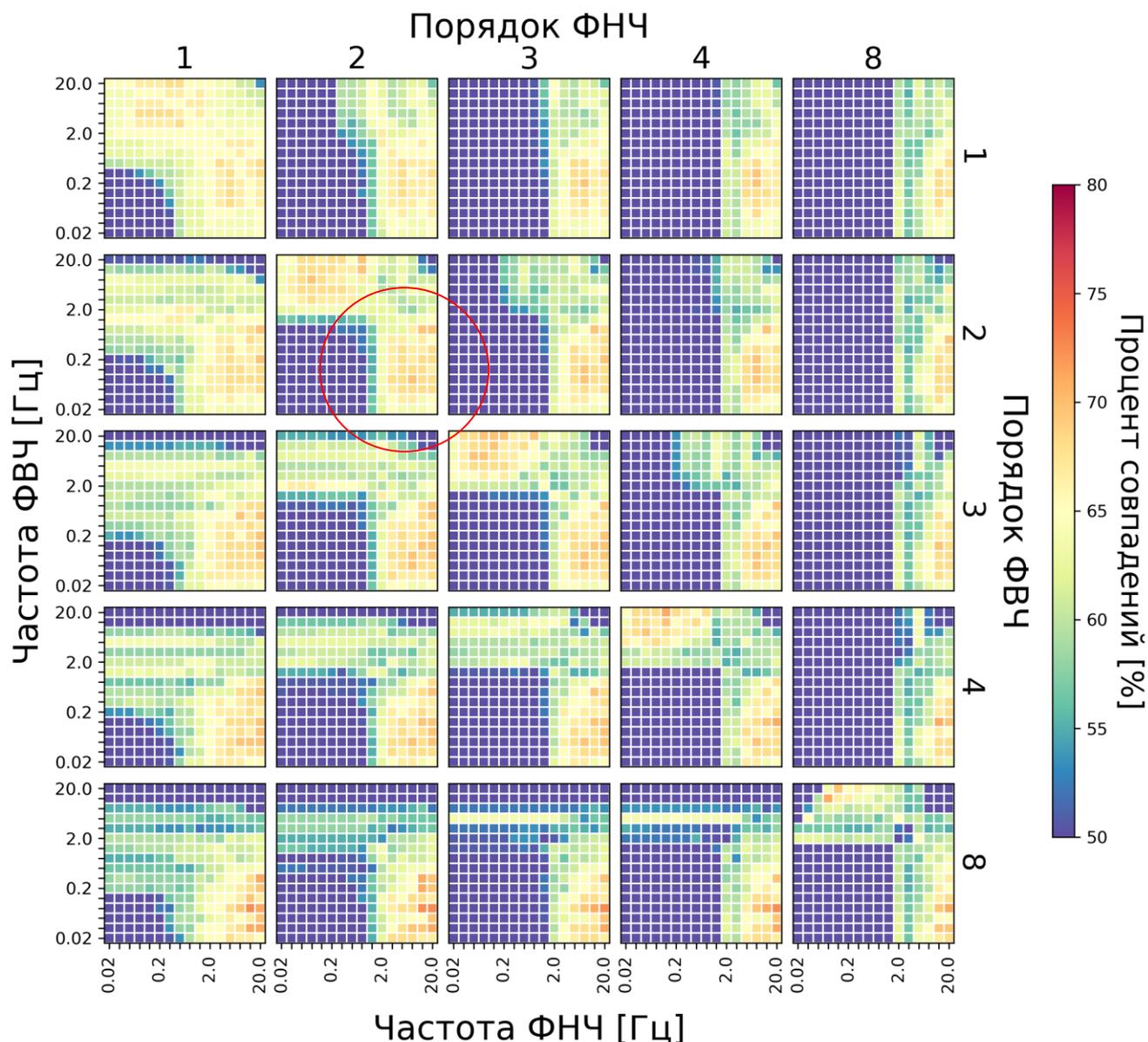


Рисунок 3.7 — Распределение ПС. Каждая точка на карте соответствует определенному диапазону частот фильтрации сигнала ФПГ, а также порядку фильтра. Приведены объединенные данные для трех тестов тренировочной выборки — ТСИ мужская, ТЗВ мужская и ТСИ женская

Сигнал ФПГ по сравнению с сигналом КГР показывает меньшую стабильность, и выбрать оптимальные параметры сложнее. Тем не менее, по

рисунку 3.7 зафиксирован второй порядок фильтров для дальнейшего анализа как компромисс между шириной оптимума и пиковым значением оптимума.

Далее, используя фильтры второго порядка, строим распределение ПС в зависимости от интервалов анализа и частот фильтрации (рисунок 3.8).

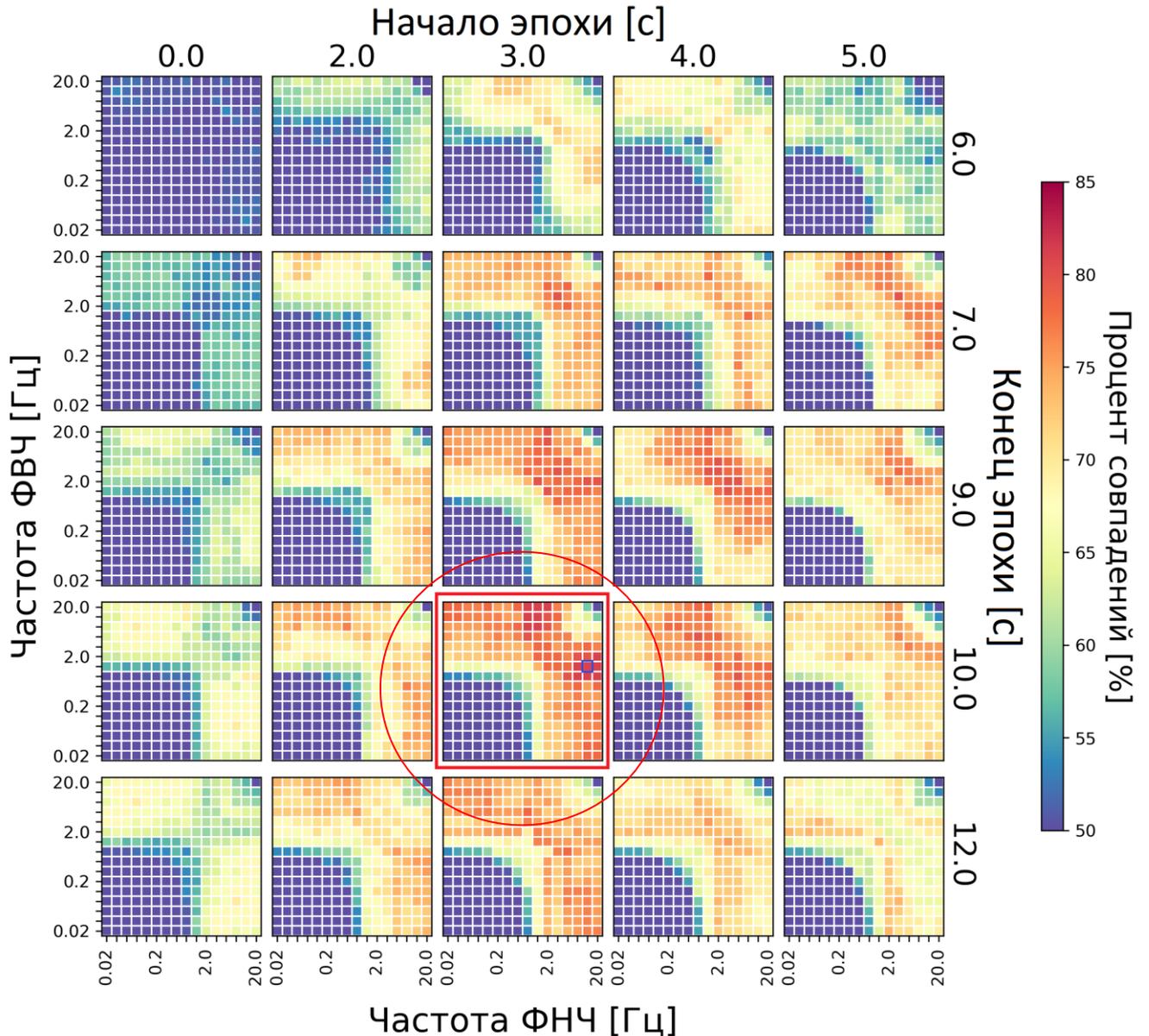


Рисунок 3.8 — Распределение ПС. Каждая точка на карте соответствует определенному диапазону частот фильтрации сигнала ФПГ, а также определенной эпохе анализа. Порядок фильтра фиксированный — второй. Красной и синей рамками выделен интервал 3-10 с и частотный диапазон 1,25-12,5 Гц. Приведены объединенные данные для трех тестов тренировочной выборки — ТСИ мужская, ТЗВ мужская и ТСИ женская

По данному распределению выбираем интервал 3-10 с и частотный диапазон 1,25-12,5 Гц. Интервал 3-9 с также показывает достаточно плотное распределение ПС, но выбран максимально широкий интервал для большей универсальности.

Графическая проверка на женской выборке ТЗВ (см. рисунок 3.9) показывает, что выбранные значения параметров (частота 1,25-12,5 Гц, интервал 3-10 с) не достигают максимума частоты совпадений. Тем не менее, параметры находятся близко к оптимуму, показывая ПС на уровне 57 %, что при пяти альтернативах (то есть при случайном совпадении 20 %) является неплохим показателем. Также полученные значения выше, чем для неоптимизированных контрольных параметров, заданных выше (таблица 3.1). При этом весь тест ТЗВ на женской выборке при любых параметрах показал невысокую частоту совпадений — отдельные разрозненные точки в максимуме имеют точность лишь 65 % (рисунок 3.9).

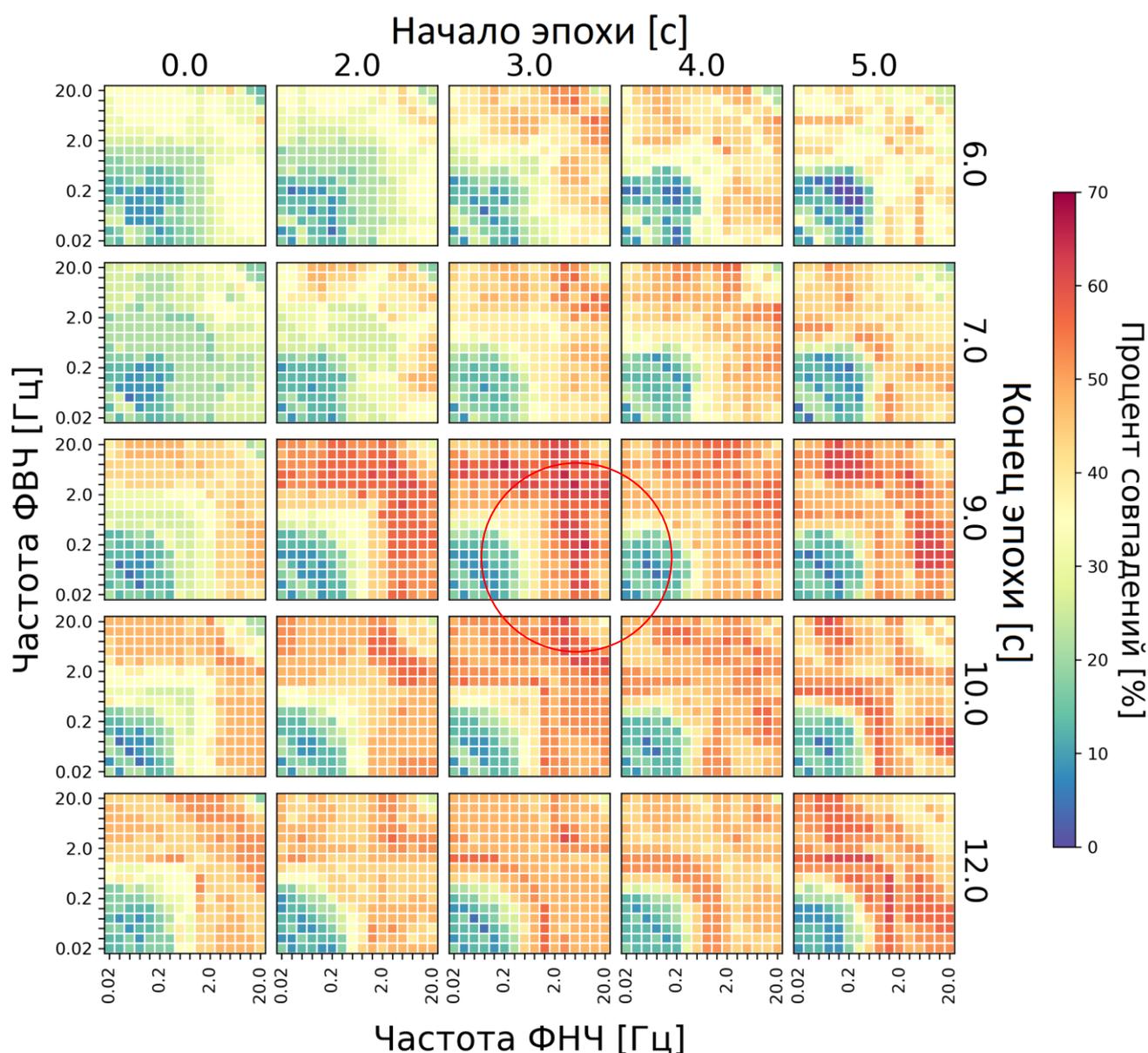


Рисунок 3.9 — Распределение ПС. Каждая точка на карте соответствует определенному диапазону частот фильтрации сигнала ФПГ, а также определенной эпохе анализа. Порядок фильтра фиксированный — второй. Приведены данные для валидационной выборки — ТЗВ, женщины

Сравнение с контрольными параметрами показывает, что применение оптимизированных параметров позволило численно улучшить ПС во всех тестах (таблица 3.3).

Статистическая проверка при помощи критерия Вилкоксона показывает большую частоту совпадений с уровнем значимости  $p < 0,05$  для оптимизированных параметров. Это верно для тестов ТСИ и ТЗВ, объединенных по мужчинам и женщинам. Отдельная проверка для контрольной женской

выборки в тесте ТЗВ по статистическому критерию не достигает порогового уровня значимости  $p \leq 0,05$ , но сохраняется численное улучшение (см. таблицу 3.3).

Таблица 3.3 — Сравнение ПС для оптимизированных и неоптимизированных параметров обработки ФПГ с разбивкой на подвыборки

Способ обработки	ТСИ, мужская	ТЗВ, мужская	ТСИ, женская	ТЗВ, женская	Среднее
ФПГ, неоптимизированные параметры	74 %	57 %	61 %	52 %	61 %
ФПГ, оптимизированные параметры	96 %	78 %	70 %	57 %	75 %

### 3.2.8. Обсуждение результатов оптимизации по сигналу ФПГ

Обсуждение и сопоставление результатов с данными литературы. В отношении сигнала ФПГ труднее найти в литературе типичные примеры настройки частотных фильтров, но не в силу недостатка публикаций, а из-за того, что параметры сильно зависят от целей обработки. Целью может быть как простое вычисление частоты сердечных сокращений, так и сложный анализ формы кривой сигнала ФПГ. Разница верхней границы частот в этих случаях будет варьироваться от единиц до сотен герц. Нижняя граница частот также будет зависеть от целей обработки — требуется ли сохранить форму сигнала или необходимо максимально убрать низкочастотные тренды.

Как характерный пример, в работе M. Reguig и F. Reguig, посвященной изучению формы сигнала ФПГ с клиническими целями, осуществлялась аппаратная фильтрация сигнала ФПГ в диапазоне 0,5-3,4 Гц (Reguig M., Reguig F., 2017). Если сравнить эти значения с распределением ПС на рисунках 3.8 и 3.9, то можно заметить, что они находятся вблизи оптимумов и не слишком сильно отличаются по значению ПС от выбранных при оптимизации параметров, хотя и не достигают максимумов. Оптимизация показала необходимость более сильного подавления низких частот, но при этом пропускающая большего диапазона верхних частот, оказавшихся информативными.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности сохранения выбранных в процессе оптимизации параметров для применения в дальнейших расчетах. Выбранные параметры в целом согласуются с данными литературы, но при этом имеют следующие преимущества:

- а) верхние и нижние границы частотного диапазона максимально приближены к информативному диапазону сигнала;
- б) выбран оптимальный порядок фильтра;
- в) выбраны наилучшие эпохи анализа.

### **3.3. Сравнение ряда альтернативных способов анализа сигналов КГР и ФПГ**

Для сигналов КГР и ФПГ известно достаточно большое число способов оценки величины активаций по зарегистрированным данным. Далее приводятся результаты сравнения некоторых методов, имеющих значение в контексте задач диссертационной работы, по метрике ПС.

#### **3.3.1. Сопоставление АКО и экспертных балльных оценок**

Вначале было выполнено сопоставление АКО, полученным по сигналам КГР и ФПГ, с экспертными балльными оценками (ЭБО).

Значения АКО вычислялись согласно процедуре, описанной выше в разделе 3.2.2. Для получения обобщенной оценки КГР-ФПГ применялось объединение  $z$ -оценок для сигналов КГР и ФПГ при помощи усреднения (с весовым коэффициентом -1 для ФПГ).

Экспертные оценки были получены экспертом-полиграфологом согласно следующим правилам: «нулевой» стимул в каждом блоке исключался из анализа (как и при автоматической оценке, см. разделы 2.2 и 3.2.2), чтобы уменьшить эффект ориентировочной реакции; далее оставшиеся стимулы в каждом блоке ранжировались — 2 балла получал стимул с максимальной реакцией, 1 балл получал стимул с меньшей реакцией, а остальным стимулам присваивалось 0 баллов (Холодный и др., 2021). Таким образом, при экспертной оценке

производилось ранжирование активаций в каждом блоке предъявлений от 0 до 2 баллов. Такая оценка повторялась для каждого блока предъявлений стимулов. Далее баллы суммировались для получения обобщенной оценки для каждого стимула — ЭБО. Оценки для КГР и ФПГ суммировались для получения обобщенной оценки КГР-ФПГ. ЭБО сигнала ФПГ проводилась только по спазму сосудов — не учитывалось изменение частоты сердечных сокращений (ЧСС), так как этот параметр показал себя противоречиво и был исключен из анализа в рамках диссертационной работы.

На рисунке 3.10 показаны корреляционные диаграммы автоматических и экспертных оценок (АКО и ЭБО, соответственно) объединенных активаций КГР-ФПГ, связанных с субъективно значимыми стимулами. Наблюдается корреляционная связь между оценками, полученными разными способами.

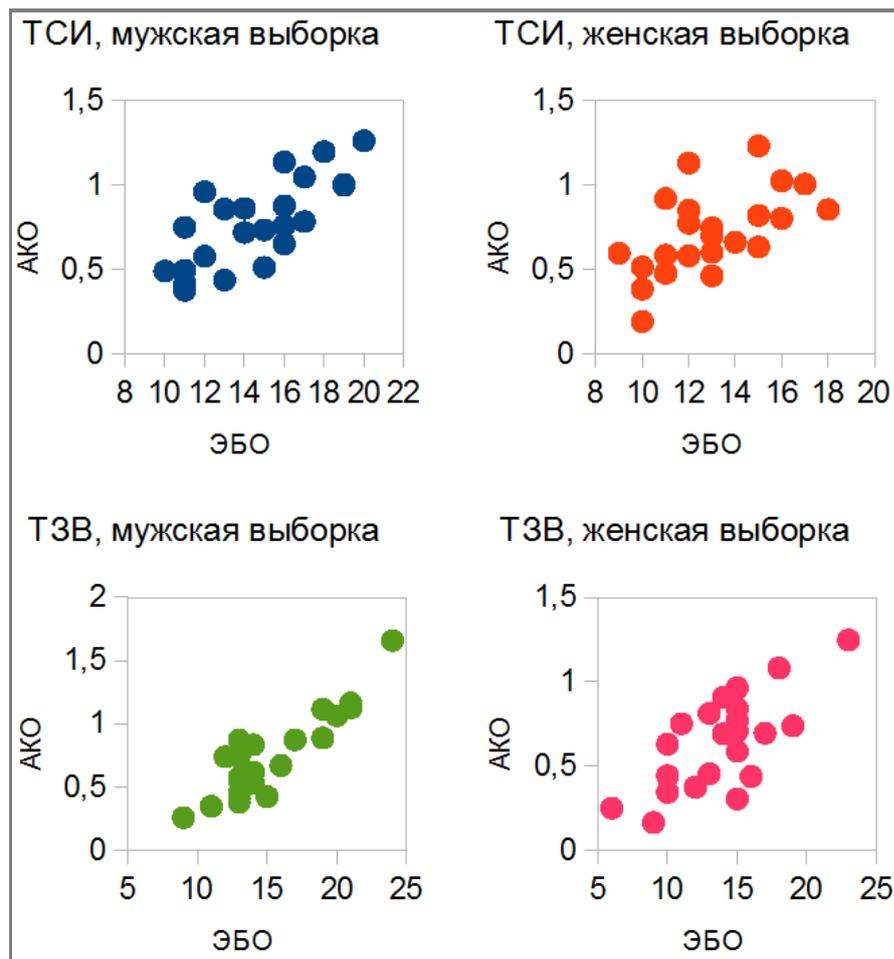


Рисунок 3.10 — Корреляционные диаграммы АКО и ЭБО с объединением каналов КГР-ФПГ,  $n=23$  в каждой выборке

В таблице 3.4 обобщены результаты корреляционного анализа по мужской выборке. Полученные значения ожидаемы, так как автоматический алгоритм и экспертный метод имеют в основе одинаковые принципы, хотя и несколько различаются в деталях.

Таблица 3.4 — Корреляция АКО и экспертных оценок по отдельным физиологическим параметрам и по объединенным данным КГР-ФПГ в тестах ТСИ и ТЗВ (мужская выборка,  $n=23$ )

Статистика	ТСИ			ТЗВ		
	КГР	ФПГ	КГР-ФПГ	КГР	ФПГ	КГР-ФПГ
$\rho$ -Спирмена	0,7	0,7	0,8	0,9	0,7	0,8
$p$ -значение	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Для женской выборки данные корреляционного анализа приведены в таблице 3.5. Наблюдаются сходные результаты — имеется значимая корреляция экспертных и автоматических оценок, хотя и меньше, чем для мужской выборки.

Таблица 3.5 — Корреляция АКО и экспертных оценок по отдельным физиологическим параметрам и по объединенным данным КГР-ФПГ в тестах ТСИ и ТЗВ (женская выборка,  $n=23$ )

Статистика	ТСИ			ТЗВ		
	КГР	ФПГ	КГР-ФПГ	КГР	ФПГ	КГР-ФПГ
$\rho$ -Спирмена	0,6	0,5	0,6	0,7	0,6	0,6
$p$ -значение	0,004	0,01	0,002	< 0,001	0,004	0,004

Далее проводилось вычисление ПС по ЭБО и АКО согласно процедуре, описанной выше в разделе 3.3. Для сравнения использовались как контрольные параметры обработки данных (таблица 3.1), так и оптимизированные (контрольные параметры были одинаковы для выполнения ЭБО и АКО). Результаты обобщены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 — ПС скрываемых стимулов в ТСИ и ТЗВ для экспертной оценки и АКО

Метод оценки	Физиологические показатели	Мужская выборка		Женская выборка	
		ТСИ	ТЗВ	ТСИ	ТЗВ
Экспертная балльная оценка	КГР	91 %	100 %	91 %	96 %
	ФПГ	70 %	52 %	48 %	30 %
	КГР-ФПГ	91 %	91 %	100 %	78 %
АКО, контрольные параметры	КГР	91 %	91 %	100 %	96 %
	ФПГ	74 %	57 %	61 %	52 %
	КГР-ФПГ	100 %	83 %	96 %	83 %
АКО, оптимизированные параметры	КГР	91 %	100 %	100 %	96 %
	ФПГ	96 %	78 %	70 %	57 %
	КГР-ФПГ	100 %	100 %	100 %	96 %

По результатам сравнения методов можно сделать вывод, что экспертная балльная оценка и АКО имеют высокую корреляцию между собой и сопоставимы по величине ПС. При этом АКО имеет потенциал для дальнейшего улучшения с помощью оптимизации алгоритмов и параметров обработки. АКО выполняется быстро и уменьшает влияние субъективных факторов на процесс анализа данных.

### 3.3.2. Сравнение различных способов расчета величины активаций по сигналу КГР

Существует достаточно большое число различных вариантов вычисления величины активаций по сигналу КГР. Например, можно привести следующие способы:

а) классический анализ по разнице между точкой первого максимума и базовым значением, отсчитываемым от момента предъявления стимула (Dawson, 2007);

б) длина линии графика на эпохе анализа;

в) среднее арифметическое значение амплитуды сигнала на эпохе анализа.

Существуют и другие варианты (например, интеграл на эпохе и т.д.) — некоторые из них были также исследованы, но их анализ выходит за рамки диссертационной работы.

В диссертационной работе было выполнено сравнение перечисленных вариантов с помощью метрики ПС (см. таблицу 3.7).

Применение к сигналу КГР того же способа расчета, который применяется к сигналу ФПГ (по «длине линии»), может быть потенциально полезно в целях унификации, а также возможного улучшения качества обработки данных. Теоретическое обоснование возможного улучшения заключается в учете формы сигнала после прохождения максимума, а также учете двойных пиков (рисунок 3.11).

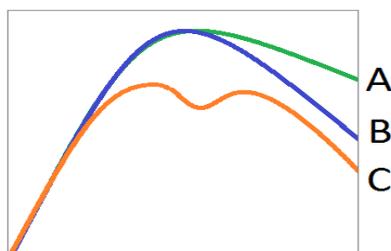


Рисунок 3.11 — Возможное влияние формы сигнала КГР на длину линии на интервале анализа: более резкий спад кривой В при той же величине максимума, что и у кривой А; двойной пик при меньшем максимуме у кривой С

Результаты (таблица 3.7 ниже) показывают, что проанализированные способы вычисления величины активаций по сигналу КГР принципиально не различаются. Статистических различий также не обнаружено ( $p=0,3$  при сравнении между крайними строками таблицы 3.7, критерий Вилкоксона). Это значит, что при необходимости можно выбрать любой из перечисленных способов анализа.

Однако в силу того, что есть некоторые численные различия ПС (таблица 3.7), в диссертационной работе в последующих главах будет использоваться способ обработки по максимуму амплитуды на эпохе 1-7 с, с вычитанием базового значения в точке 1 с. Этот способ отличается от классического (Dawson, 2007) тем, что точка вычисления базового значения смещена на 1 с вправо — такой способ показал численно лучшие значения по метрике ПС (таблица 3.7).

Таблица 3.7 — ПС для разных способов расчета величины активаций по сигналу КГР

Способ обработки	ТСИ М	ТЗВ М	ТСИ Ж	ТЗВ Ж	Среднее
КГР, перепад амплитуд («длина линии») на эпохе 1-7 с.	91%	100%	100%	96%	97%
КГР, максимум амплитуды на эпохе 1-7 с минус базовое значение в точке 1 с.	91%	100%	100%	96%	97%
КГР, максимум амплитуды на эпохе 1-7 с минус базовое значение, усредненное в интервале 0-1 с.	91%	100%	100%	91%	96%
КГР, максимум амплитуды на эпохе 1-7 с без вычитания базового значения.	91%	96%	100%	96%	96%
КГР, среднее значение сигнала на эпохе 1-7 с минус базовое значение в точке 1 с.	91%	100%	100%	91%	96%
КГР, среднее значение сигнала на эпохе 1-7 с без вычитания базового значения.	87%	96%	96%	91%	93%

Примечание — Таблица отсортирована по убыванию среднего значения ПС.

### 3.3.3. Сравнение различных способов расчета величины активаций по сигналу ФПГ

В качестве основного способа вычисления величины активаций по сигналу ФПГ применяется определение «длины линии» (подробнее см. выше в разделе 3.2.2).

Вариант расчета по «длине линии» показывает наилучшую результативность по метрике ПС (см. таблицу 3.8). Но, к сожалению, он подвержен влиянию трендов изменения амплитуды с течением времени в результате адаптации (привыкания) участника эксперимента к условиям эксперимента, которые довольно трудно скомпенсировать при таком способе анализа. Поэтому он непригоден для сравнения двух экспериментальных тестов, записанных с разницей по времени и не рандомизированных по порядку выполнения.

Для целей диссертационной работы (сравнения тестов ТСИ и ТЗВ) больше подходит вариант расчета величин активаций по огибающим, который позволяет нивелировать влияние трендов, например, посредством фильтрации огибающей с

помощью ФВЧ и приведения огибающей к базовому значению — таким образом, учитываются только локальные изменения огибающей. Также имеет смысл перевернуть огибающую, чтобы не вводить весовой коэффициент  $-1$  в дальнейшем, так как реакции в сигнале ФПГ характеризуются уменьшением амплитуды сигнала.

На рисунке 3.12 показан исходный сигнал ФПГ (в условных единицах — arbitrary units, у.е.) для одного предъявления и сглаженная инвертированная огибающая (ИО) ФПГ, рассчитанная по методу Гильберта.

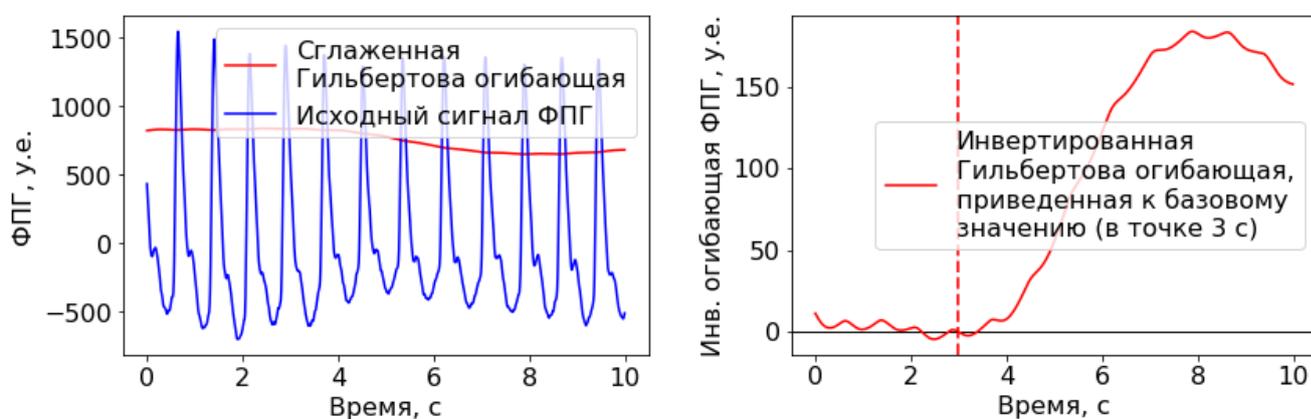


Рисунок 3.12 — Исходный сигнал ФПГ и сглаженная ИО ФПГ, рассчитанная по методу Гильберта

Примечание — Огибающая ФПГ на рисунке 3.12 не идет по пикам сигнала, так как сигнал не является чистой синусоидой без гармоник, а огибающая дополнительно сглажена.

Результаты сравнения методов приведены в таблице 3.8 ниже. Таблица отсортирована по убыванию среднего значения ПС. Результаты показывают, что для вычисления величин активаций по огибающей ФПГ лучше использовать среднее значение на эпохе анализа, а не максимум, как для сигнала КГР. Также, в отличие от сигнала КГР, вычитание базового значения не улучшает, а наоборот, ухудшает метрику ПС для сигнала ФПГ. Аналогичный результат был получен и для сигнала фМРТ, что может быть обусловлено сходной природой сигналов ФПГ и фМРТ.

Для дальнейшей работы принят второй (по таблице 3.8) способ вычисления величины активаций по сигналу ФПГ — среднее значение огибающей в интервале 3-10 с без вычитания базового значения, с фильтрацией огибающей ФВЧ 0,025 Гц. Этот способ, хотя и показывает численно меньшее значение ПС по сравнению с первым способом, не отличается от него статистически (критерий Вилкоксона, полученные  $p$ -значения больше 0,05). Основное преимущество этого способа в том, что он позволяет устранить низкочастотные дрейфы амплитуды сигнала путем фильтрации огибающей.

Таблица 3.8 — ПС для разных способов расчета величины активаций по сигналу ФПГ

Способ обработки	ТСИ М	ТЗВ М	ТСИ Ж	ТЗВ Ж	Среднее
ФПГ, перепад амплитуд («длина линии») на эпохе 3-10 с.	96%	78%	70%	57%	75%
ФПГ, среднее значение огибающей на эпохе 3-10 с без вычитания базового значения, с фильтрацией огибающей ФВЧ 0,025 Гц.	83%	65%	52%	57%	64%
ФПГ, максимум амплитуды огибающей на эпохе 3-10 с без вычитания базового значения, с фильтрацией огибающей ФВЧ 0,025 Гц.	52%* $p=0,002$	65%	61%	48%	57%
ФПГ, среднее значение огибающей на эпохе 3-10 с минус базовое значение в точке 3 с без фильтрации огибающей ФВЧ.	65%* $p=0,011$	65%	52%	43%	56%
ФПГ, максимум амплитуды огибающей на эпохе 3-10 с минус базовое значение в точке 3 с, фильтрация огибающей ФВЧ 0,025 Гц.	48%* $p=0,003$	52%	43%	43%	47%

\* Значимо отличается по критерию Вилкоксона от первого варианта обработки, указанного в таблице ( $p$ -значение указано в таблице, если меньше 0,05).

В качестве дополнительного результата можно отметить, что различие между мужской и женской выборкой по ПС для сигналов КГР и ФПГ неодинаково. ПС по КГР в женской выборке практически такой же, как в мужской (см. таблицу 3.7). При этом по ФПГ (таблица 3.8) разница между мужской и женской выборкой существенная (для теста ТСИ при первом способе обработки мужская и женская выборка различаются с уровнем значимости  $p=0,02$  по критерию Вилкоксона). Можно предположить, что эти различия обусловлены особенностями строения кожи или сердечно-сосудистой системы у женщин, которые влияют на сигнал ФПГ и снижают его информативность.

### **3.4. Заключение по третьей главе**

В третьей главе сформулирован подход к сопоставлению психофизиологических методов и настройке параметров обработки данных в случае недостаточности информации о внутреннем устройстве источника сигнала — например, в случае работы с психофизиологическими данными. Введены термины прямой и обратной психофизиологической задачи. В основе предложенного подхода лежит итерационное повторение комбинации прямой и обратной психофизиологической задачи с варьированием параметров и оценкой метрики качества решения обратной задачи, учитывая, что в общем случае качество решения обратной задачи зависит от качества решения прямой задачи.

В практической реализации указанного подхода использованы тесты с заведомо значимым для человека стимулом. Обратной задачей являлась диагностика стимулов, имеющих максимальную субъективную значимость в ряду других. Успешность ее выполнения зависела от качества решения прямой задачи — регистрации и обработки физиологических сигналов и выявления информативных маркеров. В качестве численного критерия успешности выполнения обратной задачи использован процент совпадений стимулов, диагностированных как субъективно значимые, с априорно заданными.

С помощью описанного подхода выполнена оптимизация параметров обработки сигналов КГР и ФПГ. В таблице 3.9 приводятся контрольные и оптимизированные параметры.

Таблица 3.9 — Параметры обработки сигналов полиграфа — контрольные и выбранные в процессе оптимизации

Параметры	Сигнал	Частота ФВЧ и ФНЧ	Порядок ФНЧ/ФВЧ	Начало и конец эпохи анализа от маркера предъявления вопроса
Контрольные	КГР	0,1-1,0 Гц	1/1	0-10 с
	ФПГ	1-20 Гц	1/1	0-10 с
Оптимизированные	КГР	0,025-0,25 Гц	1/1	1-7 с
	ФПГ	1,25-12,5 Гц	2/2	3-10 с

Выбранные параметры в целом согласуются с данными литературы, но при этом имеют следующие преимущества: верхние и нижние границы частотного диапазона максимально приближены к диапазону сигнала; выбран наилучший для каждого типа сигнала порядок фильтра; выбраны наиболее информативные эпохи анализа.

По результатам сравнения экспертной балльной оценки и АКО можно сделать вывод, что экспертная балльная оценка и АКО имеют высокую корреляцию между собой и сопоставимы по величине ПС. При этом АКО имеет потенциал для дальнейшего улучшения с помощью оптимизации алгоритмов и параметров обработки. АКО выполняется быстро и уменьшает влияние субъективных факторов на процесс анализа данных.

Сравнение различных способов вычисления величин активаций по сигналу КГР не выявило значимых статистических различий по метрике ПС. Однако в силу того, что есть некоторые численные различия ПС, в диссертационной работе в последующих главах будет использоваться способ вычисления активаций по максимуму амплитуды на эпохе 1-7 с, с вычитанием базового значения в точке 1 с.

Было обнаружено, что для сигнала ФПГ, в отличие от сигнала КГР, вычитание базового значения амплитуды не приводит к увеличению метрики ПС, а наоборот, ухудшает ее. Тот же эффект замечен (см. далее в главе 4) в отношении фМРТ-данных. Возможно, это обусловлено схожей природой сигналов ФПГ и фМРТ, связанной с динамикой различных параметров состояния кровеносных сосудов.

В качестве побочного результата можно отметить, что различие между мужской и женской выборкой по ПС для сигналов КГР и ФПГ неодинаково. ПС по КГР в женской выборке практически такой же, как в мужской. При этом по ФПГ разница между мужской и женской выборкой существенная. Можно предположить, что эти различия обусловлены особенностями строения кожи или сердечно-сосудистой системы у женской выборки, которые влияют на сигнал ФПГ и снижают его информативность.

## **Глава 4. Сопоставление статистического параметрического и амплитудного подходов к анализу фМРТ-данных**

В предыдущей главе 3 был теоретически обоснован и экспериментально проверен способ выбора наиболее оптимальных параметров и алгоритмов обработки данных психофизиологических исследований на основе решения прямой и обратной психофизиологической задачи. Этот способ апробирован на хорошо изученных данных — КГР и ФПГ.

В текущей главе 4 с помощью предложенного подхода решается актуальная научная проблема о выборе способов обработки и картирования фМРТ-сигналов. Эта проблема до сих пор не имела объективного решения, только косвенные обоснования (см. обзор литературы выше). Сопоставляется статистическое параметрическое картирование фМРТ с амплитудными методами анализа фМРТ-сигналов, в том числе разработанными автором диссертационной работы.

Результаты данной главы имеют как самостоятельное фундаментальное значение, так и обусловлены необходимостью обоснования применяемых в главе 5 авторских амплитудных методов анализа фМРТ-данных.

### **4.1. Постановка проблемы и обоснование решения**

Результатом обработки фМРТ-данных в большинстве современных публикаций являются те или иные статистические параметры ( $t$ -,  $F$ -,  $z$ -,  $p$ -значения) и построенные на их основе карты. Одной из особенностей вычисления статпараметров является приведение их к единицам разброса данных в пределах вокселя (повоксельная нормировка), что приводит к утрате амплитудных соотношений активности различных структур мозга. При этом информация о

количественных соотношениях активности областей мозга важна в ряде задач и является основой научного исследования (Chen et al., 2017).

Другой особенностью статистических параметров, используемых при обработке фМРТ-данных, является то, что они зависят от размера выборки  $n$  (и, соответственно, от размера выборки зависит «яркость» полученного изображения).

Одним из возможных решений для анализа амплитуды активаций является использование альфа-коэффициентов GLM (в отличие от бета-коэффициентов GLM, альфа-коэффициенты не подвергаются повоксельной нормировке, в результате которой теряются амплитудные соотношения между вокселями). Этот способ имеет тот недостаток, что GLM-модель полагается на априорно заданную форму гемодинамического ответа. В свою очередь, реальная форма гемодинамического ответа может отличаться в различных областях мозга и в различных задачах от той, что задана в программе обработки данных (см. обзор литературы выше). Также можно предположить высокую изменчивость формы гемодинамического ответа в ассоциативных областях мозга, представляющих наибольший интерес в психофизиологических исследованиях когнитивных процессов.

В качестве альтернативы предлагается разделить фМРТ-сигнал на эпохи и вычислить амплитуду сигнала простым усреднением на эпохе. Далее по полученным амплитудам вычисляется АКО тем же способом, что и для сигналов КГР и ФПГ (см. раздел 3.2.2). Это позволяет получить сопоставимые по своим свойствам количественные оценки разнородных сигналов (КГР, ФПГ, фМРТ), что может использоваться для сравнения и объединения данных, полученных на основе этих сигналов.

Например, появляется возможность вычислить АКО не только повоксельно, но и для всего объема одновременно с различными весовыми коэффициентами для вокселей. Также предлагается усреднить фМРТ-сигнал по областям мозга с целью дальнейшего повышения соотношения сигнал-шум и упрощения

психофизиологической интерпретации данных благодаря уменьшению их размерности.

Ранее такие способы анализ были невозможны или редко использовались из-за низкого соотношения сигнал-шум фМРТ-сигнала. Однако современные способы предобработки фМРТ-сигнала, разработанные в НИЦ «Курчатовский институт» (Орлов, 2021), позволяют повысить соотношение сигнал-шум в достаточной степени, чтобы реализовать такие способы анализа.

Новые способы анализа требуется сравнить с классическими, и для этого подходит разработанный и апробированный в главе 3 способ, основанный на итерационном решении прямой и обратной психофизиологической задачи с варьированием параметров и максимизацией оптимизационной метрики — ПС.

#### **4.2. Сопоставление повоксельных способов анализа фМРТ-данных на основе статистического параметрического и амплитудного подходов**

Для количественного сопоставления различных методов требуется получить одно число, метрику, для каждого из методов. В случае фМРТ-методов требуется каким-либо образом объединить повоксельные оценки. Для этой задачи повоксельные оценки (альфа-коэффициенты,  $t$ -значения, АКО) объединяются с различными весовыми коэффициентами для получения обобщенной метрики ПС, пригодной для сравнения методов обработки фМРТ-данных между собой.

Указанный подход подразумевает варьирование ряда параметров: различные способы определения величин активаций при вычислении АКО, различные весовые коэффициенты при объединении АКО и т.д. Для решения этой задачи подходит разработанный и апробированный в главе 3 способ, основанный на итерационном решении прямой и обратной психофизиологической задачи с варьированием параметров и максимизацией оптимизационной метрики.

##### **4.2.1. Наборы данных для оптимизации и валидации**

В данной задаче была использована выборка 74 человека (37 мужчины и 37 женщины, студенты технического вуза, возраст 21-23 года). Анализировались (без

разделения по полу) только данные по тесту ТСИ, так как тест ТЗВ был проведен не на всей выборке. Предпочтение было отдано одной выборке большего размера.

В отличие от процедуры, описанной в предыдущей главе, кроссвалидация выполнялась более традиционным способом — путем случайного разделения общей выборки на две части — обучающую<sup>1)</sup> и валидационную. Размер частей выбирался равным — по 37 человек. Для каждого значения оптимизируемого параметра выполнялось 300 итераций обучения и валидации. Какие-либо способы псевдорандомизации и балансировки не применялись — каждый раз перед разделением общая выборка перемешивалась.

#### **4.2.2. Процедура вычисления альфа-коэффициентов и $t$ -значений GLM**

Для вычисления альфа-коэффициентов и  $t$ -значений GLM использовались очищенные от инструментальных и физиологических артефактов фМРТ-данные, приведенные в пространство MNI-152 (Montreal Neurological Institute) с размером вокселя  $2 \times 2 \times 2$  мм<sup>3</sup>.

Для GLM-анализа использовался программный пакет FSL версии 6.0 (Оксфорд, Великобритания). На этапе индивидуального анализа задавались отдельные регрессоры для каждой группы предъявленных стимулов (каждого имени), построенные в парадигме связанных с событиями ответов от отметки предъявления стимулов.

Регрессоры в модели GLM задавались для каждой из 6 групп стимулов (подробнее описание стимулов см. в главе 2), включая «нулевую» группу, не используемую в дальнейшем анализе, но добавляемую в модель для минимизации остаточной ошибки GLM (рисунок 4.1).

---

<sup>1</sup> Так как применяемая методология оптимизации во многом схожа с общей методологией машинного обучения, здесь используются некоторые термины (например, «обучающая выборка»), принятые в машинном обучении, хотя традиционные для современного машинного обучения методы, такие как градиентный спуск, здесь не применяются по причинам, описанным в главе 3.

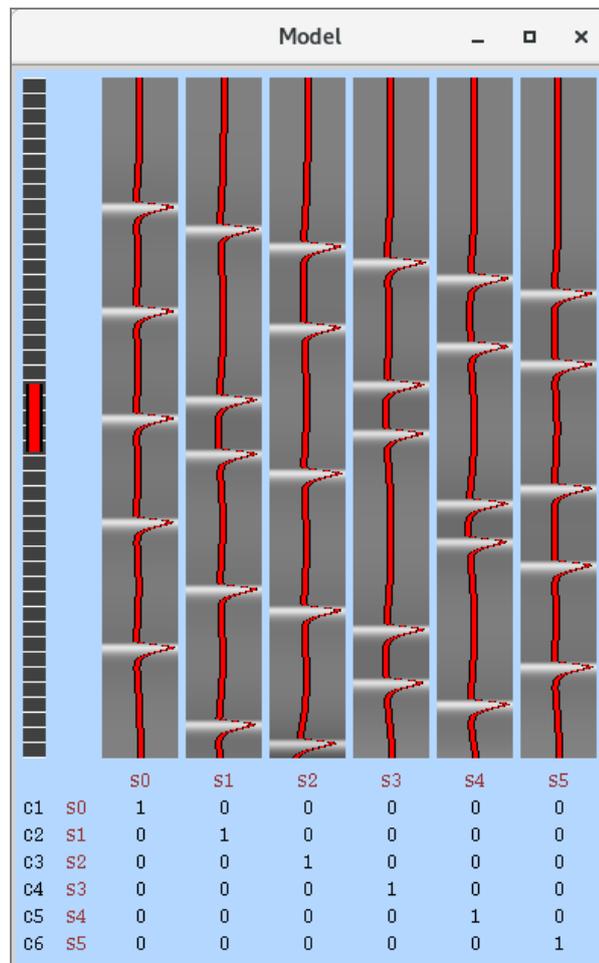


Рисунок 4.1 — Пример регрессоров модели GLM для одного из участников эксперимента. Слева обозначена шкала времени в единицах  $TR$ , красный прямоугольник — окно частотной фильтрации. Справа — графическое представление модельных сигналов

После вычисления GLM для дальнейшего анализа использовалось 5 значений альфа-коэффициентов и 5  $t$ -значений для каждого вокселя, соответствующих 5 стимулам (именам людей, одно из которых было именем участника эксперимента). Альфа-коэффициенты извлекались из файлов *peX.nii.gz*, полученных в пакете FSL, а  $t$ -значения — из файлов *tstatX.nii.gz*, где  $X$  — номер регрессора.

### 4.2.3. Процедура вычисления АКО по фМРТ-данным

Для получения АКО очищенные от инструментальных и физиологических артефактов фМРТ-данные, приведенные в пространство MNI-152 с размером вокселя  $2 \times 2 \times 2$  мм<sup>3</sup>, обрабатывались следующим образом:

а) повышение частоты дискретизации записи с 0,9 Гц ( $TR = 1110$  мс) до 10 Гц (подробное обсуждение см. в разделе 2.7 главы «Материалы и методы» выше);

б) вычитание средних значений сигнала в каждом вокселе отдельно («демининг») для устранения постоянных смещений;

в) нормирование значений массива на стандартное среднеквадратичное отклонение по объему — это позволяет сохранить общее соотношение амплитуд сигнала между вокселями в объеме;

г) разделение записей на эпохи анализа. В качестве базовых настроек использовались интервалы 3-10 с — те же интервалы, что и для сигнала ФПГ (учитывая, что эти сигналы зависят от динамики состояния сосудов, что может обуславливать их сходные временные характеристики). Более подробный анализ эпох приведен в последующих разделах. В дальнейшем возможна более тонкая настройка этих интервалов отдельно для различных структур мозга;

д) вычисление среднего значения амплитуды сигнала в каждой эпохе (базовое значение не вычиталось);

е) усреднение полученных значений по группе стимулов одинакового типа для получения АКО (аналогично процедуре обработки сигналов КГР и ФПГ, описанной в разделе 3.2.2).

#### **4.2.4. Групповой анализ полученных данных**

Для объединения индивидуальных альфа- или бета-коэффициентов по группе в популярных пакетах фМРТ-анализа также используется GLM — то есть еще один GLM-анализ помимо уже проделанного индивидуального. Такой анализ, если не используются дополнительные регрессоры (а в большинстве случаев они не используются), эквивалентен простому сравнению выборок по  $t$ -критерию Стьюдента — есть конфигурации GLM как для зависимых выборок, так и для независимых (Poldrack, 2011). Использование GLM в этом случае излишне усложняет обработку данных и может приводить к ошибкам. Поэтому для упрощения процедуры анализа и ее прозрачности при вычислении  $t$ -значений по

АКО использовалось сравнение амплитудных оценок по  $t$ -критерию Стьюдента. Использовались варианты для зависимых и независимых выборок в зависимости от конфигурации сравниваемых параметров.

Особенности нормировки данных при объединении их в группу обсуждаются в главе 5. В главе 4 при вычислении АКО использовалась нормировка данных на стандартное отклонение временных рядов фМРТ-данных, вычисленное по объему. При вычислении  $t$ -статистики данные нормируются повоксельно, так как это один из этапов вычисления  $t$ -статистики.

#### **4.2.5. Визуальное сравнение карт активаций**

На рисунке 4.2 показаны групповые карты активаций, полученных по альфа-коэффициентам GLM, АКО,  $t$ -значениям GLM, а также по  $t$ -значениям, вычисленным по АКО. Первые два способа представляют собой варианты амплитудного анализа. Вторые два способа — это  $t$ -значения, вычисленные по группе на основе исходных амплитудных значений — альфа-коэффициентов и АКО.

Пороговые значения отсечки были заданы одинаковым образом по  $p$ -значению групповой  $t$ -статистики. Было использовано достаточно высокое для фМРТ-анализа  $p$ -значение ( $p \leq 0,05$ ) без поправок на множественные сравнения, чтобы показать поведение показателей при небольших размерах выборок.

Подвыборки, показанные на рисунке 4.2, формировались случайным образом из общей выборки 74 человека и были уравнены по количеству мужчин и женщин.

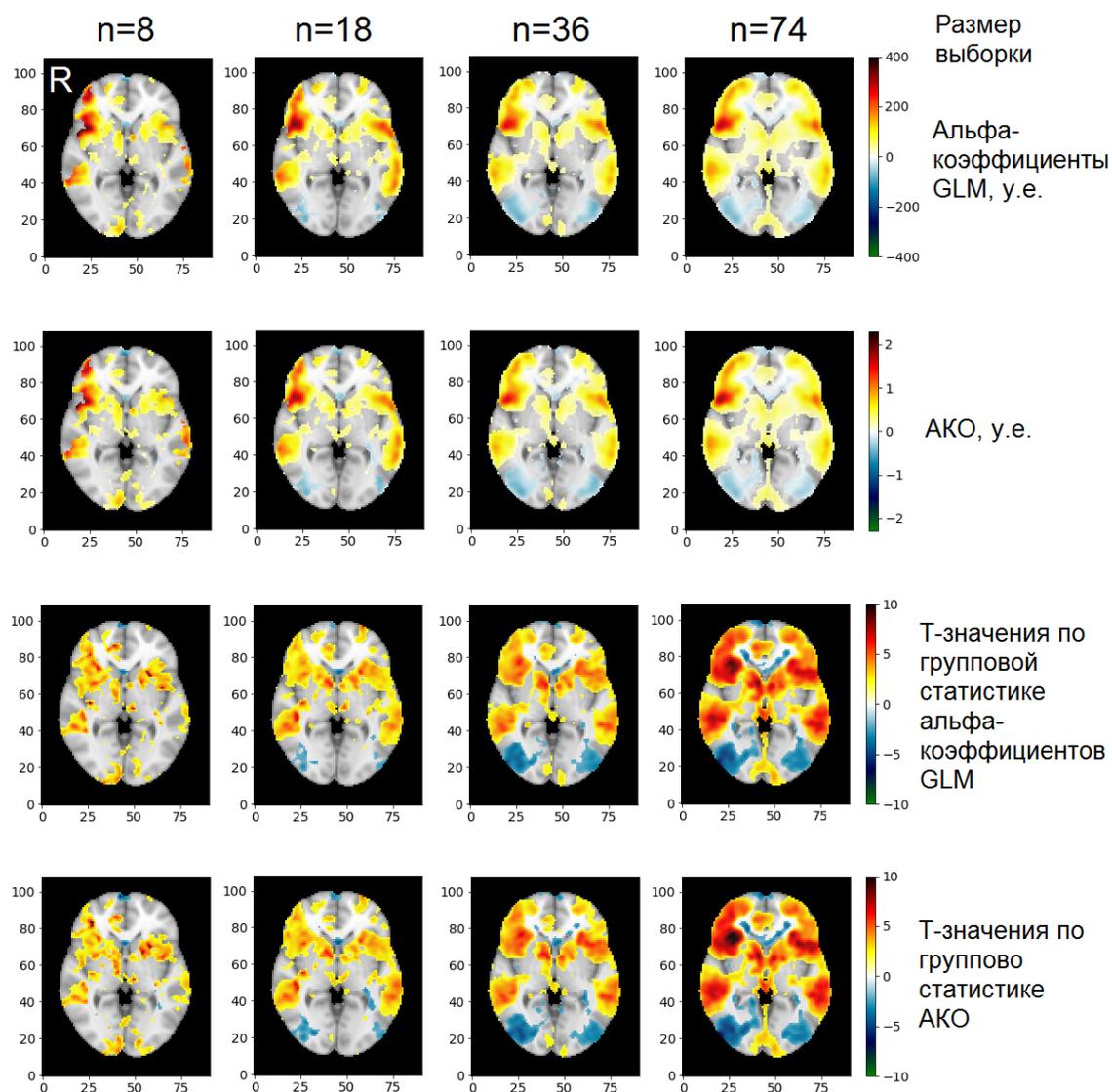


Рисунок 4.2 — Пример фМРТ-картирования на основе различных подходов. Показан срез №36 в пространстве MNI-152, групповой анализ, порог  $p \leq 0,05$ , контраст — «значимые минус незначимые» стимулы

Визуальный анализ показал, что:

а) амплитудный анализ по альфа-коэффициентам и по АКО дает визуально сходные изображения. То же верно и для сопоставления  $t$ -значений, полученных существенно различающимися способами — по альфа-коэффициентам GLM и по АКО. Это говорит о том, что анализ на основе АКО в целом выполнен корректно и может использоваться при дальнейшей обработке данных;

б) сопоставление амплитудного анализа и  $t$ -значений, наоборот, показывает существенные различия. Амплитудный анализ более устойчив к изменению размера выборки (если не считать отсечку, порог которой задается по  $p$ -значению

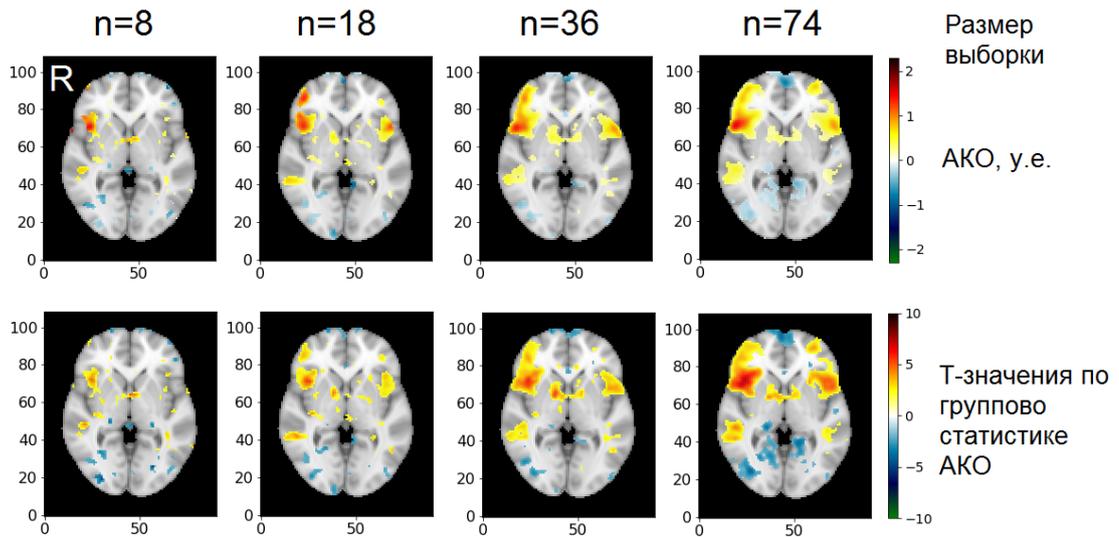
на основе  $t$ -статистики). При наборе выборки в этом случае увеличивается *точность* определения измеряемой величины, но не сама эта величина, в отличие от  $t$ -значений;

в) при амплитудном анализе центры активности смещены латеральнее. Базальные структуры по амплитуде дают намного менее слабый сигнал, чем кора. На амплитудной картине межполушарная асимметрия менее выражена, чем на  $t$ -статистике;

г) по поводу «отрицательной активности», обнаруживаемой в затылочных областях, следует отметить, что в основе всех приведенных методов лежит *разница* амплитуд активаций на значимые и незначимые стимулы, поэтому появляются отрицательные значения. Исходно же (перед сравнением) активации практически во всех вокселях «положительные» (см. далее анализ временных рядов сигналов). В амплитудном выражении этот эффект имеет небольшую величину по сравнению с превалирующей положительной разницей сигналов.

При ограниченных временных ресурсах во время фМРТ-исследования важным является вопрос о том, что более приоритетно — увеличение числа предъявлений стимулов или числа участников эксперимента в выборке. Полученные в диссертационной работе экспериментальные данные позволяют сформулировать определенные аргументы для выбора подходящего решения.

На рисунке 4.3 приведены результаты анализа только для одного предъявления. Если сравнить вариант  $n=74$  и одно предъявление (рисунок 4.3) с вариантом  $n=18$  и пять предъявлений (рисунок 4.2), то они оказываются схожими по полученным изображениям, хотя во втором варианте суммарное число предъявлений, умноженное на число участников эксперимента, даже больше. При этом большая выборка более репрезентативна, а участники эксперимента в этом случае меньше утомляются.



Данные по одному предъявлению стимулов

Рисунок 4.3 — Пример фМРТ-картирования по одному предъявлению стимулов (из пяти имеющихся). Показан срез №36 в пространстве MNI-152, групповой анализ, порог  $p \leq 0,05$ , контраст — «значимые минус незначимые» стимулы

В случае индивидуального анализа и медицинской диагностики количество предъявлений должно быть достаточным для получения надежных результатов диагностики. Однако при групповом анализе, когда выводы делаются по группе или по сравнению групп, критическим является размер выборки, так как достаточный размер выборки необходим и для обеспечения репрезентативности, и для компенсации межиндивидуальных различий внутри выборки (не относящихся к исследуемому параметру), которые в случае инструментальных методов исследования, таких как фМРТ, могут быть больше, чем случайная погрешность отдельных измерений.

Увеличение размера выборки упрощает введение рандомизации стимулов по участникам эксперимента, если это требуется.

При этом уменьшение количества предъявлений при групповых исследованиях<sup>1)</sup> является не отрицательным, а положительным фактором — так как позволяет снизить утомление участников эксперимента и смещение их внимания на второстепенные аспекты, не связанные с инструкцией.

<sup>1</sup> В диссертационной работе задачи ограничены только групповым анализом. В задачах индивидуального анализа требования к количеству стимулов принципиально другие, но рассмотрение вопроса о количестве стимулов, необходимых для индивидуального анализа, выходит за рамки работы.

#### 4.2.6. Результаты повоксельного сравнения различных способов обработки по метрике ПС

По полученным разными способами величинам активаций вычислялась метрика качества обработки данных — ПС. Процедура аналогична описанной выше для сигналов КГР и ФПГ. В данном разделе анализировались повоксельные совпадения по максимуму величины активации на основе фМРТ-сигнала.

На рисунке 4.4 приведены результаты анализа — повоксельные оценки ПС, отсортированные по возрастанию (для наглядности на графике показана только верхняя часть распределения, содержащая наиболее информативные с точки зрения выявления субъективной значимости воксели, то есть имеющие большое значение ПС). Приведены данные по всей выборке без кроссвалидации (см. раздел далее).

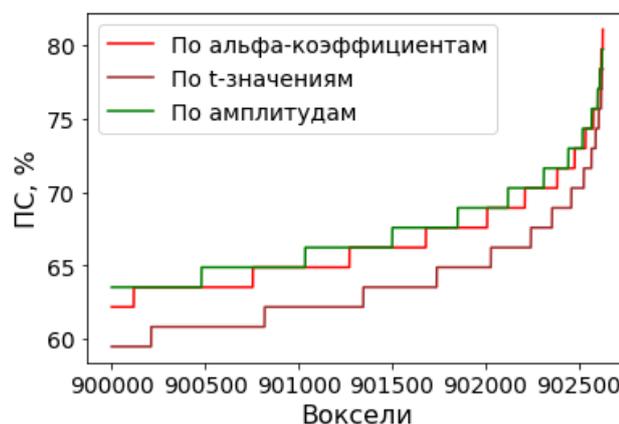


Рисунок 4.4 — Метрика ПС, полученная с помощью различных способов обработки фМРТ-сигнала, для отдельных вокселей. Данные по всей выборке ( $n=74$ ) без кроссвалидации. Воксели отсортированы по возрастанию ПС, приведены только наиболее информативные воксели

По результатам можно сделать вывод, что ПС, полученные по амплитудным оценкам (как по альфа-коэффициентам, так и по усредненным амплитудам), в целом выше по сравнению с ПС по  $t$ -значениям. Это может говорить о большей информативности амплитудных оценок в отношении субъективной значимости стимулов.

По амплитудным оценкам по усреднению ПС немного выше по сравнению с ПС по альфа-коэффициентам. Хотя это превышение может быть обусловлено и

ложноположительными результатами. Это было проверено с помощью кроссвалидации, результаты которой представлены далее.

#### **4.2.7. Результаты кроссвалидационного сравнения**

В данном разделе реализуется итерационно решение прямой и обратной психофизиологической задачи с построением зависимости между настраиваемым параметром и целевой метрикой. В целом такой подход напоминает кроссвалидацию, используемую обычно в машинном обучении для сравнения нейросетевых моделей (методов обработки в данном случае) и подбора гиперпараметров (параметров обработки данных). Разница заключается в том, что одной из переменных в этом процессе является психическое состояние человека, связанное с субъективной значимостью предъявляемых в эксперименте стимулов, для контрольного измерения которого нет средств, которые в настоящее время можно было бы назвать эталонными. Тем не менее, такой подход может быть эффективным, если целевая метрика (ПС) приближается к максимально возможному значению (100 %), что может означать несущественный (в контексте целей данной главы) вклад других факторов (подробнее см. раздел 3.1).

Для сравнения методов в данном случае требуется получить обобщенную метрику ПС по всем вокселям. Для этого можно предложить несколько решений. Одно из них — применение маски и весовых коэффициентов к оценкам величины активаций отдельных вокселей, чтобы учесть их информативность, с последующим усреднением взвешенных оценок по всему объему. Далее по усредненным оценкам вычисляется обобщенный ПС.

Маска строится по принципу отсекаания вокселей (обнуления их значений), получивших на обучающей выборке ПС, близкий к случайному (20 % для 5 альтернатив). Уровень отсеки задаётся произвольно и является объектом для итерационной оптимизации.

При задании весовых коэффициентов реализуется предположение о том, что воксель, получивший на тренировочной выборке большую величину ПС, должен вносить больший вклад при вычислении суммарной оценки. Поэтому

присваивается весовой коэффициент, равный значению ПС для этого вокселя на тренировочной выборке. Далее весовые коэффициенты умножаются на маску.

Уровень отсечки при построении маски варьировался от 30 до 75 % для того, чтобы определить максимальные возможности (информативность) того или иного способа вычисления величин активаций.

При построении маски в силу большого числа вокселей некоторые из них могут ошибочно получать высокие значения ПС, что потенциально может приводить к ухудшению качества маски. Для исключения сильно зашумленных вокселей из анализа выполнялось *дополнительное прореживание обучающей выборки*. Для этого выполнялась проверка  $p$ -значений, полученных при вычислении величин активаций. В случае GLM  $p$ -значения вычислялись по  $t$ -статистике GLM, а в случае АКО выполнялось сравнение 5 значений (число предъявлений) для каждого из стимулов с 20 значений для остальных стимулов (число предъявлений, умноженное на число оставшихся стимулов) по  $t$ -критерию. Для отсечки по  $p$ -значению был экспериментально выбран порог  $p=0,15$  (при больших значениях воксель занулялся). Довольно высокая величина порогового  $p$ -значения означает, что приросту ПС способствует отбрасывание только самых зашумленных вокселей. Такой порог оптимален и для АКО, и для альфа-коэффициентов GLM, и для  $t$ -статистики GLM.

Для кроссвалидации использовалось разделение набора данных ( $n=74$ ) на две подвыборки — обучающую и валидационную. Подвыборки имели равный размер ( $n=37$ ). Разделение производилось случайным образом без применения каких-либо дополнительных алгоритмов.

Результаты кроссвалидации показаны на рисунке 4.5 (300 итераций для каждой точки). Наилучшие результаты показывает способ вычисления ПС, основанный на альфа-коэффициентах GLM (максимум показан пунктирной линией), достигая 81,7 %. Приблизительно такого же максимального значения 81,5 % (статистически неотличимого) достигает и способ, основанный на усреднении амплитуд сигнала на эпохе анализа с дополнительным прореживанием маски (зеленая кривая). Результаты по дополнительному

прореживанию маски приведены только для амплитудных коэффициентов — для способов анализа, основанных на GLM, дополнительное прореживание маски не приводит к увеличению ПС, а только ухудшает его. В целом, максимальные значения ПС для всех методов анализа находятся в районе 80-82 %, не сильно различаясь между собой.

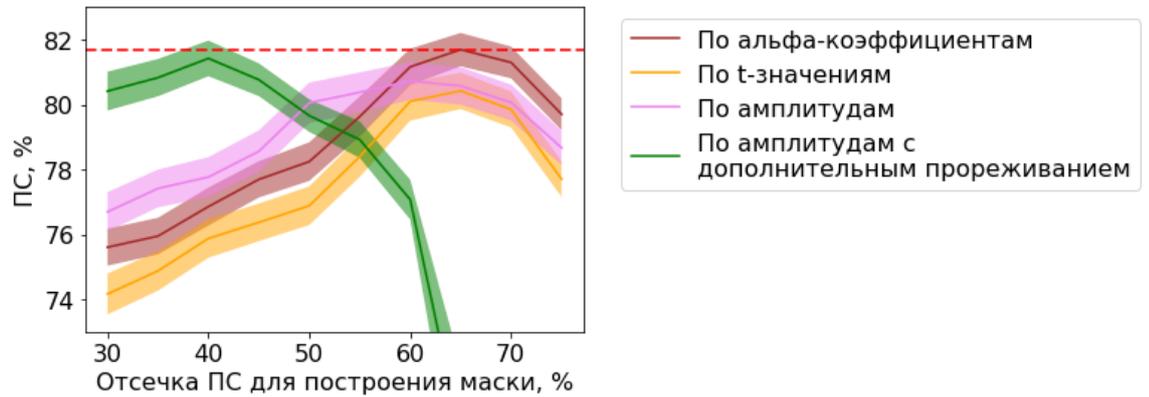


Рисунок 4.5 — Кроссвалидационная оценка ПС (число итераций 300 для каждой точки), показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

Основной вывод заключается в том, что амплитудный анализ (как по альфа-коэффициентам GLM, так и с помощью обычного усреднения сигнала фМРТ на эпохе анализа) не менее информативен, чем параметрический статистический анализ, а в некоторых задачах может быть более информативен.

### 4.3. Сопоставление способов анализа фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга

При анализе фМРТ-данных интерес представляет не только повоксельный анализ, но и обобщение функциональных данных по структурам мозга. Такое обобщение, во-первых, может повысить соотношение сигнал-шум, а во-вторых, упрощает визуализацию и интерпретацию полученных результатов.

Визуализация сигналов фМРТ, усредненных по эпохам 10 с от отметки предъявления стимула, показана на рисунке 4.6. Здесь показано только несколько областей коры мозга для иллюстрации (сопоставление названий см. в приложении А). Полная визуализация по всем структурам мозга приведена в главе 5.

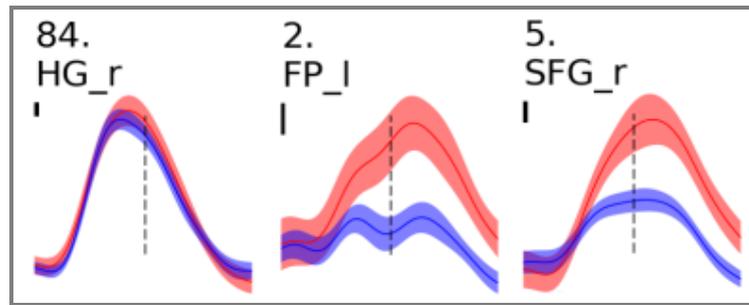


Рисунок 4.6 — фМРТ-сигналы от структур мозга (сопоставление названий структур см. в приложении А), усредненные по участникам эксперимента ( $n=74$ ), и разделенные на эпохи по 10 с от отметки предъявления стимула. Доверительные интервалы по уровню две стандартных ошибки ( $p \leq 0,05$ ). Красным цветом обозначены активации связанные с актуализацией субъективно значимой информации, синим цветом — незначимой. Вертикальными линиями для каждого графика обозначен масштаб амплитуды

Визуализация сигналов фМРТ, приведенная на рисунке 4.6., позволяет выделить различия в динамике сигналов. Например, в первичных слуховых областях коры (*извилина Гешля*, на рисунке график слева) активации на значимые и незначимые стимулы статистически не различаются по амплитуде и форме сигнала. Форма сигнала в этих областях напоминает гемодинамический ответ, принимаемый обычно в качестве стандартного при фМРТ-обработке. Напротив, во фронтальных областях коры (средний и правый графики) больших полушарий мозга активация на значимые и незначимые стимулы существенно различается по амплитуде. Форма фМРТ-сигнала также различна. Можно выделить ранние и поздние компоненты (низколатентные и высоколатентные). Первые имеют пик около 3,3 с, а вторые — 6,6 с.

Такая форма фМРТ-сигналов, полученных в парадигме связанных с событиями активаций, существенно отличается от формы гемодинамического ответа, принимаемого в качестве стандартного, что согласуется с ранее высказанными предположениями о более сложной форме сигнала в структурах мозга, наиболее тесно связанных со сложной когнитивной деятельностью.

Далее, как описано в предыдущих разделах, различные способы обработки фМРТ-сигнала (по альфа-коэффициентам, по  $t$ -значениям и по АКО)

сравнивались по метрике ПС, но при этом полученные оценки перед сопоставлением усреднялись по структурам мозга.

#### 4.3.1. Результаты сравнения различных способов оценки активаций с усреднением по структурам мозга по метрике ПС

Далее проводится сравнение различных способов анализа фМРТ-данных, усредненных по структурам мозга, с помощью метрики ПС.

Общая выборка и процедура разделения на обучающую и валидационную подвыборки — те же, что и в предыдущих разделах.

Обобщение повоксельных альфа-коэффициентов,  $t$ -значений и АКО по анатомическим структурам производилось простым усреднением этих параметров. В качестве анатомического атласа использовался «Атлас CONN» (подробнее об этом атласе см. в главе 2).

На рисунке 4.7 приведены результаты вычисления ПС для отдельных структур мозга, отсортированные по возрастанию (для наглядности на графике показана только верхняя часть распределения, содержащая наиболее информативные с точки зрения выявления субъективной значимости структуры, то есть имеющие большое значение ПС). Приведены данные по всей выборке  $n=74$  без кроссвалидации (см. раздел далее).

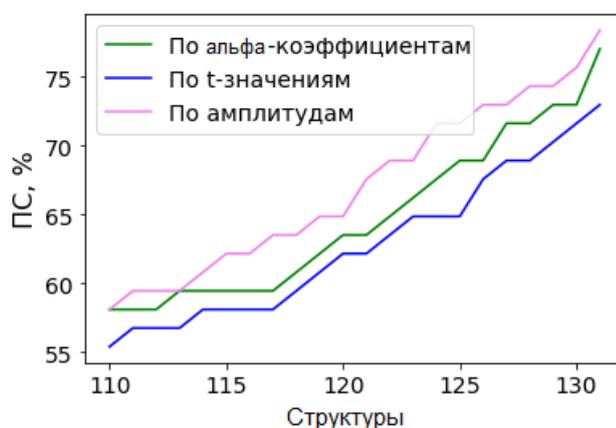


Рисунок 4.7 — Метрика ПС, полученная с помощью различных способов обработки фМРТ-сигнала, для структур мозга. Данные по всей выборке ( $n=74$ ) без кроссвалидации. Структуры отсортированы по возрастанию ПС, приведены только наиболее информативные структуры

По результатам можно сделать вывод, что ПС, полученные по АКО, выше, чем ПС по альфа-коэффициентам и  $t$ -значениям. Это может говорить о большей информативности АКО в отношении субъективной значимости стимулов. А также о том, что такие оценки лучше подходят для объединения с другими параметрами путем усреднения и другого количественного анализа.

#### 4.3.2. Результаты кроссвалидационного сравнения

Для кроссвалидационного сравнения здесь также использовалась маска и весовые коэффициенты, только не по вокселям, а по структурам мозга. Уровень отсечки при построении маски варьировался от 20 до 75 %.

Результаты кроссвалидации показаны на рисунке 4.8 (300 итераций для каждой точки). Наилучшие результаты показывает способ вычисления ПС по АКО (максимум показан пунктирной линией), достигая 79,5 %. ПС по альфа-коэффициентам составил 76,3 %, а по  $t$ -значениям — 75,3 %. Наилучшие два значения статистически значимо различаются по  $t$ -критерию Стьюдента на уровне  $p \leq 0,05$ .

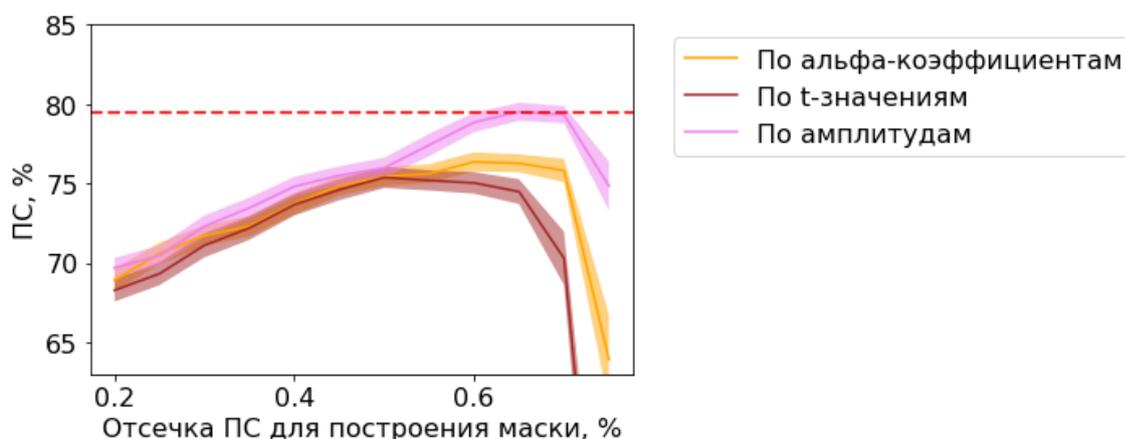


Рисунок 4.8 — Кроссвалидационная оценка ПС (число итераций 300 для каждой точки), показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

Можно повторить вывод о том, что АКО обладают большей информативностью в отношении субъективной значимости стимулов, чем другие проанализированные параметры, а также о том, что такие оценки лучше подходят для объединения данных путем усреднения и другого количественного анализа.

Анализ по структурам мозга, несмотря на предполагаемое повышение соотношения сигнал-шум, оказался немного менее информативным, чем анализ по вокселям. Но это отличие не настолько велико, чтобы отказаться от такого анализа, так как он удобен для содержательной интерпретации результатов исследований.

#### **4.4. Анализ временных закономерностей фМРТ-сигналов в различных структурах мозга**

Для выявления наиболее информативных интервалов (эпох) анализа были построены распределения ПС в зависимости от времени начала и длительности эпохи. Полученные распределения для ТСИ и выборки 76 человек приведены на рисунке 4.9 (сопоставление названий структур см. в приложении А).

Распределения показывают, что пиковые значения ПС составляют 80-88 % для разных структур мозга. Оптимальные временные параметры для разных структур отличаются — оптимум для *таламуса* смещен влево (что значит более раннее появление информативного сигнала) по сравнению с лобными областями коры больших полушарий.

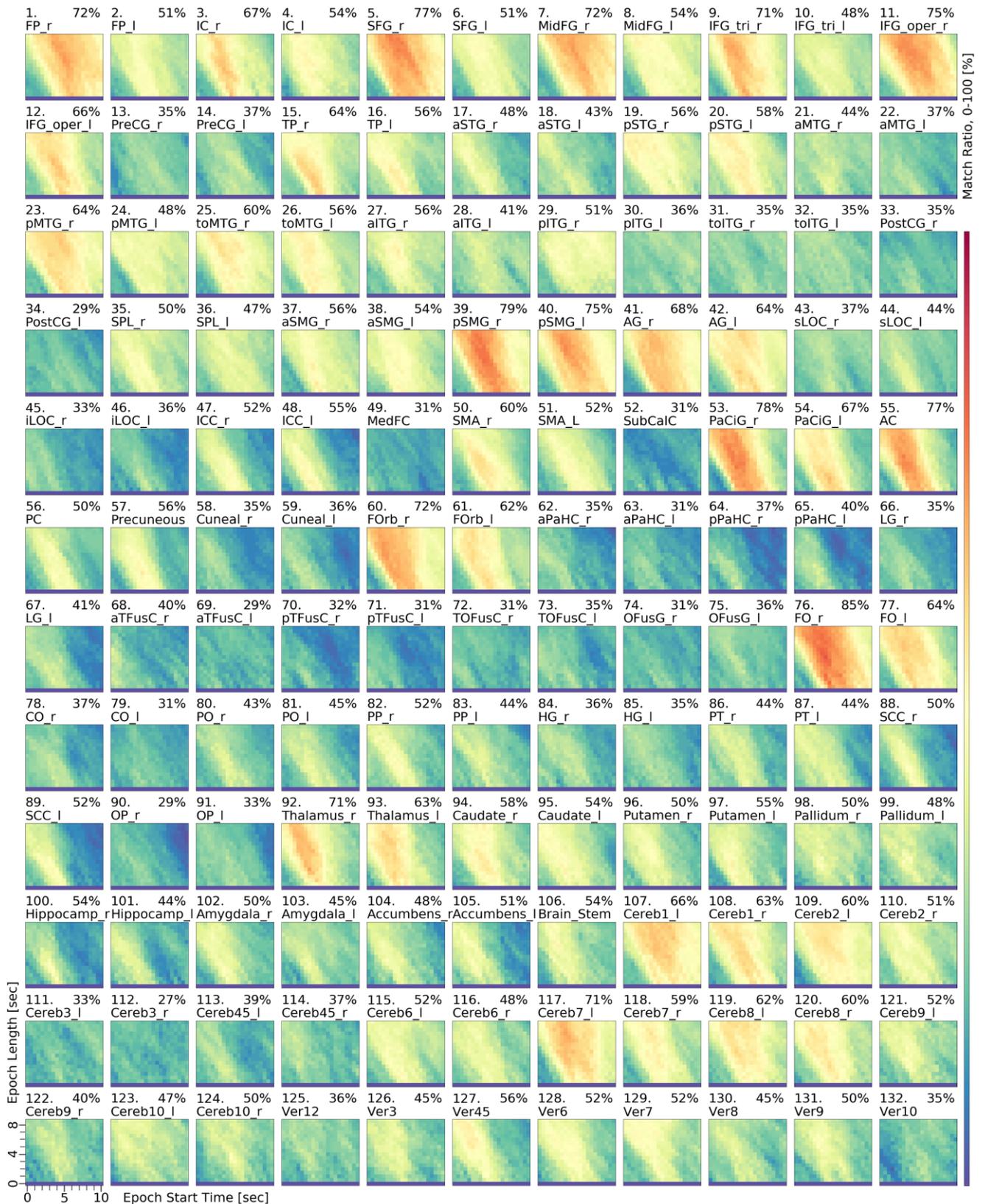


Рисунок 4.9 — Распределение ПС (кодируется цветом) при варьировании начала и длительности эпохи усреднения фМРТ-сигнала в структурах мозга. Тест ТСИ,  $n=74$ . По горизонтали отложено время начала эпохи усреднения от отметки предъявления стимула, по вертикали — длительность эпохи усреднения. Числами указан максимальный ПС для каждой структуры

Такое графическое представление позволяет визуально оценить устойчивость метрики ПС к изменению параметров обработки для различных структур мозга. По рисунку 4.9 можно выделить наиболее информативные структуры, которые будут проанализированы в дальнейшем в главе 5 отдельно: *лобная оперкулярная кора* (номера областей — 76, 77), *лобная орбитальная кора* (60, 61), *задняя часть надкраевой извилины* (39, 40, *левые и правые*); *лобный полюс* (1), *верхняя лобная извилина* (5), *средняя лобная извилина* (7), *задняя часть нижней лобной извилины* (11, *только правые*).

Подкорковые структуры показывают меньшую дифференциацию активности в связи со значимостью актуализируемой информации. Среди подкорковых структур следует отметить *таламус* (92, 93), *каудальное ядро* (94, 95) и ряд структур *мозжечка*.

#### **4.5. Проверка необходимости приведения фМРТ-сигнала к базовому значению при вычислении АКО**

Актуальным является вопрос о том, следует ли вычитать базовое значение при анализе временных рядов фМРТ-сигнала. В главе 3 было обнаружено, что для сигнала КГР такое вычитание улучшает метрику ПС, а для сигнала ФПГ — ухудшает.

На рисунке 4.10 показано распределение ПС в зависимости от параметров эпохи аналогичное приведенному выше на рисунке 4.9 (сопоставление названий структур см. в приложении А), но здесь при анализе вычиталось базовое значение, вычисляемое на интервале 0-1,5 с. Это обусловило общее уменьшение ПС.

Результаты показывают, что вычитание базового значения при анализе временных рядов фМРТ-сигнала не улучшает, а существенно ухудшает метрику ПС, аналогично сигналу ФПГ. Этот эффект можно объяснить сходной природой сигналов фМРТ и ФПГ.

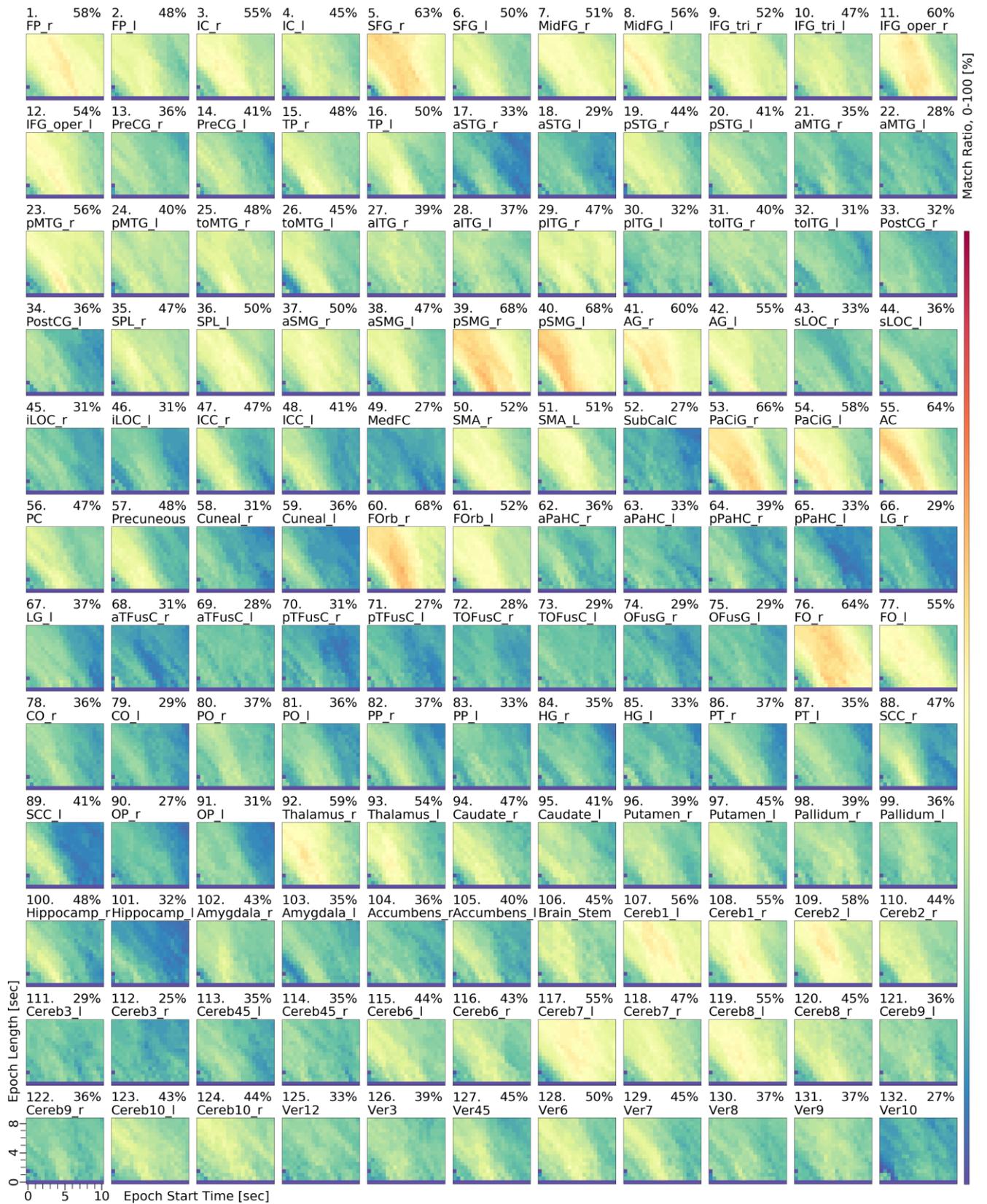


Рисунок 4.10 — Распределение ПС (кодируется цветом) при варьировании начала и длительности эпохи усреднения фМРТ-сигнала в структурах мозга. Тест ТСИ,  $n=74$ . При анализе вычиталось базовое значение сигнала. По горизонтали отложено время начала эпохи усреднения от отметки предъявления стимула, по вертикали — длительность эпохи усреднения.

Числами указан максимальный ПС для каждой структуры

#### 4.6. Заключение по четвертой главе

В главе 4 были предложен и экспериментально обоснован (с помощью апробированной в главе 3 методики) амплитудный метод анализа фМРТ-сигнала. По результатам можно сделать вывод о том, что предложенный способ анализа фМРТ-данных с помощью АКО, не претендуя на универсальность, имеет характеристики, сопоставимые с наиболее распространенным при обработке фМРТ-данных методом GLM-картирования, и потому может использоваться для дальнейшего анализа данных. Предложенный способ обладает рядом ценных качеств: проще в применении и интерпретации (в настоящее время сложность обработки данных является одной из существенных причин, препятствующих рутинному использованию фМРТ в медицине); потенциально требует меньшей вычислительной ресурсоемкости; не зависит от труднодоступного проприетарного программного обеспечения (Matlab).

Критерий качества обработки данных (метрика ПС), полученный по амплитудным оценкам (как по альфа-коэффициентам, так и по АКО), в целом был выше по сравнению с ПС по  $t$ -значениям — как при повоксельном анализе, так и при анализе по структурам мозга. Значения метрики ПС, вычисленной двумя амплитудными методами (по альфа-коэффициентам GLM и АКО), оказались сопоставимы при повоксельном анализе. При анализе по структурам мозга АКО показали несколько лучшие значения ПС. Это говорит о возможности применения АКО для дальнейшего использования при обработке данных.

Анализ временных рядов фМРТ-сигнала показал, что во фронтальных областях коры больших полушарий мозга активация существенно различается по амплитуде и форме. Можно выделить ранние и поздние компоненты (низколатентные и высоколатентные). Первые имеют пик около 3,3 с, а вторые — 6,6 с. Такая форма фМРТ-сигналов, полученных в парадигме связанных с событиями активаций, существенно отличается от формы гемодинамического ответа, принимаемого в качестве стандартного, что согласуется с ранее высказанными предположениями о более сложной форме сигнала в ассоциативных областях мозга.

Информативные временные интервалы для разных структур мозга отличались — оптимум для таламуса смещен в сторону меньшей латентности, что значит более раннее появление информативного сигнала, по сравнению с лобными областями коры больших полушарий.

Вычитание базового значения при анализе временных рядов фМРТ-сигнала существенно ухудшало метрику ПС, аналогично сигналу ФПГ. Этот эффект можно объяснить тем, что сигналы фМРТ и ФПГ в определенной степени зависят от динамики сосудов и потому имеют сходные свойства, но это требует дальнейшего изучения.

## **Глава 5. Результаты МРТсП-фМРТ-исследования процессов актуализации памяти человека**

В главе 5 приведены результаты сопоставления физиологических показателей (КГР, ФПГ и фМРТ) человека при актуализации памяти, различающейся по субъективной значимости и времени приобретения.

### **5.1. Постановка проблемы**

В связи с тем, что системные процессы носят общеорганизменный характер, при исследовании психофизиологических закономерностей существует проблема одновременного влияния множества переменных на измеряемые величины. При исследовании памяти, такими переменными могут быть как возраст формирования системы в онтогенезе, так и субъективная значимость актуализируемой информации (см. главу 1).

В диссертационной работе была поставлена задача количественно оценить связь указанных факторов с физиологическими сигналами КГР, ФПГ и фМРТ. Для решения этой задачи требуется сравнить результаты, полученные при выполнении участниками эксперимента двух криминалистических тестов ТСИ и ТЗВ (описание см. в главе 2), моделирующих сокрытие значимой информации, сохраняемой в памяти человека на протяжении десятилетий (старая информация) и сформированной менее чем за час до эксперимента (новая информация).

### **5.2. Методические дополнения по пятой главе**

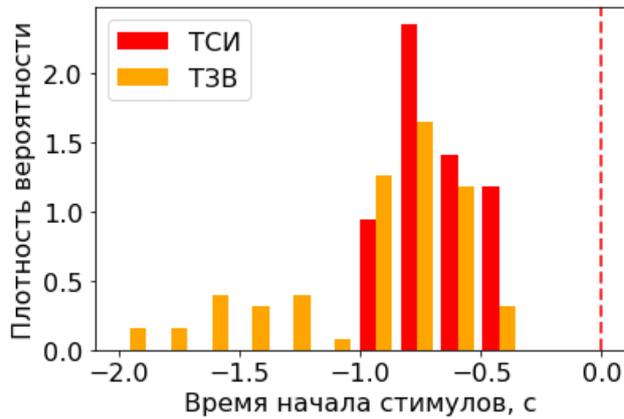
Общая методика исследования описана в главе 2. Однако специфика обработки данных в главе 5 требует уточнения некоторых аспектов.

### 5.2.1. Балансировка сравниваемых условий

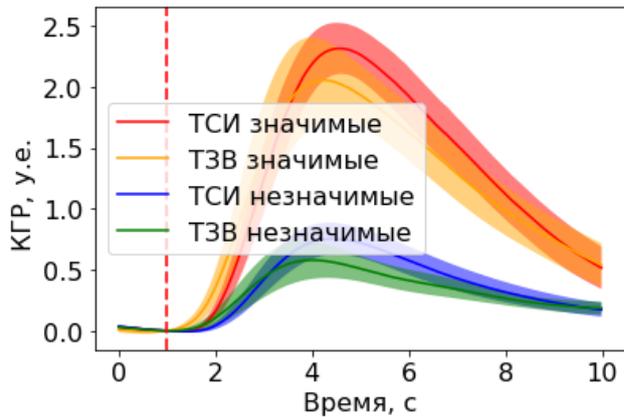
В силу чрезвычайно высокой сложности и стоимости получения комплексных фМРТ-данных план эмпирического исследования был сформирован на уровне лаборатории и включал в себя проверку наряду с нашими и ряда других гипотез, выходящих за рамки данной диссертационной работы, что может приводить к усложнению интерпретации данных, полученных при решении задач, поставленных в диссертационной работе. Чтобы выполнить поставленные задачи, требуется учитывать имеющиеся ограничения и вводить необходимые поправки.

Одной из особенностей использованных криминалистических тестов является то, что отметка времени предъявления стимулов ставится не вначале предъявления, а в конце. При этом длительность предъявляемой участнику эксперимента фразы в тестах ТСИ и ТЗВ различается. В тесте ТСИ стимул состоит из одного слова (имени). В тесте ТЗВ большая часть вопросов также состоит из одного слова (фамилии с визитной карточки), но некоторые вопросы состоят из трех слов (название организации). Подробнее стимульный материал описан в главе 2.

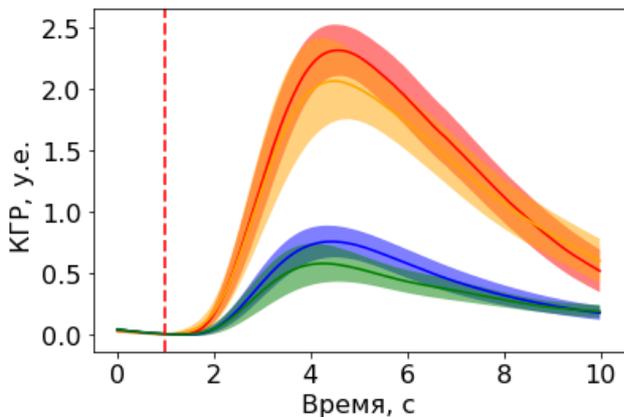
Чтобы проанализировать влияние длительности стимулов на временные параметры сигнала, было построено распределение времени начала предъявления стимула относительно маркера предъявления стимула (рисунок 5.1 «а»). К сожалению, в фМРТ-эксперименте записывались только звуковые ответы участника эксперимента, но не был записан звук голоса оператора, произносившего вопросы в режиме реального времени. Чтобы косвенно оценить порядок возможных длительностей, для построения распределения была записана отдельная серия предъявлений. Полученная в результате средняя разница длительностей стимулов между ТСИ и ТЗВ составила  $0,26 \pm 0,05$  с. Хотя форма распределения далека от нормальной, введение полученной поправки полностью компенсирует сдвиг усредненных сигналов КГР по времени между тестами ТСИ и ТЗВ (см. рисунок 5.1 «б» и «в»), что говорит о правильности применения этой поправки. Далее эта поправка применялась при анализе временных рядов сигналов КГР, ФПГ и фМРТ.



а) распределение времен начала предъявления стимулов относительно маркера предъявления стимулов (пунктирная линия), предоставляемого оператором *после* предъявления стимула. Средняя разница длительности стимулов ТСИ и ТЗВ составила  $0,26 \pm 0,05$  с



б) исходный нормированный сигнал КГР для двух тестов, усредненный от маркера предъявления стимулов. Видно взаимное смещение графиков ТСИ и ТЗВ на величину средней разницы длительностей стимулов. Пунктирной линией показана точка приведения к базовому значению по амплитуде



в) сигнал КГР, скорректированный на 0,26 с для теста ТЗВ с целью учета большей средней длительности стимулов в ТЗВ. Видно, что коррекция практически устраняет взаимное смещение графиков ТСИ и ТЗВ. Пунктирной линией показана точка приведения к базовому значению по амплитуде

Рисунок 5.1 — Распределение времен начала предъявления стимулов относительно маркера предъявления стимулов (а); исходный нормированный сигнал КГР для двух тестов, усредненный от маркера предъявления стимулов (б); сигнал КГР, скорректированный на 0,26 с для теста ТЗВ с целью учета большей средней длительности стимулов в ТЗВ (в)

Другой особенностью использованных тестов являлось то, что в тесте ТЗВ применялось 6 предъявлений стимулов, а в тесте ТСИ — 5. Чтобы сбалансировать их по дисперсии, доверительным интервалам и амплитуде получаемых оценок величин активаций, в тесте ТЗВ использовалось только 5 первых предъявлений стимулов (для целей текущей главы).

Третьей особенностью являлось то, что один из нейтральных стимулов в мужской выборке ТСИ был именем отца (в соответствии с отчеством участника эксперимента). Хотя сравнительный анализ показал, что наличие такого стимула среди незначимых стимулов не меняет общие выводы главы 5, в приведенных далее результатах этот стимул исключался в мужской выборке теста ТСИ.

Четвертой особенностью являлось то, что участник эксперимента должен был назвать после теста, сколько раз называлось его имя или информация с выбранной визитной карточки (то есть число значимых стимулов). Это требование задавалось инструкцией, поэтому участник эксперимента во время теста должен был подсчитывать про себя число значимых стимулов. При разработке дизайна исследования это объяснялось необходимостью повышения сосредоточенности участника эксперимента в ходе теста. Соответственно, при исследовании периферической физиологической активности и активности мозга указанный фактор неотделим от фактора субъективной значимости. Остается открытым вопрос о его величине и соотношении с исследуемым фактором субъективной значимости. Тем не менее, при сравнении выборок между собой (мужской — женской, ТСИ — ТЗВ), указанный фактор был сбалансирован и должен был компенсироваться.

### **5.2.2. Нормировка данных**

В исследованиях применяются различные способы нормировки данных — как по группе, так и в пределах набора данных отдельного участника эксперимента. Вторым вариантом применяют в тех случаях, когда амплитуда активаций между участниками эксперимента существенно различается. Например, для сигналов КГР и ФПГ средние значения активаций у участников эксперимента различаются в сотни раз. В имеющихся фМРТ-данных различия составляют порядка нескольких раз. Проблема в том, что различные виды нормировки искажают соотношения амплитуд сигнала исследуемых объектов. В наилучшем варианте данные должны обрабатываться без нормировки, в исходных

единицах измерения, но в этом случае размер выборки должен исчисляться тысячами участников эксперимента, что трудновыполнимо в психофизиологии.

В контексте диссертационной работы можно выделить четыре вида нормировки на стандартное отклонение (другое название — стандартизация, приведение к стандартному отклонению):

а) повоксельная нормировка по измерениям одного вокселя в пределах одного отдельного участника эксперимента — этот вид нормировки искажает амплитудные соотношения между вокселями и областями мозга, и поэтому рассматривался в диссертационной работе как нежелательный;

б) различные варианты «(регрессионных линейных) моделей со смешанными эффектами» (*Mixed-effect models*), в которых учитываются различия дисперсии данных у разных участников эксперимента и групп с помощью различных нетривиальных способов. Например, в пакете FSL реализован весьма сложный алгоритм FLAME, использующий многоуровневое линейное моделирование на основе статистики Байеса, «на каждом уровне иерархии вводящий различные компоненты дисперсии со случайными эффектами» (Woolrich et al., 2004). У этого решения есть две проблемы: во-первых, весовые коэффициенты вычисляются повоксельно и, как и в предыдущем случае, нарушаются амплитудные соотношения между вокселями; во-вторых, реализации линейных регрессионных моделей со смешанными эффектами уникальны для различных программных пакетов обработки фМРТ-данных, что затрудняет сравнение результатов. Это способ применялся при контрольном анализе данных с помощью стандартных средств (пакета FSL);

в) нормировка на стандартное отклонение, вычисленное по объему по всем временным отсчетам в пределах набора данных одного участника эксперимента для одного теста, — позволяет сохранить амплитудные соотношения между вокселями, но нежелательна для сравнения отдельных записей (тестов) между собой, так как может подавить различия между выборками. К сожалению, фМРТ-данные были предобработаны с использованием такой нормировки перед процедурой очистки данных с помощью ICA (см. раздел 2.6);

г) нормировка по объему, как и в предыдущем случае, но с объединением нормировочного коэффициента по двум тестам (как среднее арифметическое, среднее квадратичное или другим способом). Этот способ применялся в диссертационной работе как наиболее подходящий вид нормировки для сравнения ТСИ и ТЗВ по сигналам КГР и ФПГ, так как, с одной стороны, уменьшает разброс данных между участниками эксперимента в выборке, а с другой стороны, не изменяет соотношения амплитуд между вокселями и тестами;

д) нормировка итоговых оценок на стандартное отклонение, вычисленное по выборке. Применялась при вычислении размера эффекта по Коэну, см. далее. Имеет тот же недостаток, что и вариант «а», если выполняется повоксельно, и дает различный размер эффекта в зависимости от разброса данных в вокселе. К тому же эта нормировка избыточна, если перед объединением в группу данные уже нормировались на разброс данных по участнику эксперимента — вариант «в» или «г».

### **5.2.3. Поправки на множественные сравнения**

При обработке фМРТ-данных нет консенсуса о том, какую поправку на множественные сравнения применять. Существует два класса поправок — FWER (Family-Wise Error Rate) и FDR (False Discovery Rate) (Benjamini, Hochberg, 1995), в каждом из которых имеется большое число существенно различающихся между собой (и по вычислениям и по результатам) методов. Некоторые из этих методов зависят не только от самого алгоритма, но и от ряда дополнительных параметров. Один из основных принципов науки — воспроизводимость полученных результатов. При этом существующие реализации алгоритмов поправок на множественные сравнения в популярных программах фМРТ-анализа крайне сложно воспроизвести. Например, алгоритмы коррекции FWER, реализованные в пакете SPM12 (Лондон, Великобритания), практически невозможно воспроизвести, даже имея высокую математическую подготовку, из-за того, что в них применяется несколько методов одновременно и содержатся настраиваемые параметры. Поправка FDR в пакете FSL также слабо задокументирована, ее

реализация выполнена в виде отдельного программного модуля и не входит в графический интерфейс фМРТ-анализа. Эта реализация также содержит неочевидные плохо задокументированные настраиваемые параметры.

Повоксельные поправки FDR, которые относительно легко реализовать на независимой платформе, справедливо критикуются авторитетными исследователями фМРТ (Chumbley, Friston, 2009) из-за того, что отдельные воксели в реальных данных существенно связаны между собой, что не предполагается повоксельными алгоритмами коррекции.

При этом предлагаемые указанными авторами кластерные решения зависят от дополнительных параметров и не могут рассматриваться как универсальный подход. Использование кластерных поправок встречается с противоположной проблемой — сама идея, что нейронная активность обязательно должна образовывать кластеры по некоторому заданному принципу (помимо очевидного инструментального влияния процесса сглаживания данных на образование кластеров) — тем более кластеры с требованиями по размерам и очертаниям, как это подразумевается в некоторых решениях, — уже накладывает парадигмальные ограничения на обработку данных. Экспериментально обоснованная критика кластерных поправок приведена в известной работе А. Эклунда (Eklund et al., 2016), а также в других работах (Woo et al., 2014; Eklund et al., 2019).

В одной из работ по обсуждаемой теме обращается внимание, что при фМРТ-анализе следует соблюдать баланс между ошибками первого и второго рода, а не фокусироваться только на ошибках первого рода, для контроля которых предназначены поправки на множественные сравнения (Slotnick, 2017). Это не новая идея, а реализация известного принципа визуализации зашумленных данных в технических системах (телевидение, фотография и т.д.), при котором требуется добиться компромисса между отображением объекта и неизбежным появлением фоновых артефактов. По мнению автора диссертационной работы, все разнообразие алгоритмов коррекции WFER и FDR, принятых в фМРТ-анализе, призвано лишь «математически оправдать» оптимальный для визуального анализа уровень контраста между объектом и фоном. Этот контраст,

в свою очередь, как раз и определяется соотношением ошибок первого и второго рода при выбранной поправке на множественные сравнения и некотором традиционно принятом уровне значимости<sup>1)</sup>.

На практике результаты визуализации фМРТ-данных при  $p \leq 0,001$  без поправки на множественные сравнения имеют определенное сходство с результатами при  $p \leq 0,05$  с наиболее распространенными вариантами коррекции FWER и FDR (хотя и не всегда эквивалентны). Это можно объяснить соображениями, приведенными в предыдущем абзаце — поправки на множественные сравнения, принятые в фМРТ-анализе, выбираются исследователями не по фундаментальным математическим основаниям, а «селекционируются» по визуально приемлемому результату, обусловленному балансом ошибок первого и второго рода. В идеальном случае в исследовании должна оцениваться не только ошибка первого рода, а строиться многомерное пространство, соотносящее ошибки первого и второго рода, размер выборки и величину эффекта (Cohen, 1998). В диссертационной работе провести такого рода анализ затруднительно, так как это выходит за рамки тематики специальности, но в дальнейшем он представляется перспективным.

Исходя из изложенного, чтобы обеспечить прозрачность и взаимную совместимость результатов, для фМРТ-картирования в диссертационной работе применялись вычисления как с поправками, так и без поправок на множественные сравнения, но с достаточно жестким уровнем значимости, принятым при фМРТ-анализе без поправок, —  $p \leq 0,001$ . Формально, для выводов по экспериментальным гипотезам учитывались поправки на множественные сравнения с помощью наиболее распространенных и однозначно реализуемых методов: FDR по Бенджамини — Хохбергу (если не указано иное) и FWER по Бонферрони (Benjamini, Hochberg, 1995).

---

<sup>1</sup> Интересно, что двустороннее распределение Лапласа, по которому определяется  $p$ -значение по  $z$ -статистике, а также по  $t$ -статистике при большом размере выборки, округляется до 0,05000 в таблице значений при точности 5 знаков после запятой, в отличие от всех остальных значений в таблице. Во времена развития статистических методов этот фактор мог иметь определенное значение при выборе подходящего порога для ошибки первого рода.

### 5.2.4. Проблема визуального сопоставления активности мозга между различными структурами, а также между группами участников эксперимента

При анализе фМРТ-данных нередко допускается два нарушения принципов статистического анализа данных (см. рисунок 5.2). Это обстоятельство во многом объясняет сложившуюся ситуацию в корне неверной интерпретации фМРТ-данных (с выделением «активных» и «неактивных» областей), описанную в разделе 1.4.2 обзора литературы.

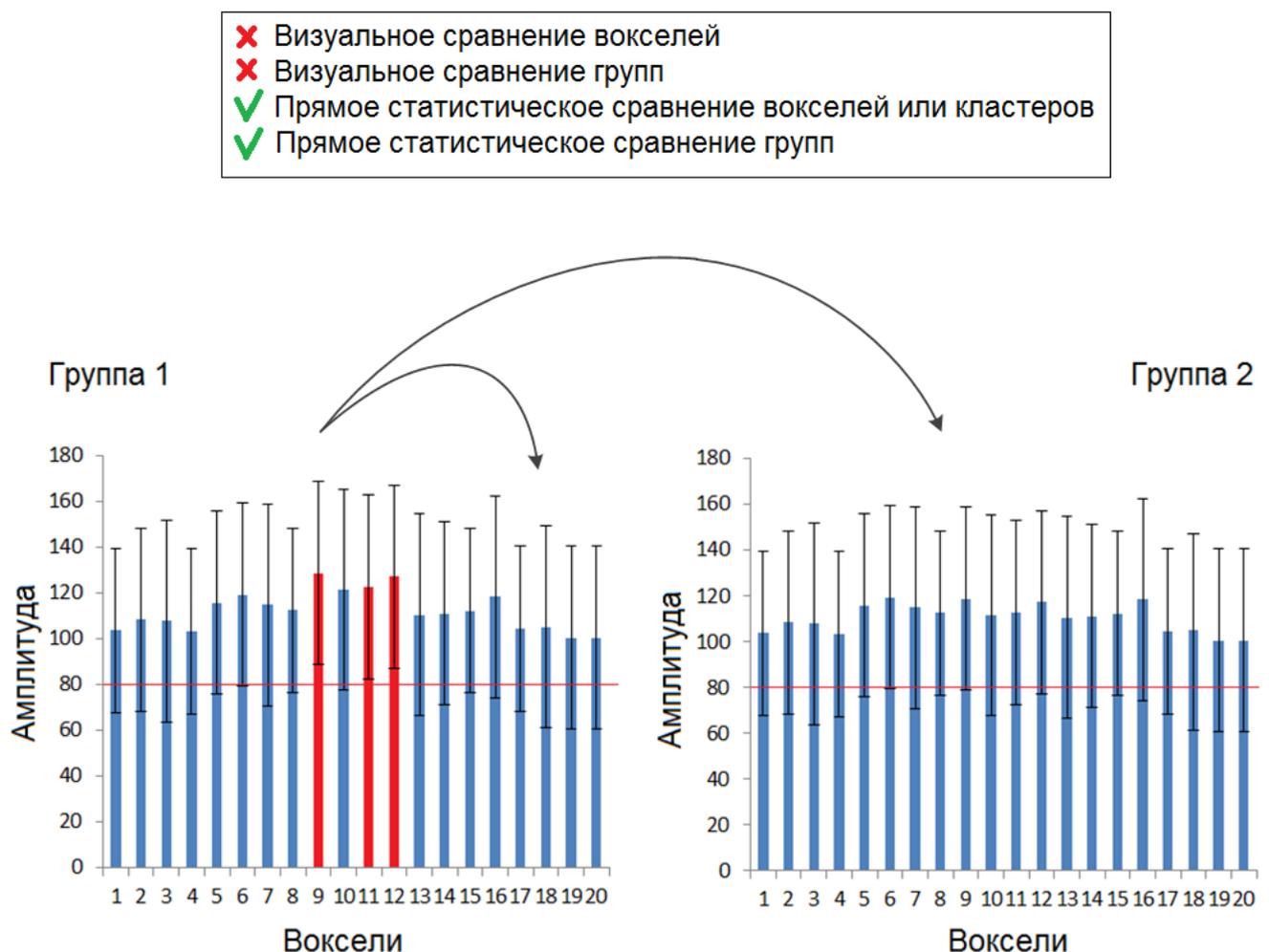


Рисунок 5.2 — Иллюстрация часто применяемых при фМРТ-анализе сравнений (искусственные данные, константа амплитуды для сравнения задана произвольно, указаны доверительные интервалы)

Рисунок 5.2 иллюстрирует три типа сравнений. Первый тип — это корректно выполненное статистическое сравнение среднего значения какого-либо

параметра, измеренного в отдельном вокселе, с константой. Константа задана произвольно, но может быть равна нулю, если, например, выполняется парный тест разности двух экспериментальных условий. В фМРТ-анализе таким образом выполняется статистическое параметрическое картирование — выделенные на рисунке 5.2 воксели составляют изображение. Однако экспериментальные гипотезы нередко требуют сравнения двух выборок между собой (второй тип сравнений) или сравнения активности мозга в различных структурах мозга (третий тип сравнений). На рисунке 5.2 такие сравнения показаны стрелками.

Сравнения между структурами и между выборками некорректно выполнять просто визуально. По рисунку 5.2 видно, что если выполнить прямое статистическое сравнение соседних вокселей, то ни одно из сравнений не будет значимым при указанных на рисунке 5.2 доверительных интервалах ошибки среднего.

То же самое касается сравнения двух выборок (будь то независимые выборки или два сеанса фМРТ на одной выборке). Показанные на рисунке 5.2 доверительные интервалы говорят о том, что прямое сравнение выборок не покажет значимых различий, в то время как визуально два изображения будут различаться.

Необходимость прямого статистического сопоставления отдельных вокселей, структур мозга и групп участников эксперимента в фМРТ-анализе сталкивается с рядом сложностей:

а) так как независимых переменных в этом случае оказывается больше, чем одна (первая, например, пол, а вторая — номер вокселя), то это приводит к необходимости применения многомерных методов статистического анализа, что, в свою очередь, сопряжено не только с трудностями подготовки данных (по типу, дисперсии, форме распределения и т.д.), но и со сложностями представления и интерпретации полученных результатов;

б) особенностью фМРТ-данных является то, что множество вокселей образуют кластеры самых разнообразных конфигураций. И соотношение активности кластеров между собой может быть статистически значимым, в то

время как сравнение активности отдельных вокселей не покажет значимых результатов, либо они будут плохо интерпретируемыми. Визуальный анализ в этом случае имеет даже преимущество, так как человек может замечать определенные паттерны даже при условии того, что каждый отдельный воксель не отличается от других статистически при прямом сравнении. Однако такой анализ несет в себе субъективные факторы и требует каких-либо способов для формализации и статистической проверки выводов.

Исходя из изложенного, в диссертационной работе выполнено прямое статистическое сравнение групп, где это возможно. В случае наличия двух независимых переменных выполнялось понижение размерности путем вычисления обобщенной оценки (фактически размера эффекта) по одной из размерностей — например, вычисление разности между наборами данных, сгруппированных по одной из размерностей, и выполнение статистического анализа по второй размерности (см. разделы 5.4.3.2 и 5.4.3.3 далее). Чтобы при этом не возникало переизбытка неинтерпретируемых данных, вручную выделялись сравниваемые кластеры данных (левое и правое полушарие мозга).

Подход с понижением размерностей независимых переменных вручную требует формулирования осмысленных гипотез и анализ данных по ним (гипотетико-дедуктивный метод). Иногда это возможно — например, можно сформулировать гипотезы о соотношениях между левым и правым полушарием мозга, корковыми и подкорковыми структурами и т.д. Однако такой подход имеет свои ограничения, так как крайне сложно представить себе нетривиальные соотношения и закономерности (противоположная динамика вокселей, синхронная активация групп вокселей и т.д.) в большом объеме фМРТ-данных.

Возможное решение в этом случае — индуктивный инференс с помощью автоматизированных методов анализа больших данных с последующей итерационной верификацией полученных моделей с помощью дедуктивного метода (см. главу 3). Но это требует масштабных экспериментов для получения таких данных, что сталкивается с очевидными практическими сложностями, а также соответствующих методов анализа. Однако при накоплении данных

(например, в клинике) актуально реализовывать указанный подход и не ограничиваться «классической» нейровизуализацией фМРТ.

### 5.2.5. Определение размера эффекта

Как уже было отмечено в обзоре литературы (раздел 1.4.2), анализ фМРТ-данных обычно ограничивается лишь выявлением статистической значимости. При этом основа научного исследования — это выявление «размера эффекта» (Chen et al., 2017, p. 952). Проблемой является то, что существуют разные подходы к определению размера эффекта. Согласно Дж. Коэну, «основным результатом исследования является *одна или несколько* оценок размера эффекта, а не *p*-значения» (Cohen, 1990, p. 1310) (курсив автора диссертационной работы). Различные способы оценки размера эффекта не сопоставимы между собой, и потому может возникать недоверие к этой характеристике.

В физических и технических науках измеренные величины обычно непосредственно используются для установления количественных соотношений, эмпирических закономерностей и законов. Какие-либо специальные параметры, характеризующие размер эффекта, не вычисляются. Дж. Коэн в этой связи отмечает, что «если, например, группы сравниваются по переменной, измеренной в единицах, хорошо знакомых читателю (баллы IQ, доллары, число детей или месяцы жизни), то разница средних является наилучшей оценкой размера эффекта» (Cohen, 1990, p. 1310). В этом случае, соответственно, дополнительные оценки не требуются.

В гуманитарных науках, в силу сравнительно меньшей развитости средств измерения, распространение получили косвенные способы оценки размера эффекта, привязанные к единицам разброса данных. Такими оценками являются: размер эффекта по Коэну (Cohen, 1965; Cohen, 1998), Глассу (Smith, Glass, 1977), Хеджесу (Hedges, 1981; Hedges, Olkin, 1985) и т.д. В других случаях в качестве оценки величины эффекта используют коэффициенты корреляции: *r*-Пирсона,  $r^2$  и другие (Cohen, 1990). Суть их та же: корреляция — это мера, обратная разбросу данных относительно регрессионной зависимости. То есть происходит переход от

регрессионных параметров, связанных с исходными единицами измерения, к единицам разброса данных. Существуют и другие способы измерения эффекта, но их анализ выходит за рамки диссертационной работы.

Оценка размера эффекта относительно мер разброса имеет существенный недостаток. Что если исходные данные в одном эксперименте были плохо измерены с большими случайными погрешностями, а в другом усовершенствовали методику и получили меньшую случайную погрешность? В первом случае размер эффекта относительно стандартного отклонения (по Коэну) будет небольшим. При более аккуратном измерении размер эффекта относительно стандартного отклонения будет больше. Но и в первом и во втором случае изменение измеряемой величины при изменении экспериментальных условий могло быть одинаково. Это значит, что оценка размера эффекта по Коэну (и с помощью всех других подобных методов) существенным образом зависит от способа получения данных, а не только от самого эффекта.

Ситуация в гуманитарных науках осложняется тем, что разброс данных, измеренных по группе участников эксперимента, обусловлен не только случайной погрешностью процедуры измерения (как это имеет место в технических науках), но и индивидуальными различиями участников эксперимента, составляющих группу. Эти различия не обязательно должны быть распределены нормально. Постулат о нормальности распределения признака в популяции (включая психологические свойства), по мнению автора диссертационной работы, необоснованно принят за аксиому в ряде психодиагностических подходов (но даже и в этом случае смешивать два упомянутых выше источника разброса данных — некорректно). Нормальность получаемых распределений может быть обусловлена не нормальностью распределения признака в популяции, а несовершенством средств измерения, и, можно полагать, присущим им нормально распределенным шумом. Таким образом, при оценке размера эффекта относительно разброса данных смешиваются два принципиально разных источника разброса данных, в результате чего подобные оценки будут зависеть и от средств измерения, и от особенностей выборки (при том, что сам эффект в

исходных единицах измерения может быть константен или меняться по другому закону).

Дж. Коэн отмечал, что предложенная им оценка размера эффекта необходима лишь в тех случаях, когда измерение производится в абстрактных единицах, отсутствуют референсные значения, нет других исследований для сравнения и т.д., то есть «в тех областях наук о поведении, где используются исходные единицы, которые совершенно произвольны или не имеют смысла вне исследования, в котором они используются, или оба» (Cohen, 1998, p. 20). В остальных случаях, очевидно, более предпочтительным является использование для оценки размера эффекта исходных единиц измерения — например, «разницы средних» (Cohen, 1990, p. 1310).

В качестве оценки размера эффекта могут быть предложены и другие соотношения измеренных величин с сохранением исходной единицы измерения или легко пересчитываемые в исходные единицы — например, процент изменения по отношению к известной референсной точке (базовому значению, контрольному значению и т.д.), логарифмические единицы соотношений, такие как децибелы, и т.д.

Исходя из изложенного, в диссертационной работе используется несколько способов оценки размера эффекта. В качестве базового способа используется разница мер центральной тенденции (средних или медиан). Эти оценки могут использоваться для сравнения между исследованиями в случае сигналов КГР, измеренных в физических единицах измерения; а также для сравнений внутри исследования в случае сигналов ФПГ и фМРТ, измеренных в условных единицах. Для сравнения приводится параметрическая оценка размера эффекта по Коэну. Также, для сравнения результатов между исследованиями можно использовать процент изменения измеряемой величины, взяв одно из условий в качестве контрольного, если данные получены в шкале интервалов или выше.

### 5.3. Результаты анализа КГР и ФПГ и обсуждение результатов

Вначале были проанализированы временные ряды сигналов КГР и ФПГ, разделенные на эпохи, а также определенные по этим сигналам АКО. Апробированные на этих данных методы применялись к анализу сигналов фМРТ. Организация всех дальнейших статистических сравнений была выполнена по следующей логике:

а) сравнение активаций, связанных с субъективно значимыми и незначимыми стимулами и, соответственно, с актуализацией информации, различающейся по фактору субъективной значимости (терминологические примечания см. в разделе 2.2);

б) сравнение мужской и женской выборки;

в) сравнение тестов ТСИ и ТЗВ как моделей ситуаций, различающихся по времени приобретения материала памяти.

#### 5.3.1. Сравнение активаций, связанных с актуализацией информации, различающейся по субъективной значимости

Для выполнения указанной задачи вначале были построены графики усредненных сигналов КГР и ИО ФПГ (инвертированная огибающая ФПГ — см. подробное описание в главе 3), приведенные на рисунке 5.3. Для сравнения мужской и женской выборок ( $n=23$ ) нормирование данных не производилось (рисунок 5.2 а-г), так как приведение к нормировочным коэффициентам нарушит исходное соотношение амплитуд двух выборок.

Для общей выборки (рисунок 5.3 д-е,  $n=46$ ) данные нормировались на общее для ТСИ и ТЗВ стандартное отклонение (для каждого участника эксперимента отдельно), полученное путем усреднения стандартных отклонений ТСИ и ТЗВ — см. раздел 5.2.2, вариант «г». Нормировка на общий нормировочный коэффициент позволяет избежать искажения соотношений амплитуд сигнала между двумя тестами.

Заливкой показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ ) — эти доверительные интервалы приведены для наглядности и

не используются для вывода по гипотезам. Статистическое сравнение будет выполнено далее по АКО.

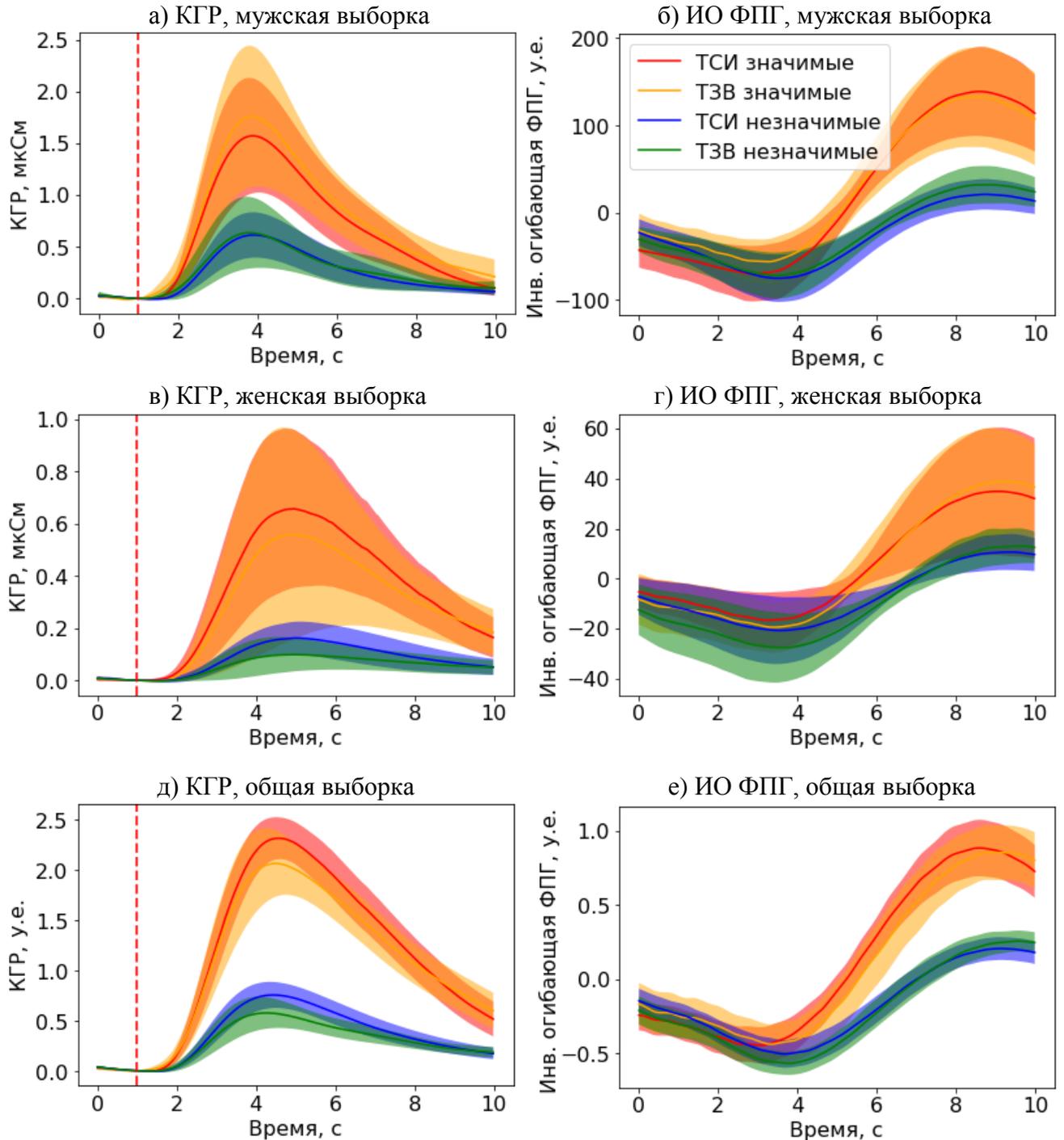


Рисунок 5.3 — Графики усредненных ненормированных сигналов КГР (а, в) и ИО ФПГ (б, г) отдельно для мужской ( $n=23$ ) и женской выборки ( $n=23$ ), а также графики сигналов для общей выборки (д, г), нормированные на стандартное отклонение сигналов, усредненное по тестам ТСИ и ТЗВ. Заливкой показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ ). Пунктирной линией показана точка приведения сигналов КГР к базовому значению.

Сигналы ИО ФПГ показаны без приведения к базовому значению

По рисунку 5.3 можно сделать следующие предварительные наблюдения:

а) субъективно значимые стимулы показывают существенно большую амплитуду сигналов КГР и ФПГ, чем незначимые. Визуально сигнал, связанный со значимыми стимулами, в несколько раз больше сигнала, связанного с незначимыми стимулами;

б) в женской выборке сигнал существенно слабее, чем в мужской — как на значимые, так и на незначимые стимулы. Это может быть обусловлено как особенностями физиологии, так и психофизиологическими закономерностями (см. раздел 1.2.2);

в) разделение стимулов по значимости в женской выборке хуже, чем в мужской;

г) сигналы КГР и ФПГ в тестах ТСИ и ТЗВ не отличаются по амплитуде — ни по сырым данными, ни по нормированным. Это значит, что указанные сигналы малочувствительны к времени приобретения материала памяти по сравнению с субъективной значимостью актуализируемой информации. Прямое статистическое сравнение амплитуд сигналов в тестах ТСИ и ТЗВ выполнено в последующих разделах;

д) несмотря на то, что ТСИ и ТЗВ предъявлялись в двух отдельных сессиях и не были рандомизированы по порядку предъявления, амплитуда сигналов КГР и ФПГ практически совпадает в этих двух тестах. Это значит, что эффект привыкания участника в ходе исследования был несущественным, и им можно пренебречь в контексте данной работы.

Далее вычислялись АКО по методу, подробно описанному в разделе 3.2.2. Графически полученные значения обобщены на рисунке 5.4.

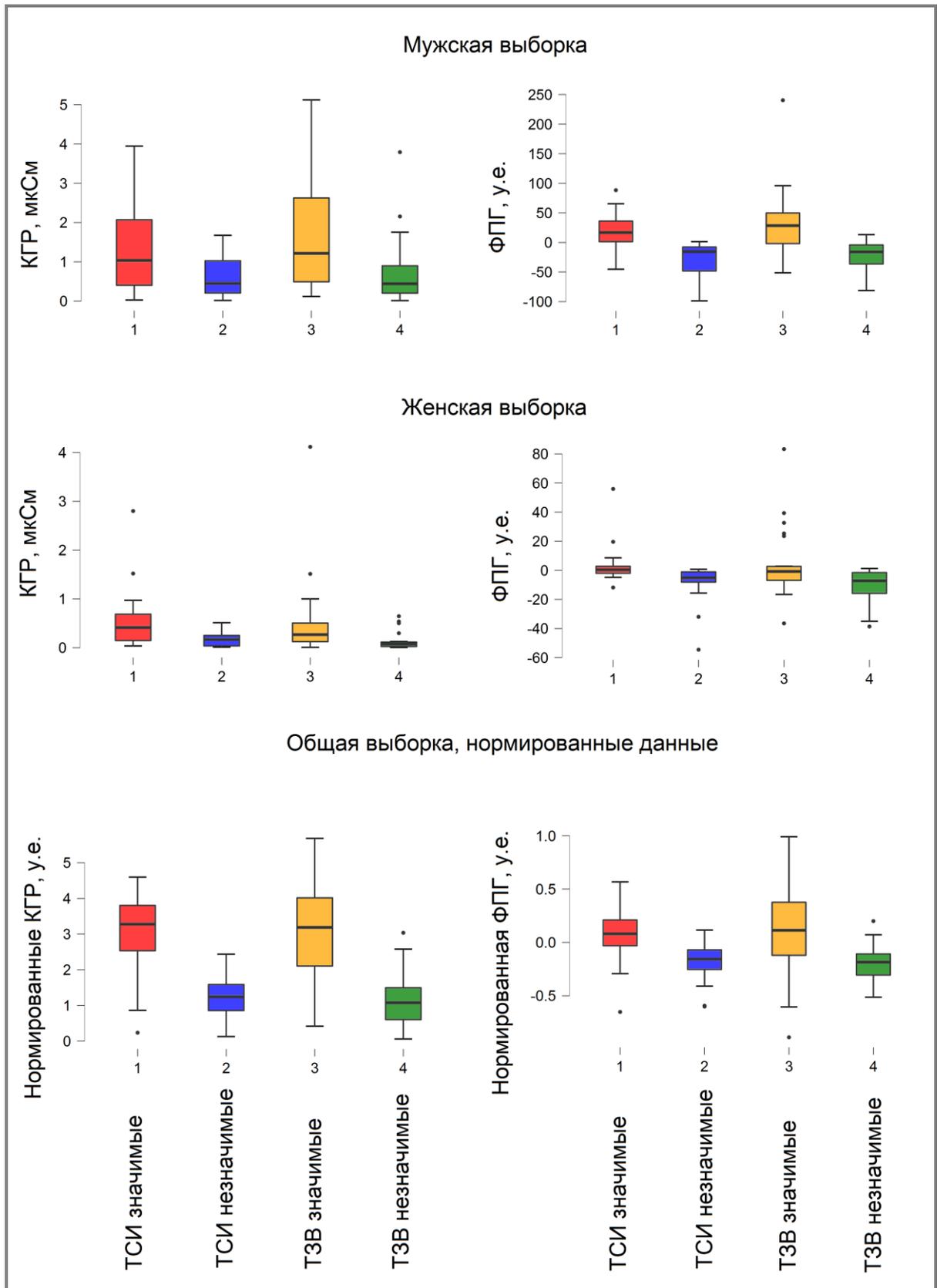


Рисунок 5.4 — Диаграммы размаха АКО (медианы, нижний и верхний квартили, минимальное и максимальное значение выборки, а также выбросы). Для общей выборки данные по каждому участнику эксперимента перед усреднением нормированы на среднее между ТСИ и ТЗВ стандартное отклонение сигнала по набору данных участника эксперимента

Визуальный анализ диаграмм размаха (рисунок 5.4) приводит к тем же выводам, что и анализ предыдущего рисунка:

а) с субъективно значимыми стимулами связаны АКО сигналов существенно большие по величине, чем с субъективно незначимыми стимулами;

б) в мужской выборке АКО сигналов примерно в 2-3 раза больше, чем в женской;

в) тесты ТСИ и ТЗВ имеют сходные паттерны АКО без сильных различий.

Далее был выполнен статистический анализ АКО, связанных с субъективно значимыми и незначимыми стимулами. Вначале были проанализированы ненормированные данные. С одной стороны, ненормированные данные имеют достаточно сильные разбросы между участниками эксперимента, с другой стороны, они не искажены какими-либо дополнительными преобразованиями. Результаты сопоставления ненормированных активаций с помощью непараметрического критерия Вилкоксона приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 — Сравнение активаций по фактору субъективной значимости (раздельные выборки, ненормированные данные, непараметрическая статистика)

Сигнал	Тест	Выборка	Медиана			<i>p</i> -значение по критерию Вилкоксона
			Значимые стимулы	Незначимые стимулы	Разница медиан	
КГР	ТСИ	мужская	1,0 мкСм	0,5 мкСм	0,5 мкСм	< 0,001*
		женская	0,4 мкСм	0,2 мкСм	0,2 мкСм	< 0,001*
	ТЗВ	мужская	1,2 мкСм	0,4 мкСм	0,8 мкСм	< 0,001*
		женская	0,3 мкСм	0,1 мкСм	0,2 мкСм	< 0,001*
ФПГ	ТСИ	мужская	16,7 у.е.	-15,6 у.е.	32,3 у.е.	< 0,001*
		женская	0,4 у.е.	-5,1 у.е.	5,5 у.е.	< 0,001*
	ТЗВ	мужская	28,4 у.е.	-16,1 у.е.	44,5 у.е.	< 0,001*
		женская	-0,8 у.е.	-7,1 у.е.	6,3 у.е.	0,016*

\*  $p \leq 0,05$

Результаты сопоставления активаций по фактору субъективной значимости по АКО (таблица 4.1) показывают статистически значимые различия во всех подвыборках — в мужской группе и в женской, в тесте ТСИ и ТЗВ. А также для

всех физиологических сигналов — КГР и ФПГ. Можно заметить существенно меньший уровень сигнала в женской выборке, но такое сравнение будет выполнено напрямую в следующем разделе. Здесь же актуально проанализировать размер эффекта при сравнении активаций по фактору субъективной значимости.

Как было рассмотрено в разделе 5.2.5, размер эффекта можно оценить несколькими способами: по разности измеренных величин в исходных единицах измерения (в таблице 4.1 приведены разности медиан); по оценкам, приведенным к единицам разброса данных; по проценту изменения относительно контрольного значения (если это допускает тип шкалы, в которой измерены величины). Например, сигнал КГР измеряется в стандартных физических единицах измерения и может сопоставляться напрямую между различными исследованиями. Однако сигнал ФПГ не может быть измерен в стандартных физических единицах и определяется конструкцией датчика (уровень сигнала существенно различается даже в одной партии датчиков одного производителя). Вычисление процента изменения сигнала относительно базового значения также не является подходящей оценкой, так как в разделе 3.3.3 было показано, что оценка сигнала ФПГ относительно базового значения менее эффективна, чем другие способы. В этом случае полученные оценки могут использоваться только в пределах исследования, а для сопоставления результатов между исследованиями может потребоваться соотношение их, например, с мерами разброса данных по Коэну.

Для связанных выборок размер эффекта по Коэну вычислялся по формуле

$$d_{\text{Коэна}} = \frac{M_d}{S_d} \quad (1)$$

где  $M_d$  — среднее арифметическое разностей АКО сравниваемых выборок;

$S_d$  — стандартное отклонение разностей АКО сравниваемых выборок.

Для  $d_{\text{Коэна}}$  были предложены различные поправки на размер выборки (Hedges, Olkin, 1985). Но для размеров выборки  $n=23$  и  $n=46$  эти поправки не

превышают 5-10 % в зависимости от метода, что несущественно, поэтому здесь они не применяются, чтобы излишне не усложнять вычисление и понимание.

В оригинальной работе Дж. Коэна размер эффекта вычисляется в абсолютных значениях (разница средних берется с модулем) (Cohen, 1988). Однако направление изменений может быть важно, особенно в тех случаях, когда оценка размера эффекта используется для промежуточных вычислений, чтобы получить вторичные оценки. Поэтому размер эффекта вычислялся без модуля.

Следует заметить, что в диссертационной работе различаются меры разброса, используемые для нормировки данных перед усреднением по участникам эксперимента в группе, и меры разброса, используемые для вычисления  $d_{\text{Коэна}}$ . В первом случае оценивается разброс данных для каждого отдельного участника эксперимента по набору данных этого участника. Во втором случае разброс характеризует группу и оценивается по группе. Первая задача — это уравнивать разбросы данных отдельных участников перед усреднением по участникам. Вторая задача — это сравнить две группы с вычислением размера эффекта в единицах разброса данных группы.

В таблице 4.2 приводятся результаты по нормированным данным. Как было сказано выше, для общей выборки перед объединением данные по каждому участнику эксперимента нормированы на стандартное отклонение сигнала (у участника), усредненное по тестам ТСИ и ТЗВ. Для вычисления  $d_{\text{Коэна}}$  стандартное отклонение  $S_d$  вычислялось по выборке.

Таблица 4.2 — Сравнение активаций по фактору субъективной значимости (общая выборка, нормировка в пределах участника эксперимента, параметрическая статистика)

Сигнал	Тест, общая выборка	Среднее значение, у.е.		<i>p</i> -значение по <i>t</i> -критерию Стьюдента	$M_d$	$d_{\text{Коэна}}$
		Значимые стимулы	Незначимые стимулы			
КГР	ТСИ	3,12±0,14	1,24±0,07	< 0,001*	1,88	2,5
	ТЗВ	3,10±0,20	1,13±0,10	< 0,001*	1,98	1,8
ФПГ	ТСИ	0,08±0,03	-0,18±0,02	< 0,001*	0,26	0,8
	ТЗВ	0,09±0,06	-0,19±0,02	< 0,001*	0,28	0,7

\*  $p \leq 0,05$

Размер эффекта субъективной значимости стимулов по Коэну классифицируется от высокого до среднего (ближе к высокому) (Cohen, 1988). Абсолютное значение размера эффекта (по модулю) составляет 0,7-2,5 (в среднем 1,45), что говорит о том, что различия больше одного стандартного отклонения (SD) и «видны невооруженным глазом» (Cohen, 1988, с. 26). Различия средних составляют 10-20 стандартных отклонений среднего (стандартных ошибок, SE), что говорит о высокой надежности разделения значимых и незначимых стимулов на выборке. Полученные численные значения эффекта необходимы для рассмотрения в последующих разделах с целью сопоставления результатов по другим измерениям.

### **5.3.2. Сопоставление мужской и женской выборки**

В приведенных выше результатах (таблица 4.1) можно было заметить определенные различия в амплитуде сигналов между мужской и женской выборкой. Для установления этих различий требуется прямое статистическое сравнение двух групп. При сравнении групп становятся важны общепсихологические вопросы репрезентативности и сбалансированности групп. В данном исследовании мужская и женская выборка состояла из студентов одного технического вуза, уравненных по возрасту, что обеспечивает достаточную сбалансированность. Число участников эксперимента составило 23 человека в каждой группе, что, вероятно, недостаточно для распространения выводов на генеральную совокупность всех мужчин и женщин. Однако в данной работе не стоит задача выявления межполовых различий, а для тех целей, которые поставлены, имеющиеся выборки можно считать достаточными. В диссертационной работе сравнение мужской и женской выборки, во-первых, является элементом кроссвалидации (то есть проверки воспроизводимости результатов измерений на существенно различающихся выборках); а во-вторых, используется для сопоставления размеров эффектов, полученных по другим измерениям.

При сравнении независимых выборок остро стоит вопрос однородности данных. Нередко в связи с этим применяют различные способы нормировки. По мнению автора, нормировку сигналов КГР и ФПГ при сравнении мужской и женской выборок, несмотря на значительный разброс сигналов между участниками эксперимента, выполнять некорректно, так как в этом случае невозможно получить одинаковые нормировочные коэффициенты для сравниваемых выборок. Различные способы нормировки (см. раздел 5.2.2) приводят к существенному искажению данных и бессмысленности сравнения двух выборок, так как средние значения оцениваемых параметров будут находиться возле одинакового для двух выборок значения. Поэтому здесь мужская и женская выборка сравниваются только по ненормированным данным.

Так как оценки амплитуды сигнала по КГР и ФПГ существенно различаются между участниками эксперимента и далеки от нормального распределения, то такие данные корректно анализировать с помощью непараметрических критериев. В таблице 4.3 приведены результаты сравнения мужской и женской выборки по АКО сигналов КГР и ФПГ с помощью критерия Манна-Уитни.

Таблица 4.3 — Сравнение мужской и женской выборки по АКО сигналов КГР и ФПГ (непараметрическая статистика)

Сигнал	Тест	Стимулы	Медиана			<i>p</i> -значение по критерию Манна-Уитни
			Мужская выборка	Женская выборка	Разница медиан	
КГР	ТСИ	значимые	1,0 мкСм	0,4 мкСм	0,6 мкСм	0,006*
		незначимые	0,5 мкСм	0,2 мкСм	0,3 мкСм	< 0,001*
	ТЗВ	значимые	1,2 мкСм	0,3 мкСм	0,9 мкСм	< 0,001*
		незначимые	0,4 мкСм	0,1 мкСм	0,3 мкСм	< 0,001*
ФПГ	ТСИ	значимые	16,7 у.е.	0,4 у.е.	16,3 у.е.	0,005*
		незначимые	-15,6 у.е.	-5,1 у.е.	-10,5 у.е.	0,002*
	ТЗВ	значимые	28,4 у.е.	-0,8 у.е.	29,2 у.е.	0,025*
		незначимые	-16,1 у.е.	-7,1 у.е.	-9,0 у.е.	0,065

\*  $p \leq 0,05$

Результаты (таблица 4.3) показывают, что почти для всех стимулов и тестов амплитуда активаций в мужской и женской выборке значимо различается. Отрицательные значения для сигнала ФПГ обусловлены тем, что огибающая ФПГ фильтруется для устранения постоянной составляющей, в результате чего слабые активации на незначимые стимулы получают отрицательные значения (см. рисунок 5.3 в разделе 5.3.1). С учетом этого видно, что амплитуда сигнала в мужской выборке в несколько раз больше, чем в женской. Если сопоставить эти различия с различиями по фактору субъективной значимости (таблица 4.1 выше), то они оказываются схожи по величине.

Чтобы оценить размер эффекта в универсальных единицах (по Коэну), ниже приводятся расчеты с помощью параметрической статистики. Применение параметрической статистики к имеющимся данным может быть не совсем корректно, но в данном случае эти результаты приводятся как дополнительные для сравнения.

Для независимых выборок размер эффекта по Коэну вычислялся по формуле

$$d_{\text{Коэна}} = \frac{M_A - M_B}{\sqrt{(S_A^2 + S_B^2)/2}} \quad (2)$$

где  $M_A$  и  $M_B$  — средние арифметические значения АКО сравниваемых групп;  
 $S_A$  и  $S_B$  — стандартные отклонения значений АКО сравниваемых групп.

В таблице 4.4 приводятся результаты сравнения мужской и женской выборки с помощью параметрической статистики.

Таблица 4.4 — Сравнение мужской и женской выборки по АКО сигналов КГР и ФПГ (параметрическая статистика)

Сигнал	Тест	Стимулы	Среднее значение		<i>p</i> -значение по критерию Уэлча	$M_A - M_B$	$d_{\text{Козна}}$
			Мужская выборка	Женская выборка			
КГР	ТСИ	значимые	1,4 мкСм	0,5 мкСм	0,005*	0,9	0,9
		незначимые	0,6 мкСм	0,2 мкСм	< 0,001*	0,4	1,2
	ТЗВ	значимые	1,6 мкСм	0,5 мкСм	0,003*	1,1	1,0
		незначимые	0,8 мкСм	0,1 мкСм	0,003*	0,7	1,0
ФПГ	ТСИ	значимые	19,7 у.е.	3,1 у.е.	0,016*	16,6	0,8
		незначимые	-28,9 у.е.	-8,3 у.е.	0,004*	-20,6	-0,9
	ТЗВ	значимые	30,9 у.е.	4,2 у.е.	0,049*	26,7	0,6
		незначимые	-22,3 у.е.	-11,2 у.е.	0,053	-11,1	-0,6

\*  $p \leq 0,05$

Различия между мужской и женской выборкой по критерию Уэлча (таблица 4.4) статистически значимы на уровне  $p \leq 0,05$  по большинству параметров. Средний размер эффекта для всех показателей по Козну (взятых по модулю) составляет 0,9, что классифицируется как высокий эффект, близкий к одному стандартному отклонению. При этом численное сопоставление полученных значений  $d_{\text{Козна}}$  со значениями по фактору субъективной значимости (таблица 4.2 выше) показывает несколько меньшую величину эффекта (при том, что разница медиан, как было отмечено выше, имеет сходные значения). Это может быть обусловлено тем, что для сопоставления мужской и женской выборок используются методы для независимых выборок, которые не могут компенсировать разбросы, обусловленные индивидуальными различиями внутри выборки, в отличие от методов для связанных выборок.

В целом можно заключить, что различия между мужской и женской выборкой по активациям сопоставимы с различиями по фактору субъективной значимости, рассмотренными в предыдущем разделе.

### 5.3.3. Сопоставление активаций в тестах ТСИ и ТЗВ

Основная проблематика работы связана с сопоставлением эффектов, обусловленных субъективной значимостью актуализируемой информации и временем приобретения этой информации человеком. Для определения эффектов, связанных со временем приобретения информации, выполнялось статистическое сравнение тестов ТСИ и ТЗВ, моделирующих актуализацию информации, приобретенной человеком в различные периоды жизни.

Вначале было выполнено сравнение ненормированных данных с помощью непараметрических методов. В таблице 4.5 приведены результаты такого сравнения.

Таблица 4.5 — Сравнение ТСИ и ТЗВ (непараметрическая статистика, ненормированные данные)

Сигнал	Стимулы	Выборка	Медиана			<i>p</i> -значение по критерию Вилкоксона
			ТСИ	ТЗВ	Разница медиан	
КГР	значимые	мужская	1,0 мкСм	1,2 мкСм	-0,2 мкСм	0,06
		женская	0,4 мкСм	0,3 мкСм	0,1 мкСм	0,11
	незначимые	мужская	0,5 мкСм	0,4 мкСм	0,1 мкСм	0,54
		женская	0,2 мкСм	0,1 мкСм	0,1 мкСм	0,06
ФПГ	значимые	мужская	16,7 у.е.	28,4 у.е.	-11,7 у.е.	0,48
		женская	0,4 у.е.	-0,8 у.е.	1,2 у.е.	0,89
	незначимые	мужская	-15,6 у.е.	-16,1 у.е.	0,5 у.е.	0,45
		женская	-5,1 у.е.	-7,1 у.е.	2,0 у.е.	0,11

Результаты показывают, что АКО для сигналов КГР и ФПГ статистически не различаются между тестами ТСИ и ТЗВ, несмотря на существенные различия стимульного материала в этих тестах. Численные значения разницы медиан также существенно меньше, чем в сравнениях, рассмотренных в предыдущих разделах. Это значит, что эффекты, связанные со временем приобретения материала памяти, либо не проявляются в сигналах КГР и ФПГ, либо имеют существенно меньшую величину по сравнению с рассмотренными выше эффектами

(связанными с субъективной значимостью и половыми различиями). Эксперименты, которые направлены на исследование структуры индивидуального опыта с помощью сигналов КГР и ФПГ, должны учитывать выявленную закономерность.

Полученные результаты также говорят о том, что эффект адаптации, который мог оказать существенное влияние на результаты эксперимента, так как тесты ТСИ и ТЗВ не были рандомизированы по порядку предъявления, оказался незначимым. Структура активаций по фактору субъективной значимости для всех сигналов и для всех подвыборок не изменилась. Численные значения активаций с высокой точностью совпадают у тестов ТСИ и ТЗВ, а различия медиан много меньше различий, связанных с рассмотренными выше факторами. Поэтому можно заключить, что эффект адаптации несущественен.

Далее был выполнен анализ с помощью параметрической статистики. Этот анализ выполнялся по общей выборке  $n=46$  человек. Перед объединением в выборку данные по каждому участнику эксперимента были нормированы на стандартное отклонение сигнала (у участника), усредненное по тестам ТСИ и ТЗВ (для вычисления  $d_{\text{Козна}}$ , напротив, стандартное отклонение  $S_d$  считалось не по участнику эксперимента, а по выборке). Размер эффекта по Коэну вычислялся по формуле (1). Полученные результаты приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 — Сравнение ТСИ и ТЗВ (параметрическая статистика, нормировка в пределах участника эксперимента)

Сигнал	Стимулы	Среднее значение, у.е.		<i>p</i> -значение по <i>t</i> -критерию Стьюдента	$M_d$	$d_{\text{Козна}}$
		ТСИ	ТЗВ			
КГР	значимые	3,12±0,14	3,10±0,20	0,95	0,02	0,01
	незначимые	1,24±0,07	1,13±0,10	0,36	0,11	0,14
ФПГ	значимые	0,08±0,03	0,09±0,06	0,89	-0,01	-0,03
	незначимые	-0,18±0,02	-0,19±0,02	0,66	0,01	0,08

Примечание — Для статистического сравнения тестов ТСИ и ТЗВ использованы неоптимизированные (контрольные, см. главу 3) параметры фильтрации сигналов КГР и ФПГ. Это обусловлено тем, что может быть не совсем корректно выполнять процедуру оптимизации на тех же данных, которые используются для вывода по экспериментальным гипотезам, так как может произойти смещение результатов в пользу одной из гипотез. Поэтому в таблицах 4.1—4.6 приведены результаты с использованием контрольных частот фильтрации. Однако аналогичные расчеты были выполнены также и с использованием оптимизированных параметров (в таблицах не приводятся) — общие выводы при этом не меняются.

Результаты, полученные с использованием параметрических методов, совпадают с выводами, приведенными выше. Статистически значимых различий между тестами ТСИ и ТЗВ по сигналам КГР и ФПГ не обнаружено. Разница средних крайне мала по сравнению с эффектами рассмотренных ранее факторов. Средний размер эффекта по Козну по таблице 4.6 составляет примерно 0,07, что много меньше эффекта субъективной значимости актуализируемой информации (1,45) и межполовых различий (0,9). Численные средние значения АКО с высокой точностью совпадают у ТСИ и ТЗВ, что указывает на то, что возможный эффект привыкания между сессиями ТСИ и ТЗВ был несущественным в контексте данной работы. Такие результаты могут также объяснять, почему в работе М.Г. Колбеновой не была выявлена связь между возрастом формирования систем и сигналом КГР (Колбенева М.Г., 2013) — вероятно, сигналы КГР и ФПГ существенно менее чувствительны ко времени приобретения материала памяти по сравнению с субъективной значимостью актуализируемой информации.

## **5.4. Результаты анализа фМРТ-данных и обсуждение результатов**

фМРТ-данные были проанализированы аналогично сигналам КГР и ФПГ в следующей последовательности: сравнение активаций по фактору субъективной значимости актуализируемой информации; сравнение мужской и женской выборки; сравнение активаций по фактору времени приобретения материала памяти — сравнение тестов ТСИ и ТЗВ. Для анализа данных применялись как стандартные средства (пакет FSL), так и разработанные автором методы обработки фМРТ-данных, апробированные в главе 4.

### **5.4.1. Сравнение активаций, связанных с актуализацией информации, различающейся по субъективной значимости**

В данном разделе приводятся результаты статистического сравнения активаций по фактору субъективной значимости. Некоторые результаты приводятся отдельно для различных групп и тестов (мужской и женской, ТСИ и ТЗВ) для проверки воспроизводимости обнаруживаемых закономерностей на различных подвыборках. Статистическое сравнение указанных групп между собой приводится ниже в разделах 5.4.2 и 5.4.3.

#### **5.4.1.1. Анализ с помощью стандартных средств (FSL, GLM)**

Чтобы показать результаты вычислений с помощью стандартных методов, на рисунке 5.5 приводится воксельное статистическое параметрическое картирование фМРТ-данных для тестов ТСИ и ТЗВ с помощью пакета FSL. Объединение данных по выборке выполнялось в пакете FSL с помощью регрессионной модели со смешанными эффектами FLAME1 (Woolrich et al., 2004), отсечка по порогу  $p \leq 0,001$ , без поправок на множественные сравнения (с целью сравнения с другими способами анализа).

Контраст — «значимые минус незначимые» стимулы (разность между ними). Такой контраст показывает специфику активации, связанную со значимостью стимула. Негативные  $t$ -значения соответствуют большей амплитуде и/или стабильности сигнала, связанного с незначимыми стимулами.

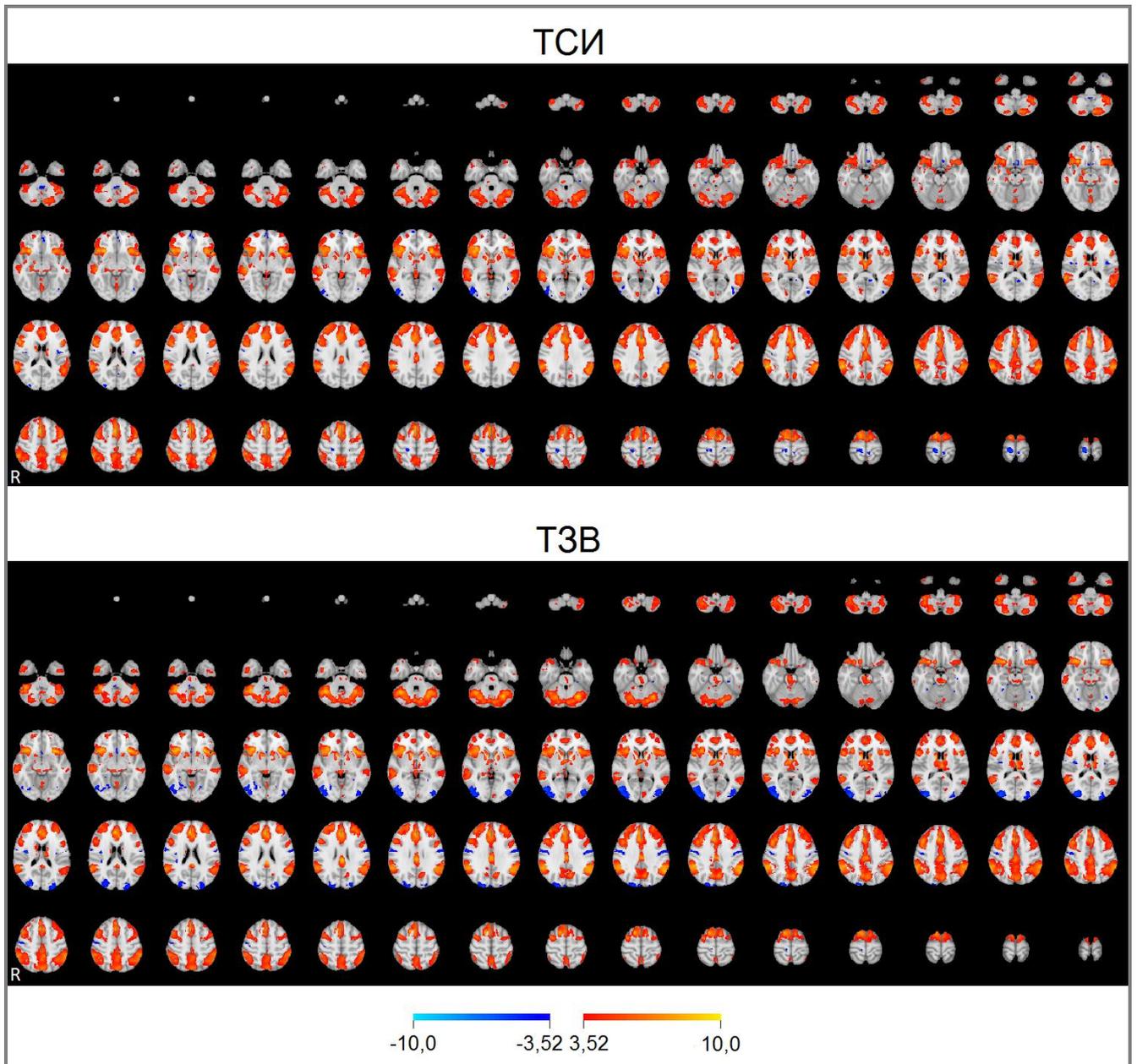


Рисунок 5.5 — фМРТ-картирование с помощью пакета FSL ( $t$ -значения GLM, порог  $t=3,52$ ,  $n=46$ , что соответствует  $p \leq 0,001$ ), левое полушарие справа, контраст — «значимые минус незначимые» стимулы

Визуальный анализ полученных фМРТ-данных показал, что с изменением субъективной значимости связано изменение активности большого числа структур головного мозга. При увеличении субъективной значимости актуализируемой информации отмечается повышение активности различных областей коры больших полушарий, преимущественно фронтальных, подкорковых структур, а также мозжечка. В затылочных областях коры, наоборот, наблюдается большая активность в связи с незначимыми стимулами.

Чтобы более детально проанализировать соответствие между изображениями, полученными разными методами, на рисунке 5.6 приведена визуализация одного из срезов в более крупном масштабе.

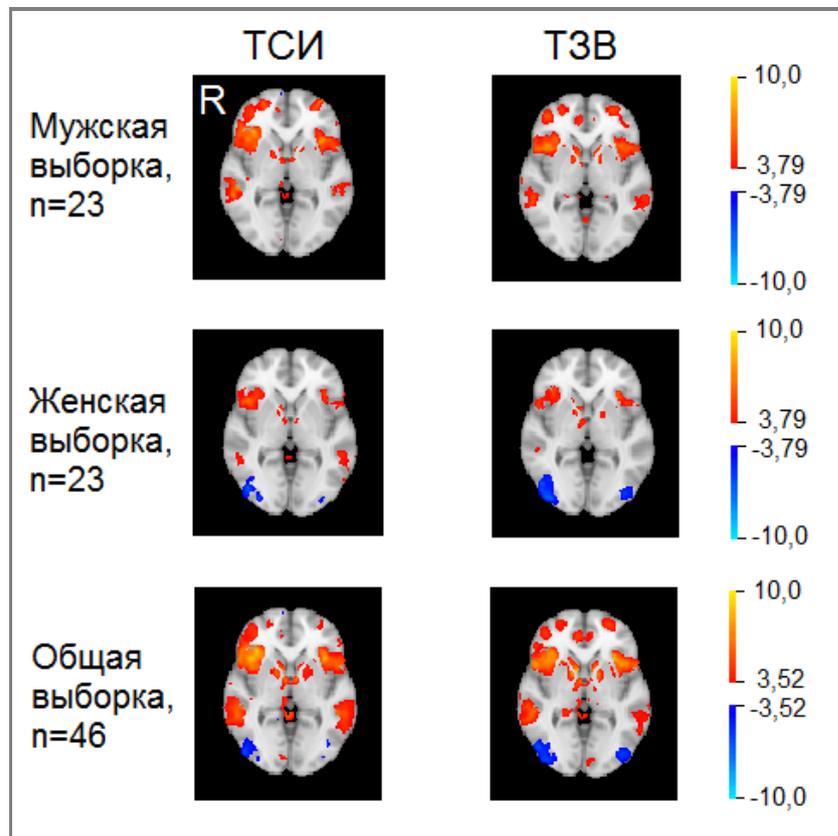


Рисунок 5.6 — фМРТ-картирование по  $t$ -статистике GLM с помощью пакета FSL (порог  $t \geq 3,79$  для  $n=23$  и  $t \geq 3,52$  для  $n=46$ , что соответствует  $p \leq 0,001$ ), срез № 36 (нумерация от нуля) в пространстве MNI-152, левое полушарие справа, контраст — «значимые минус незначимые» стимулы

По рисунку 5.6 можно заметить определенные различия между мужской и женской выборкой. В мужской выборке не обнаруживаются статистически значимых различий в затылочных областях коры, в то время как в женской выборке наблюдается меньшая активность, связанная с субъективно значимыми стимулами, по сравнению с незначимыми (синяя заливка).

В работе В.А. Орлова и др. на тех же данных было вычислено соотношение числа статистически значимых вокселей (по контрасту «субъективно значимые минус незначимые» стимулы) в структурах по «Атласу CONN» к общему числу вокселей в структуре (Орлов и др., 2024) (в разделе 5.2.4 были рассмотрены недостатки такого подхода). Было показано большее число «активных» структур в

мужской выборке по сравнению с женской. Прямое статистическое сопоставление подвыборок по различным факторам проводится в последующих разделах (5.4.2 и 5.4.3).

#### 5.4.1.2. Повоксельный амплитудный анализ фМРТ с помощью авторских методов

В данном разделе рассматриваются амплитудные способы визуализации фМРТ-данных. Тем не менее, прежде чем приступить к такому анализу, в методических целях были построены карты активности мозга на основе  $t$ -значений, вычисленных по АКО, то есть по усреднению сигнала на эпохе без использования GLM (см. главу 4). Результаты приведены на рисунке 5.7.

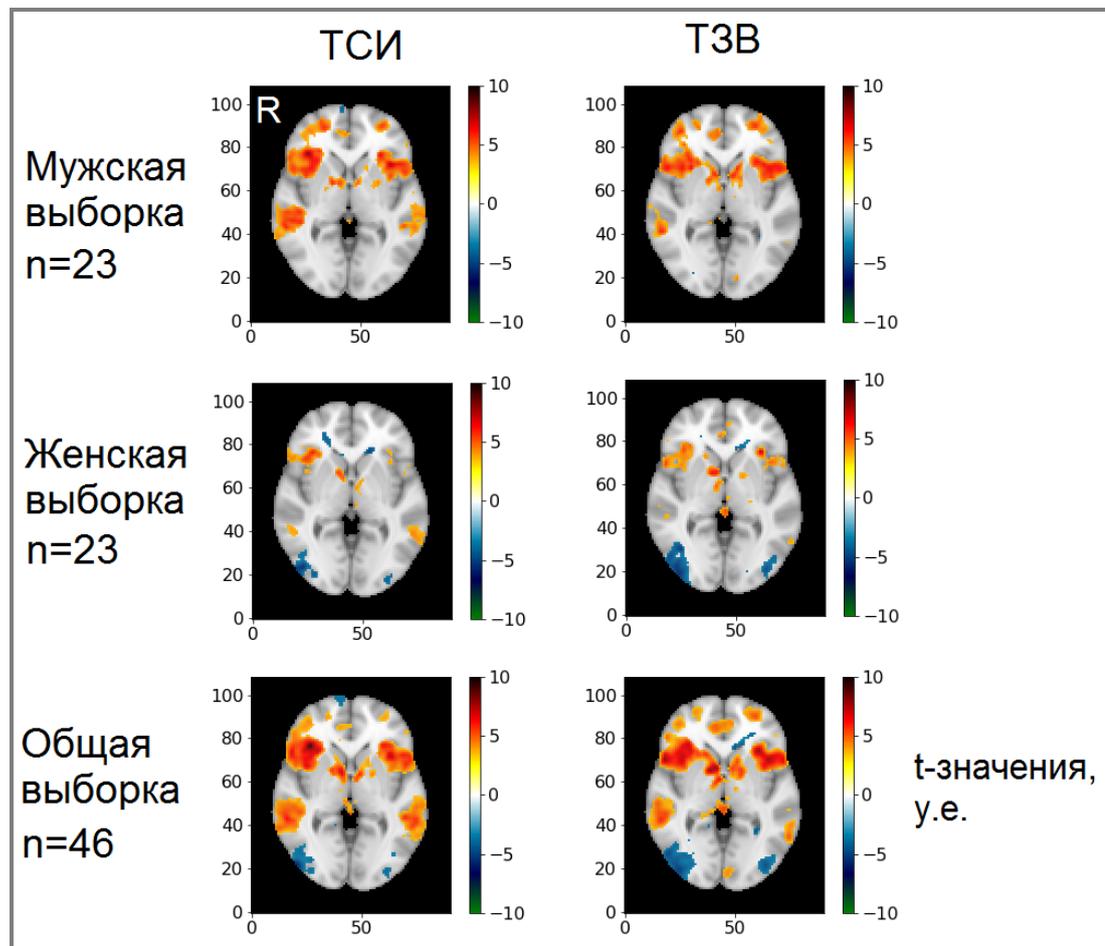


Рисунок 5.7 — фМРТ-картирование по  $t$ -статистике на основе АКО (показаны  $t$ -значения групповой статистики АКО с отсечкой по порогу  $p \leq 0,001$ ), срез № 36 (нумерация от нуля) в пространстве MNI-152, левое полушарие справа, контраст — «значимые минус незначимые» стимулы

Визуальное сопоставление результатов на рисунках 5.7 и 5.6 позволяет сделать вывод, что карты  $t$ -значений, полученных на основе существенно различающихся между собой методов, показывают сходную активность структур мозга. Это значит, что в рассматриваемых задачах методы на основе GLM и на основе АКО могут быть взаимозаменяемы. Переход к вычислениям на основе АКО позволяет, во-первых, снизить сложность вычислений, а во-вторых, получить новые способы визуализации и анализа данных.

На рисунке 5.8 показана визуализация АКО. Перед усреднением по группе данные по участнику эксперимента были нормированы на стандартное отклонение сигнала, вычисленное по всему объему (не повоксельно), чтобы уменьшить разбросы амплитуд между участниками, но сохранить взаимные соотношения амплитуды между вокселями.

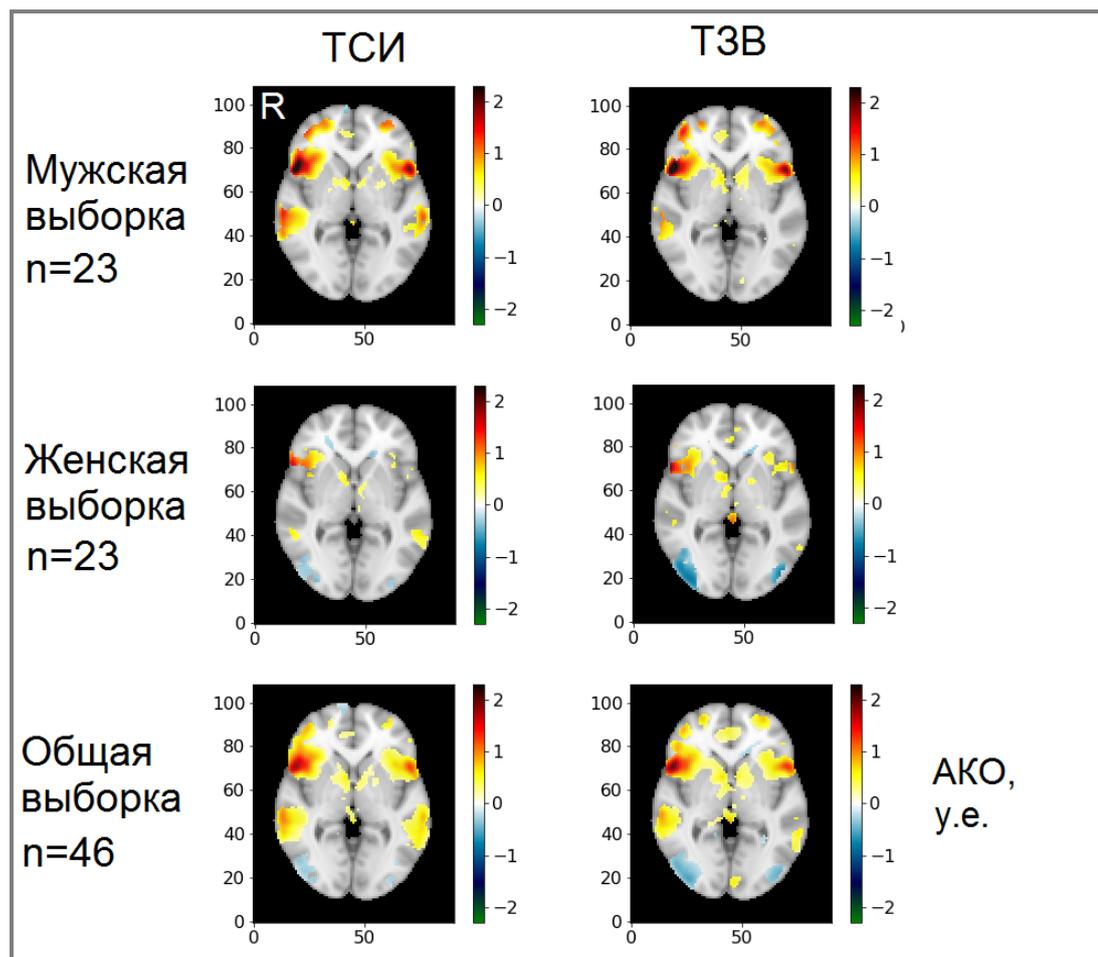


Рисунок 5.8 — фМРТ-картирование на основе АКО (отсечка по порогу  $p \leq 0,001$  выполнена на основе  $t$ -статистики), срез № 36 (нумерация от нуля) в пространстве MNI-152, левое полушарие справа, контраст — «значимые минус незначимые» стимулы

Результаты амплитудного картирования, приведенные на рисунке 5.8, согласуются с выводами, полученными в главе 4. При амплитудном анализе центры максимальной активности смещены латеральнее. Базальные структуры по амплитуде дают менее слабый сигнал, чем кора (это может быть как действительным эффектом, так и особенностями сбора фМРТ-данных — удаленностью базальных структур от приемных катушек фМРТ-сигнала). Эффект сниженной активности затылочной коры в амплитудном представлении менее выражен (он будет подробнее проанализирован в следующем разделе).

На рисунке 5.9 показаны те же данные, что и на рисунке 5.8, но с использованием метода визуализации «*GlassBrain*» библиотеки «*nilearn*» (Abraham et.al., 2014) для языка Python.

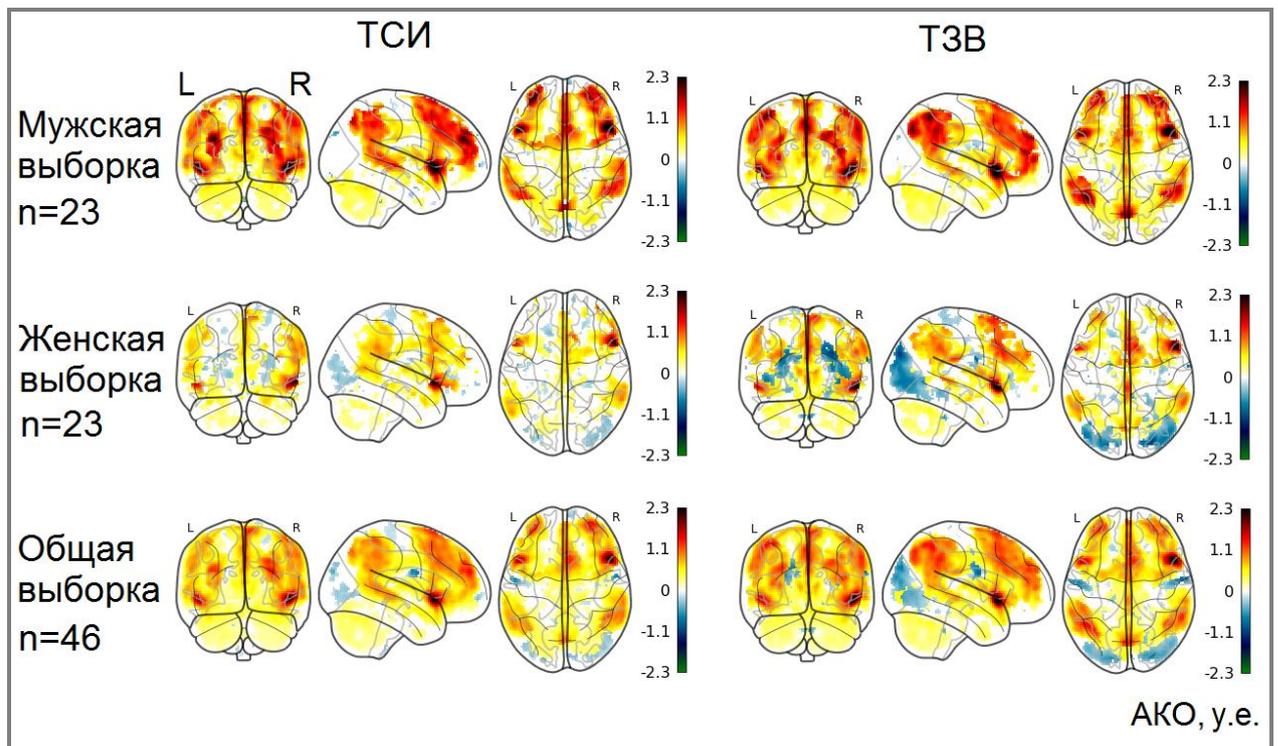


Рисунок 5.9 — фМРТ-картирование на основе АКО (показаны значения АКО с отсечкой по порогу  $p \leq 0,001$ ), визуализация «*GlassBrain*» — графическое усреднение в проекции, левое полушарие слева, контраст — «значимые минус незначимые» стимулы

Хорошо видно, что актуализация субъективно значимой информации затрагивает практически все структуры мозга, различаясь амплитудой. Общая картина активации в тестах ТСИ и ТЗВ сходна, несмотря на различия в деталях. Можно заметить более выраженную инверсию активаций в затылочных областях

в ТЗВ. Для выяснения природы этой инверсии необходимо выполнить более детальный анализ динамики сигнала, приводимый в следующем разделе.

#### **5.4.1.3. Повоксельная временная развертка амплитудных фМРТ-данных**

В предыдущем разделе амплитуда сигнала оценивалась на достаточно больших эпохах (3-10 с от отметки предъявления стимула), при этом амплитудный подход позволяет анализировать процессы с большей временной точностью. На рисунке 5.10 показана визуализация динамики фМРТ-сигнала с временным разрешением 1,5 с для теста ТСИ.

Чтобы получить изображения, показанные на рисунке 5.10, временные ряды фМРТ-сигнала разделялись на фрагменты по 1,5 с, и на этих фрагментах вычислялись АКО. Далее выполнялось статистическое сравнение полученных АКО с первым интервалом (0-1,5 с), принимаемым в данном случае за базовое значение, чтобы визуализировать динамику сигнала и получить отсечку статистически значимых различий по  $t$ -критерию.

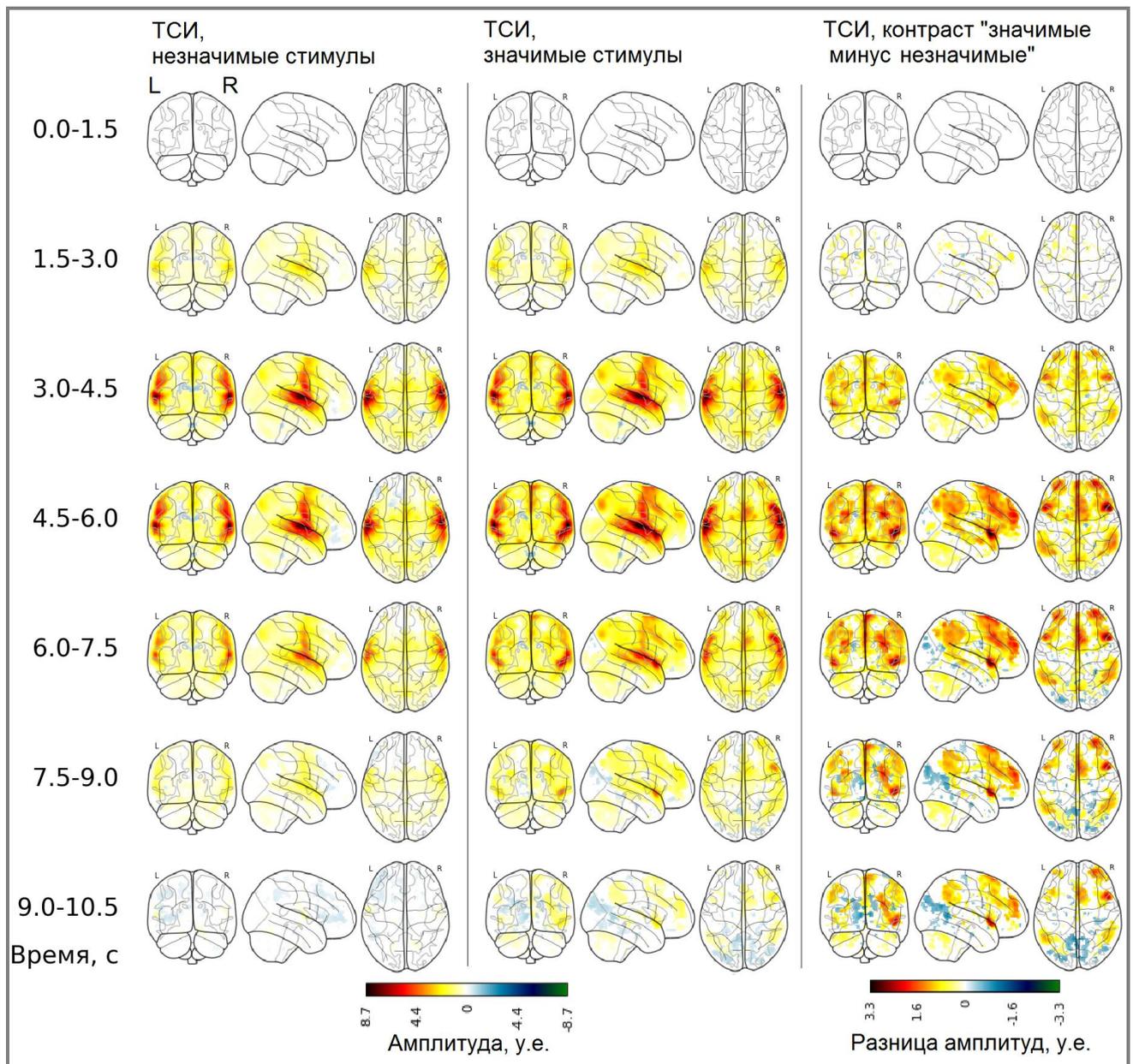


Рисунок 5.10 — Повоксельная временная развертка АКО (показаны значения АКО с отсечкой по порогу  $p \leq 0,001$ ), визуализация «GlassBrain» — графическое усреднение в проекции, левое полушарие слева, тест ТСИ

Аналогичный способ применен к тесту ТЗВ. Результаты визуализации показаны на рисунке 5.11.

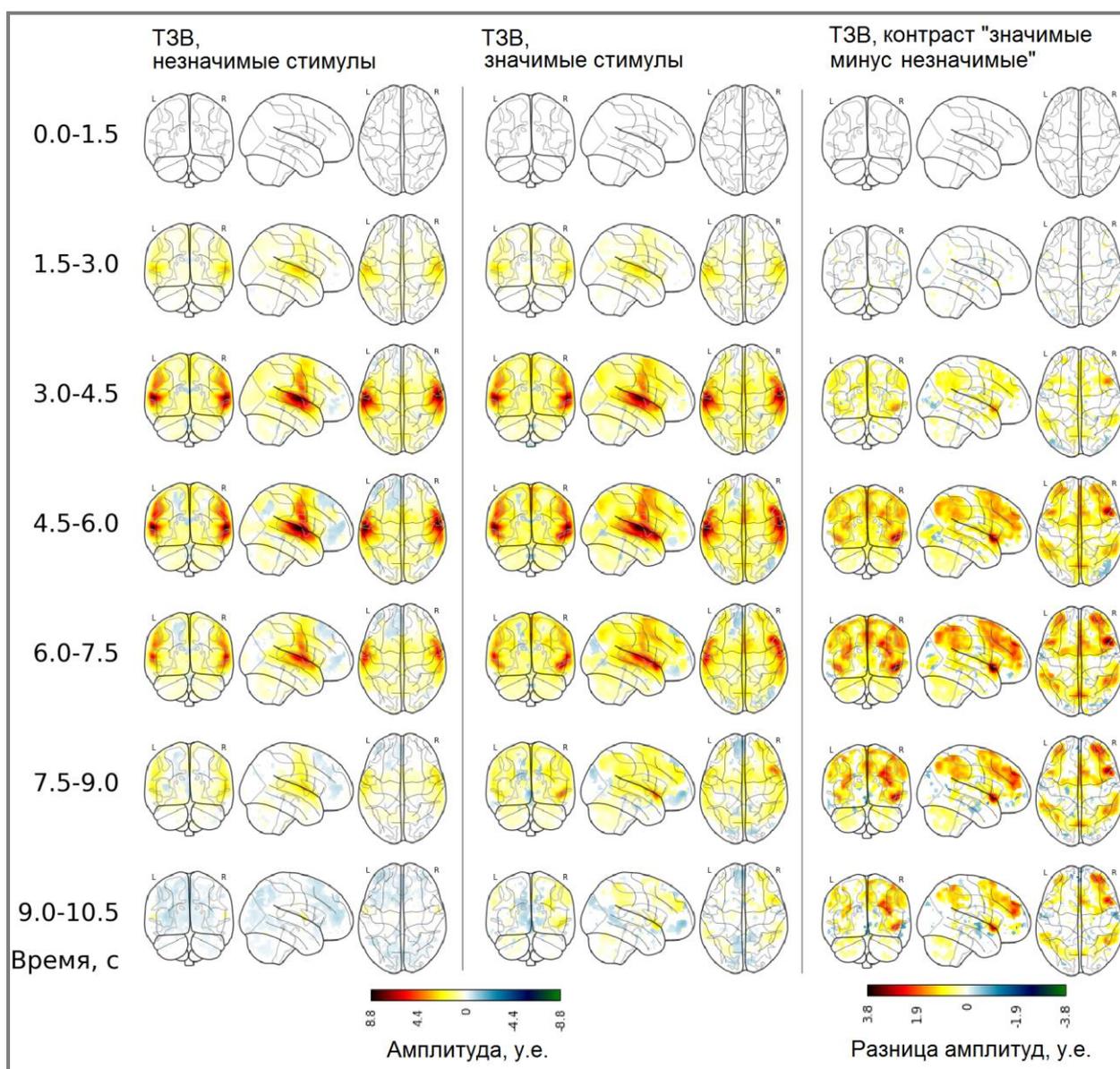


Рисунок 5.11 — Повоксельная временная развертка АКО (показаны значения АКО с отсечкой по порогу  $p \leq 0,001$ ), визуализация «GlassBrain» — графическое усреднение в проекции, левое полушарие слева, тест ТЗВ

По рисункам 5.10 и 5.11 можно заметить, что максимальная амплитуда сигнала (как на значимые, так и на незначимые стимулы) наблюдается в первичных слуховых проекционных областях коры и прилегающих к ним вторичных (см. левый и средний столбцы). На разности «значимые минус незначимые» (правый столбец) происходит взаимная компенсация этих сигналов, и максимальные различия наблюдаются во фронтальной коре (*лобный полюс, нижняя лобная извилина, лобная оперкулярная кора, передняя цингулярная и*

*парацингулярная кора*), а также в *надкраевой (supramarginal, SMG) и угловой извилине*.

Полученная картина объясняет, например, почему в работах с регистрацией ЭЭГ при работе с вербальными стимулами получают сильный сигнал от височных отделов головного мозга (Александров и др., 1997б). Хотя другие структуры мозга могут быть более дифференцированными в отношении изучаемых свойств, амплитудные показатели их активности существенно меньше, не говоря о трудностях регистрации ЭЭГ от глубоких структур, таких как цингулярная кора. Это одна из причин, почему исследования с помощью ЭЭГ и фМРТ оказываются трудно сопоставимы между собой, особенно если для картирования фМРТ используются *t*-значения, которые не учитывают амплитудные соотношения между вокселями.

Надо заметить, что в работе (Ushakov et. al., 2024) было выполнено похожее картирование динамики фМРТ-активности, но в основе лежала модель GLM и стандартный гемодинамический ответ. В указанной работе с некоторым шагом сдвигались по времени маркеры предъявления стимула, от которых строилась кривая предполагаемого гемодинамического ответа для GLM. Такой подход несет в себе все особенности статистического параметрического картирования, описанные выше, а также снижает временное разрешение, так как стандартный гемодинамический ответ имеет достаточно большую протяженность во времени. В предлагаемом в диссертационной работе подходе не задается фиксированный гемодинамический ответ, а, наоборот, исследуется с учетом того, что он может быть разным в разных структурах мозга и в разных задачах.

Отдельно следует рассмотреть динамику, связанную с понижением сигнала на значимые стимулы в затылочных областях коры больших полушарий мозга. Одно из объяснений — побочный эффект фильтрации сигнала, когда после высокоамплитудного импульса можно наблюдать компенсационные процессы, особенно в случае применения фильтров высокого порядка. Однако по рисункам 5.10 и 5.11 видно, что в затылочных областях нет высокоамплитудного импульса, а во второй части эпохи сигнал опускается ниже начального значения. Природа

этого явления точно не известна. В литературе предложены различные объяснения такого эффекта — от механического перераспределения крови и ликвора в замкнутом объеме до более сложных процессов, включая активное распределение крови и ликвора между структурами мозга различного масштаба с привлечением механизмов внимания (Bressler et al., 2007; Liu et al., 2011; Van Niftrik et al., 2023).

#### **5.4.1.4. Сопоставление специфичности вовлечения структур мозга в регистрируемое поведение по метрике ПС**

Как было обосновано в главе 3, частоту (процент) совпадений некоторых априорно заданных характеристик и характеристик, измеренных в эксперименте, можно рассматривать как универсальную меру (критерий) совершенства психофизиологического метода (Малахов, 2024). Однако можно предположить, что эта метрика пригодна и для выявления степени дифференциации структур мозга по отношению к тем или иным свойствам актуализируемой информации. Если экспериментальные данные об активности некоторой структуры мозга позволяют разделить предъявленные стимулы на группы, с высокой точностью совпадающие с априорно заданной группировкой (в результате чего получается высокое значение ПС), то это значит, что исследуемая структура дифференцирована по параметру, по которому была выполнена группировка. В рамках системной психофизиологии тогда можно говорить о структурных особенностях дифференциации систем в отношении той или иной характеристики поведения организма и процессов актуализации индивидуального опыта при реализации этого поведения.

В экспериментальном плане метрика ПС представляет интерес в связи с тем, что она не зависит от амплитудных различий сигнала у отдельных участников эксперимента и в различных структурах мозга. Метрика ПС имеет одинаковую единицу измерения для разных тестов и источников сигнала. Это значит, что не требуется какая-либо нормировка сигнала, вносящая искажения, а также с помощью метрики ПС решается проблема уже проведенной нормировки

данных на общий разброс сигнала во время предобработки перед выполнением ИСА. Эта метрика представляет собой не предполагаемую вероятность (как, например,  $p$ -значение), а *частоту*, полученную в эксперименте, то есть характеризует прогностические свойства имеющихся данных и методов.

Таким образом, были вычислены значения ПС для отдельных вокселей по их временным рядам. Результаты показаны на рисунке 5.12. Порог для разделения вокселей по статистической значимости вычислялся как отличие полученного значения ПС от случайного уровня (20 % для выбора из пяти вариантов) по  $z$ -статистике долей (Ивин и др., 2017). «Отрицательными» процентами (синяя заливка) обозначен ПС, вычисленный не по максимальной, а по минимальной активации.

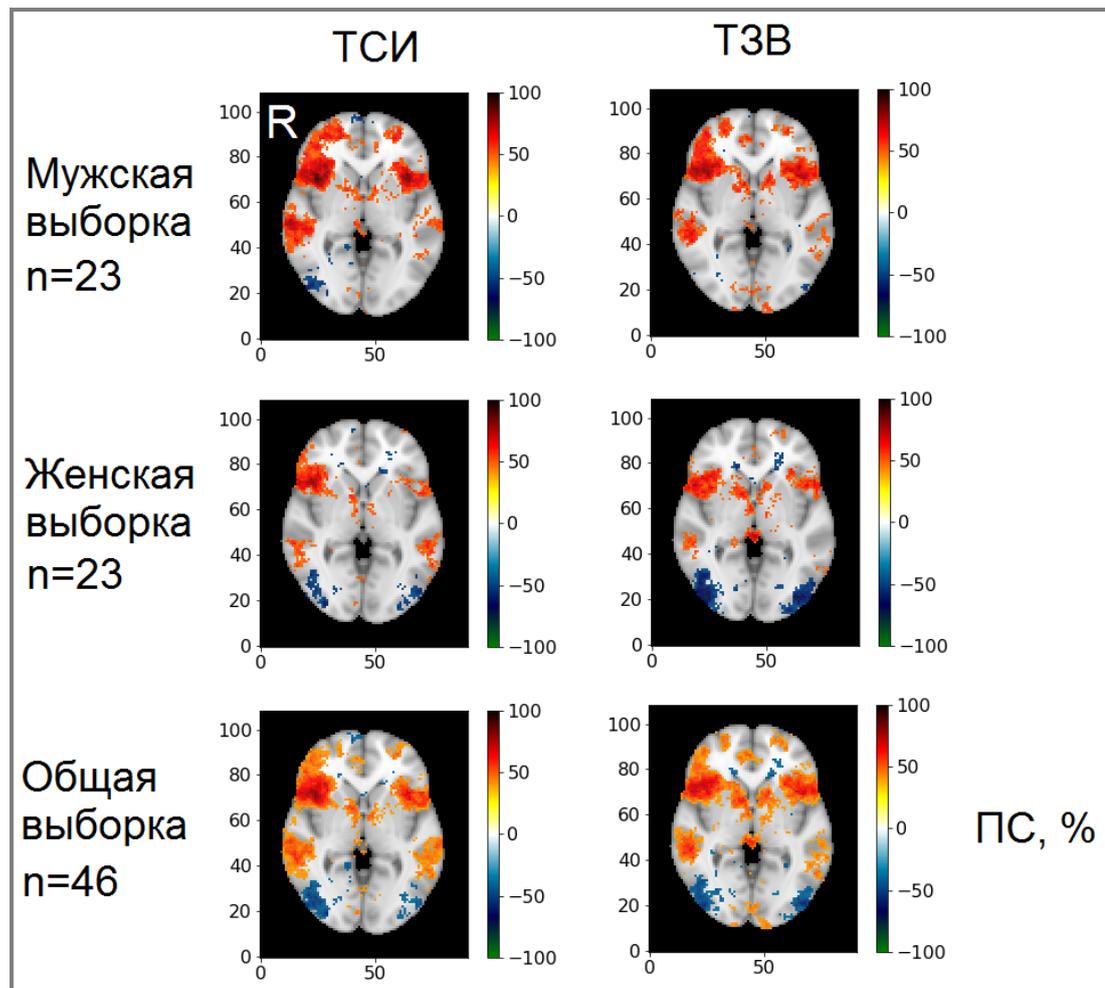


Рисунок 5.12 — фМРТ-картирование по метрике ПС (порог по  $z$ -статистике долей на уровне  $p \leq 0,001$ ), срез № 36 (нумерация от нуля) в пространстве MNI-152, левое полушарие справа, «отрицательными» процентами обозначен ПС по минимуму активации

По рисунку 5.12 можно видеть, что снижение активности на значимые стимулы в затылочной коре свойственно не только женской выборке, но и мужской тоже. Это весомый аргумент в пользу того, что обнаруженная закономерность не является случайным артефактом. Помимо затылочной коры такие свойства демонстрирует некоторое количество вокселей лобных структур, не формируя при этом ярко выраженный кластер. Выяснение природы такого явления требует отдельных исследований.

После повоксельного анализа по аналогичной методике были проанализированы усредненные данные по структурам мозга (см. раздел 2.5 и приложение А). Вначале фМРТ-сигнал усреднялся по структуре, а затем вычислялись АКО и ПС. Технически можно применить и другие способы объединения сигнала. Например, сначала вычислить ПС для вокселя, а затем усреднить по структуре; либо вычислить максимум активации для каждого вокселя отдельно, а затем принять решение по значимому стимулу на основе «голосования» вокселей. Такой анализ проводился автором, но более детальное описание выходит за рамки тематики данной работы.

Результаты вычисления ПС по структурам для теста ТСИ приведены на рисунке 5.13 (сопоставление названий структур см. в приложении А). На рисунке показаны не все структуры атласа, а только наиболее информативные. Порог для визуализации был произвольно задан на уровне 50 %. Этот порог больше, чем случайное совпадение (20 % для пяти альтернатив), но меньший порог не имеет смысла с прикладной точки зрения, так как в этом случае ПС становится меньше, чем для исследованных выше более простых в регистрации сигналов КГР и ФПГ. Доверительные интервалы вычислены по  $z$ -статистике долей (Ивин Е. А. и др., 2017).

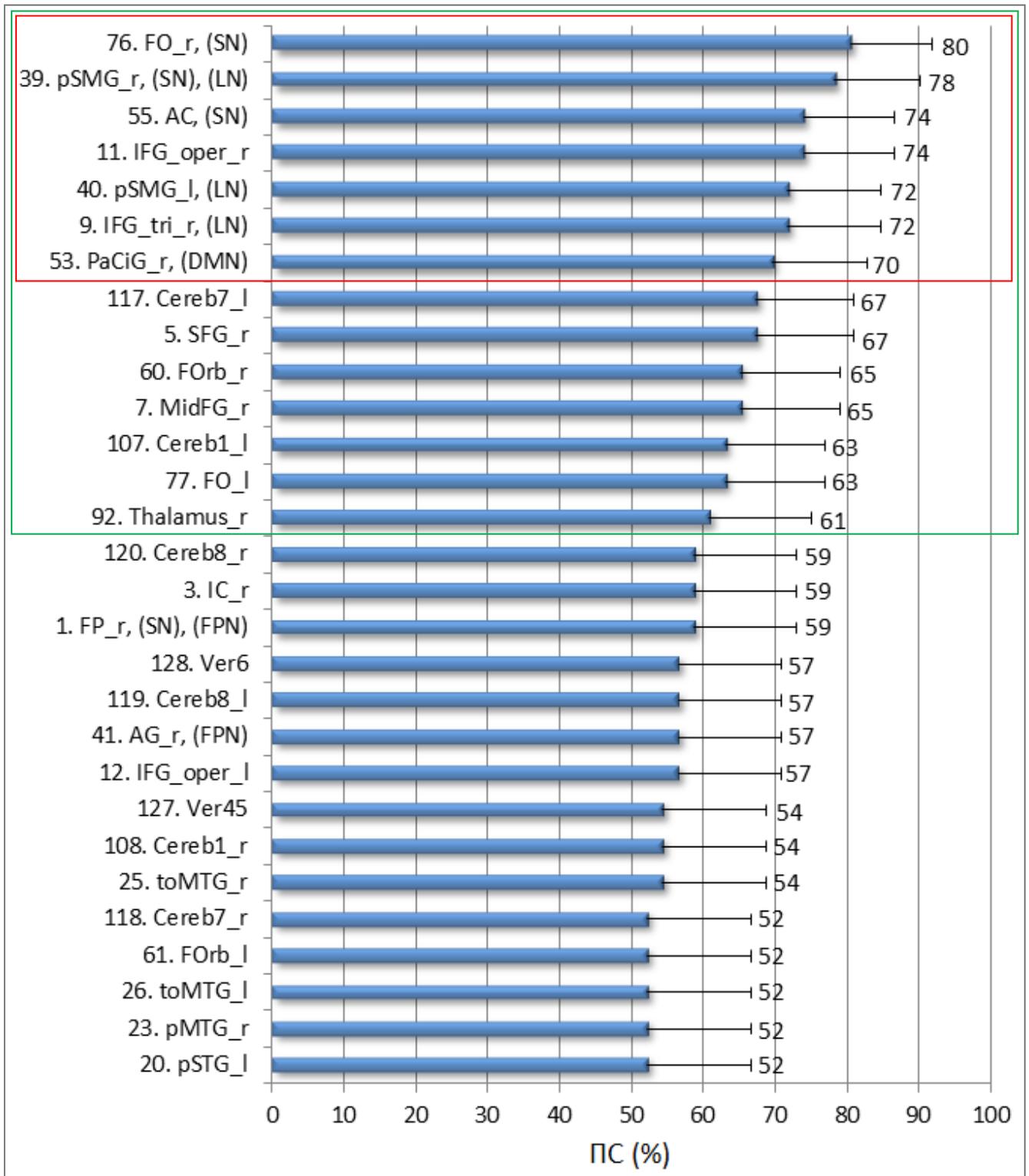


Рисунок 5.13 — Столбчатая гистограмма ПС в тесте ТСИ, отсортированная от большего к меньшему (сопоставление названий структур см. в приложении А), общая выборка,  $n=46$ .

Красным выделены структуры, показавшие ПС от 70 %, зеленым — 60 %, а отсечка для визуализации была выбрана по уровню 50 %. Указаны долевые доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,95

Аналогичные результаты были получены и для теста ТЗВ. Они приведены на рисунке 5.14 ниже (сопоставление названий структур см. в приложении А).

По полученным результатам (рисунки 5.13 и 5.14) можно заключить, что информативность фМРТ-сигнала в отношении субъективной значимости занимает промежуточное положение между сигналами КГР и ФПГ (см. таблицу 3.6 в разделе 3.3.1).

Надо заметить, что в тесте ТСИ порог в 50 % проходит большее число правосторонних структур по сравнению с левосторонними. Их примерно в два раза больше, чем левосторонних (17:9). В тесте ТЗВ это соотношение меняется (16:14).

Указания на наличие межполушарной асимметрии представляет интерес с точки зрения теоретического объяснения результатов работы. Однако требуется выполнить прямое статистическое сравнение эффектов межполушарной асимметрии. Для иллюстрации того, что выводы о соотношении каких-либо величин, выделенных по произвольному порогу, не являются однозначными, на рисунках 5.13 и 5.14 показаны пороги 60 и 70 % (зеленой и красной рамкой соответственно). По порогу 60 % в тесте ТЗВ выделяется больше информативных структур, чем в ТСИ, а по порогу 70% — наоборот. Поэтому выдвинутое предположение о различной межполушарной асимметрии активности мозга в тесте ТСИ и ТЗВ требует статистической проверки, которая выполнена в разделе 5.4.3.2 ниже.

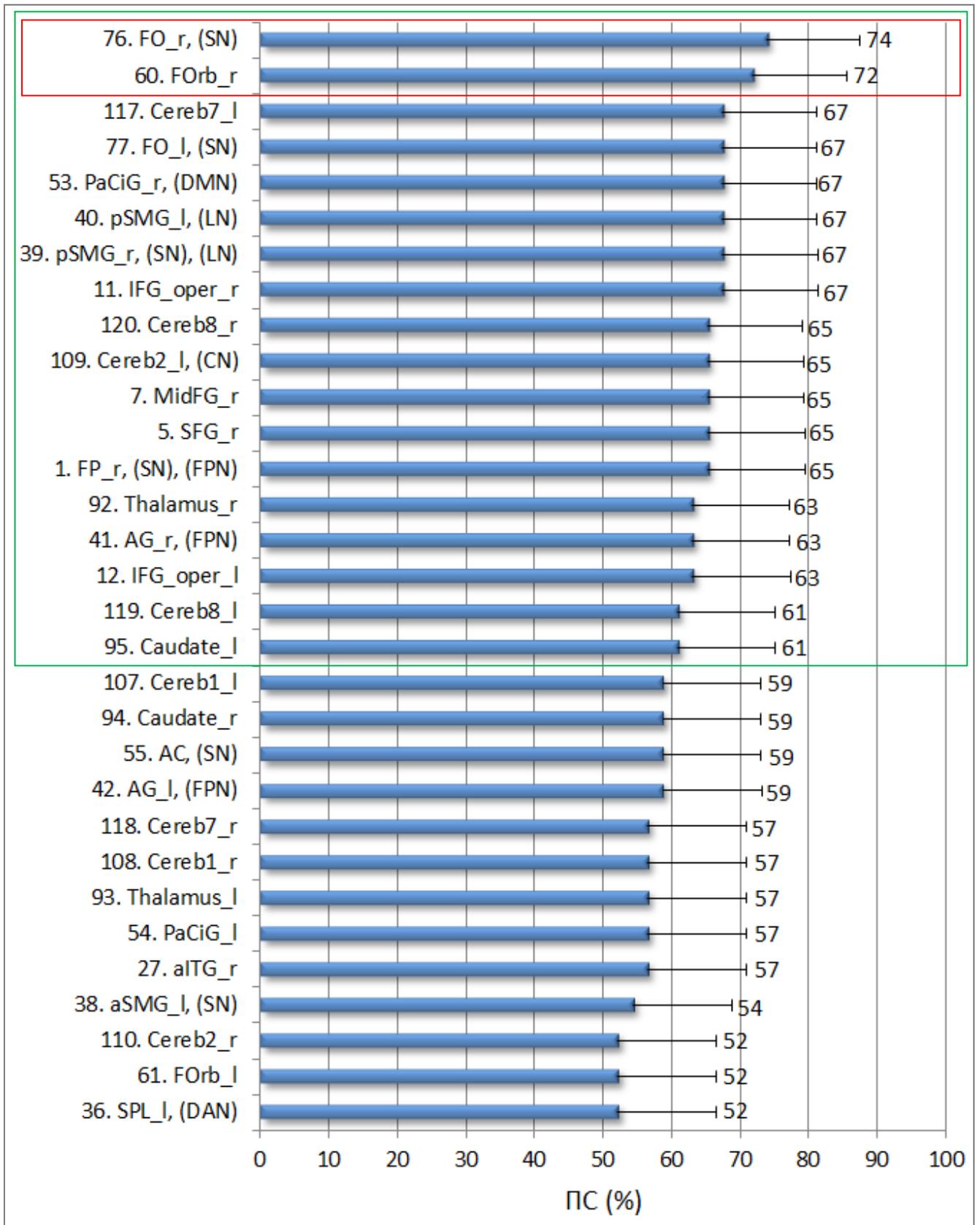


Рисунок 5.14 — Столбчатая гистограмма ПС в тесте ТЗВ, отсортированная от большего к меньшему, общая выборка,  $n=46$ . Красным выделены структуры, показавшие ПС от 70 %, зеленым — 60 %, а отсечка для визуализации была выбрана по уровню 50 %. Указаны долевые доверительные интервалы с доверительной вероятностью 0,95

#### **5.4.1.5. Анализ временных рядов фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга**

Выше была проанализирована повоксельная динамика фМРТ-сигнала (см. раздел 5.4.1.3). Отдельный интерес представляет динамика сигнала, усредненного по структурам мозга. Понижение пространственной размерности может повысить соотношение сигнал-шум и упростить визуализацию большого числа источников фМРТ-сигнала. Методическое обоснование такого анализа рассмотрено в главе 4. В частности, было отмечено, что форма фМРТ-сигнала в некоторых структурах мозга существенно отличается от стандартной формы гемодинамического ответа. Были выделены ранние и поздние компоненты (низколатентные и высоколатентные). Первые имеют пик около 3,3 с, а вторые — 6,6 с.

На рисунке 5.15 приводятся результаты визуализации фМРТ-сигналов при актуализации субъективно значимой информации (красный цвет) и менее значимой (синий цвет). Приведены данные по ТСИ и общей выборке  $n=74$ . Сопоставление названий структур мозга по «Атласу CONN» (см. раздел 2.5), приведенных на рисунке 5.15, см. в приложении А.

Можно обратить внимание на ряд особенностей:

а) почти во всех структурах мозга активации характеризуются увеличением амплитуды фМРТ-сигнала (за исключением нескольких структур, имеющих зашумленный или очень специфический по форме сигнал, по которым нельзя сделать достоверный вывод), включая первичную зрительную кору (зрительные стимулы при этом не подавались);

б) большая часть областей мозга показывает различия между активациями, связанными со значимой и незначимой информацией, при этом со значимой информацией связана большая амплитуда сигнала (за исключением особенностей активации некоторых областей зрительной коры, которые рассмотрены ниже);

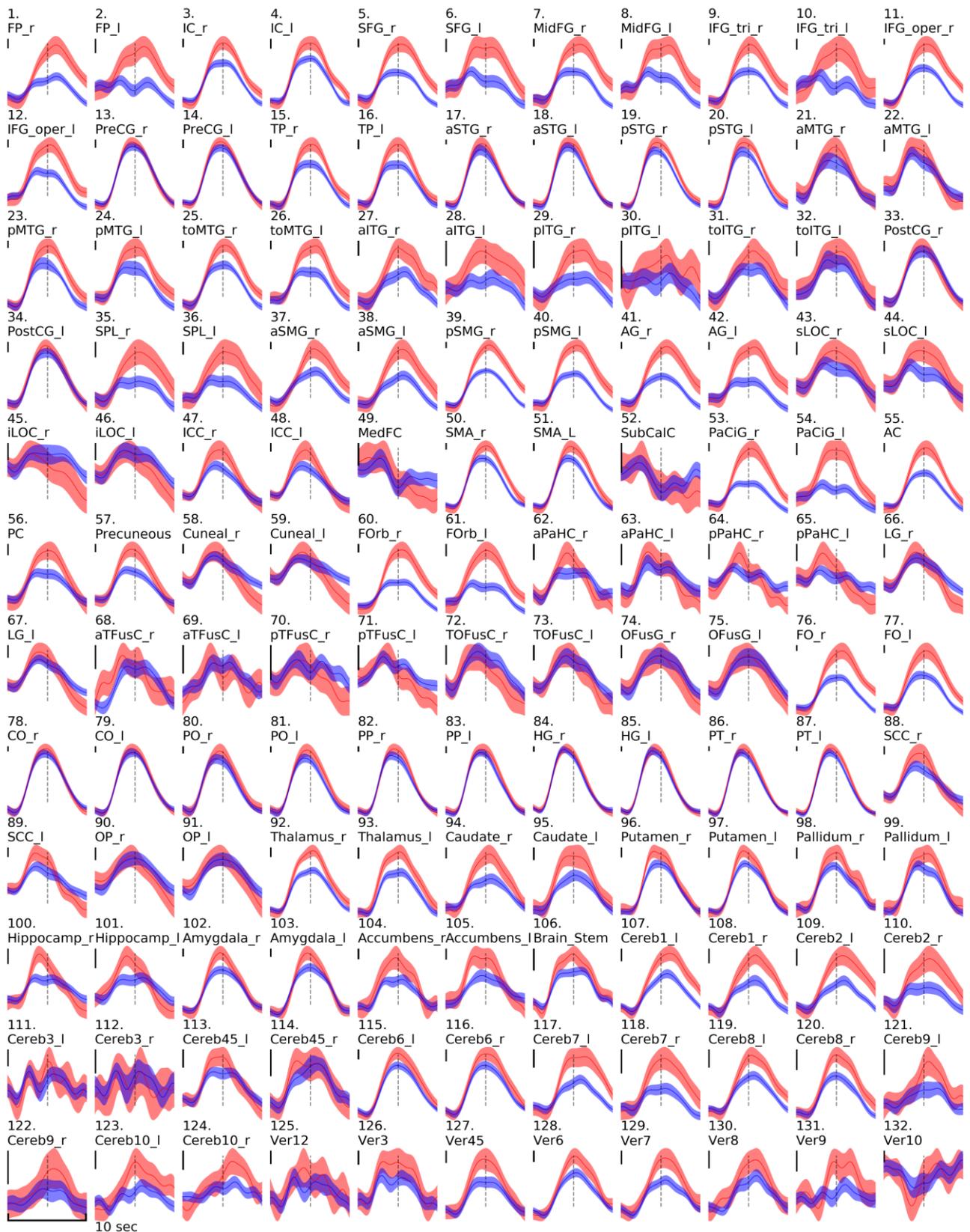


Рисунок 5.15 — фМРТ-сигналы от структур мозга, разделенные на эпохи по 10 с от предъявления стимула,  $n=74$ . Доверительные интервалы по уровню две стандартных ошибки ( $p \leq 0,05$ ). Красным цветом обозначены активации, связанные с актуализацией субъективно значимой информации, синим цветом — незначимой. Вертикальными штрихами обозначен масштаб амплитуды, пропорциональный для всех графиков

в) в первичных и вторичных слуховых областях (номера 78-87) и прецентральной извилине (двигательная кора, номера 13-14) различия между актуализацией субъективно значимой и незначимой информации не достигают статистически значимого уровня. При этом можно заметить, что максимальные значения сигнала в этих областях, хотя и не достигают статистически значимых различий (по доверительным интервалам, указанным на рисунке заливкой), имеют тенденцию к тому, что с актуализацией субъективно значимой информации связана большая амплитуда сигнала. В количественном выражении в некоторых вторичных слуховых областях (номера 80-83) разница пиковых значений составляет примерно 17% (графический анализ по рисунку 5.15). Для двигательных областей (номера 13-14) разница примерно 11%. Такие особенности фМРТ-сигнала в первичных и вторичных областях коры больших полушарий находятся в соответствии с нейрональными данными, полученными ранее в системной психофизиологии. На нейрональном уровне ранее было показано, что даже в первичной коре (различных модальностей) имеются нейроны, активность которых связана с субъективной значимостью актуализируемой информации. Например, в первичной зрительной коре набор активных нейронов при предъявлении значимой для животного вспышки света зависит от значимости этих вспышек (Швыркова, Швырков, 1975). Аналогичные эффекты были обнаружены в соматосенсорной коре (Александров, Гринченко, 1984), в моторной коре (Matsuzaka et al., 2007), и даже в активности механорецепторов (Александров, 1989; Åstrand et al., 1986). Количественно по нейрональным данным, зарегистрированным в пищедобывательном поведении кроликов, суммарное число активирующихся нейронов в моторной коре при увеличении значимости предъявляемого объекта возрастало на 39 %, а в зрительной коре — на 14 % (Александров, 1989; вычислено по данным таблицы 5 на с. 144 этой публикации);

г) в затылочных областях коры (номера 45-46, см. рисунок 5.15), в которых ранее (раздел 5.4.1.1 и далее) была обнаружена «отрицательная активность», при рассмотрении графиков фМРТ-сигнала можно выделить несколько

составляющих. Ранняя компонента сигнала (примерно до 3 с) после предъявления стимула, как и во всех других структурах мозга, *возрастает*, хотя и на небольшую величину (зрительные стимулы при этом не предъявлялись). На этом этапе сигнал не разделяется по амплитуде для значимой и незначимой информации. Затем, однако, в затылочной коре (включая *латеральную затылочную кору* и *клиновидную кору* — номера 45-46 и 58-59 по рисунку 5.15) наступает резкий спад сигнала. Характерно, что этот спад связан только с актуализацией субъективно значимой информации, а для нейтральной информации форма сигнала не слишком отличается от других структур. По амплитуде спад настолько сильный, что значения сигнала становятся меньше, чем начальные, предстимульные. Можно предположить, что в затылочных областях коры конкурируют два процесса — обычная активация, характерная для всех структур мозга, и резкий спад фМРТ-сигнала, имеющий неизвестную природу. Для объяснения «негативных» компонентов фМРТ-сигнала на ранних этапах развития фМРТ-исследований выдвигалось предположение о механическом перераспределении кровотока из затылочных областей коры в связи с повышенной активностью фронтальной коры (см., например, обсуждение в публикации Д. Бресслера с соавторами) (Bressler et al., 2007). В соответствии с такими представлениями, увеличение диаметра сосудов фронтальной коры должно приводить к увеличению занимаемого ими объема, что, как предполагалось, должно компенсироваться уменьшением размеров других структур, что регистрируется как равномерный спад фМРТ-сигнала, добавленный к обычной активации. Если это так, то открытым вопросом остается то, почему в этой компенсации участвуют только затылочные структуры. Другие авторы предположили, что существуют специальные механизмы активного перераспределения крови и ликвора в мозге (Bressler et al., 2007). Это согласуется с системными представлениями об актуализации систем и рассмотренными в пункте «в» выше нейрональными данными о наличии специализированных нейронов в первичных и вторичных областях коры (Швыркова, Швырков, 1975; Александров, Гринченко, 1984; Matsuzaka et al., 2007), а также нейрональными

данными об активации коры «незадействованной» в эксперименте модальности (слуховой) у обезьян (Brosch et al., 2005).

Далее был выполнен анализ размера эффекта, связанного с актуализацией субъективно значимой и незначимой информации, по АКО амплитуды сигнала в различных структурах мозга (таблица 4.7).

В таблице 4.7 приведены результаты вычисления разницы средних и ( $M_d$ ) и  $d_{\text{Коэна}}$ . Данные отсортированы по разнице средних. В таблице приведены только максимально информативные структуры. Отсечка в таблице произвольная (с целью уменьшения размера таблицы), так как большая часть структур мозга (85 из 132, т.е. 64%) показывают статистически значимые различия АКО по фактору субъективной значимости актуализируемой информации. При этом следует различать просто активность структур мозга, связанную с актуализацией информации, и разницу активности в зависимости от субъективной значимости этой информации. Как уже было отмечено выше при анализе рисунка 5.15 (см. пункт «а» в тексте данного раздела выше), недифференцированная активность наблюдается практически во всех структурах, при этом, если не учитывать дифференциальную разницу между двумя уровнями субъективной значимости актуализируемой информации, активации являются «положительными» (то есть сопровождаются увеличением локального кровотока в структурах мозга).

Максимальная разница средних значений (таблица 4.7) составляет примерно 0,6 у.е., а характерный размер эффекта по Коэну составляет примерно единицу. Эти значения соответствуют промежуточному положению по информативности между сигналом КГР и ФПГ (см. таблицу 4.2 в разделе 5.3.1).

Таблица 4.7 — Сравнение актуализации значимой и незначимой информации по АКО фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга (сопоставление названий см. в приложении А)

Тест	Структура мозга	$M_A$ значи- мые, у.е.	$M_B$ незначи- мые, у.е.	$p$ -значе- ние	$M_d$	$S_d$	$d_{\text{Козна}}$
ТСИ	76. FO_r	0,80	0,20	<0,001*	0,59	0,53	1,11
	11. IFG_oper_r	0,79	0,24	<0,001*	0,55	0,47	1,16
	9. IFG_tri_r	0,67	0,17	<0,001*	0,50	0,52	0,97
	39. pSMG_r	0,66	0,20	<0,001*	0,46	0,37	1,25
	41. AG_r	0,57	0,12	<0,001*	0,45	0,45	1,01
	42. AG_l	0,46	0,03	<0,001*	0,43	0,39	1,12
	40. pSMG_l	0,54	0,11	<0,001*	0,43	0,32	1,33
	53. PaCiG_r	0,45	0,08	<0,001*	0,37	0,32	1,15
	12. IFG_oper_l	0,46	0,09	<0,001*	0,37	0,34	1,07
	7. MidFG_r	0,45	0,11	<0,001*	0,34	0,38	0,90
	19. pSTG_r	0,83	0,50	<0,001*	0,33	0,52	0,63
	77. FO_l	0,47	0,15	<0,001*	0,32	0,31	1,04
	26. toMTG_l	0,38	0,06	<0,001*	0,32	0,36	0,89
	60. FOrb_r	0,42	0,10	<0,001*	0,32	0,28	1,15
	5. SFG_r	0,41	0,09	<0,001*	0,32	0,29	1,08
20. pSTG_l	0,67	0,35	<0,001*	0,31	0,50	0,63	
37. aSMG_r	0,49	0,18	<0,001*	0,31	0,53	0,58	
ТЗВ	76. FO_r	0,74	0,16	<0,001*	0,58	0,51	1,14
	11. IFG_oper_r	0,70	0,16	<0,001*	0,55	0,46	1,19
	42. AG_l	0,48	-0,05	<0,001*	0,54	0,48	1,12
	41. AG_r	0,54	0,01	<0,001*	0,52	0,39	1,35
	40. pSMG_l	0,56	0,06	<0,001*	0,50	0,40	1,26
	39. pSMG_r	0,63	0,17	<0,001*	0,46	0,38	1,21
	9. IFG_tri_r	0,54	0,12	<0,001*	0,42	0,56	0,76
	53. PaCiG_r	0,40	-0,02	<0,001*	0,42	0,30	1,40
	77. FO_l	0,47	0,11	<0,001*	0,36	0,29	1,26
	12. IFG_oper_l	0,41	0,04	<0,001*	0,36	0,43	0,85
	38. aSMG_l	0,42	0,07	<0,001*	0,35	0,44	0,80
	7. MidFG_r	0,38	0,03	<0,001*	0,35	0,28	1,25
	37. aSMG_r	0,46	0,12	<0,001*	0,34	0,58	0,58
	8. MidFG_l	0,31	-0,03	<0,001*	0,34	0,37	0,92
	5. SFG_r	0,36	0,03	<0,001*	0,33	0,26	1,27
60. FOrb_r	0,33	0,01	<0,001*	0,32	0,28	1,12	
57. Precuneous	0,30	0,01	<0,001*	0,29	0,28	1,05	

\* Обозначенные сравнения имеют  $p \leq (0,05/132)$  по Бонферрони.

## **5.4.2. Прямое статистическое сравнение мужской и женской выборки по фМРТ-данным**

Разделение общей выборки на мужскую и женскую подвыборки выполнялось как элемент кроссвалидации с целью проверки надежности выявления тех или иных закономерностей на нескольких различающихся между собой выборках. Однако полученные результаты могут представлять отдельную ценность для проблемного поля, относящегося к анализу межполовых различий, и потому описаны достаточно подробно.

### **5.4.2.1. Повоксельное сравнение активаций мозга в мужской и женской выборке**

При сравнении групп участников эксперимента необходимо было проанализировать возможные источники систематических и случайных погрешностей. Затем требовалось принять решение о необходимости дополнительного нормирования (помимо выполненного на этапе предобработки перед ИСА) или коррекции данных. В имеющихся данных вариативность могла быть обусловлена несколькими различными источниками. Это мог быть случайный шум технических средств измерения, индивидуальные физиологические особенности участников эксперимента (например, физические различия, определяющие расстояние от тканей мозга до регистрирующих фМРТ-сигнал катушек индуктивности и т.д.), а также индивидуальные различия, связанные с исследуемыми психофизиологическими закономерностями.

Для начала была оценена вариативность предобработанных данных без привязки к подаваемым стимулам. Для этого были проанализированы временные ряды фМРТ-сигнала в каждом вокселе на протяжении всего времени эксперимента. На рисунке 5.16 приведены стандартные отклонения сигнала фМРТ в вокселе для мужской и женской выборки в тесте ТСИ в одинаковом масштабе (стандартные отклонения усреднялись между участниками эксперимента).

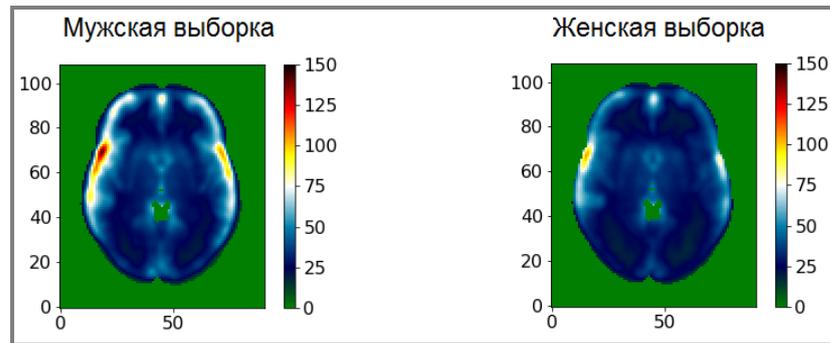


Рисунок 5.16 — Усредненное стандартное отклонение временных рядов фМРТ-сигнала в вокселе,  $n=37$  для каждой выборки (мужской и женской). Левое полушарие справа

Полученные результаты говорят о том, что свойства сигнала в мужской и женской выборке несколько различаются (несмотря на нормирование перед ICA) — в женской выборке флуктуации сигнала (как связанные со стимулами, так и случайные) меньше. Точно не известно, чем обусловлены эти различия. Являются ли они особенностями физиологии, технологии сбора и обработки данных или же представляют собой психофизиологическую закономерность, отличающую одну популяцию от другой. Косвенным подтверждением того, что имеет место действительная закономерность, являются данные по КГР и ФПГ (которые анализировались, в том числе, и без нормировки) показывают меньший уровень сигнала в женской выборке (см. разделы 5.3.1 и 5.3.2).

Известно, что для применения  $t$ -критерия, используемого при фМРТ-анализе, требуется равенство дисперсий. Однако полученные различия не такие сильные, как в случае сигнала КГР и ФПГ. По мнению Дж. Коэна, небольшое различие дисперсий, как в данном случае, не является критическим: «существует достаточно доказательств надежности  $t$ -критерия, несмотря на умеренную несостоятельность этого предположения, при условии, что размеры выборок примерно равны» (Cohen, 1998, с. 43). Более подробный анализ дисперсий, в том числе статистический, выходит за рамки темы диссертационной работы, так как существует большое число способов рассчитать дисперсии и сравнить их. Например, по всем точкам временного ряда в одной сессии фМРТ-записи, как приведено на рисунке 5.16; по связанным со стимулами оценкам, таким как АКО; или по каким-либо другим показателям.

При сравнении независимых выборок более важными могут оказаться не случайные флуктуации, а систематические погрешности, связанные с регистрацией и обработкой данных. Например, на рисунке 5.16 можно заметить различающиеся контуры совмещения данных со стандартным пространством MNI-152 для мужской и женской выборки. Это может иметь существенный эффект при сравнении независимых выборок. Тем не менее, в силу того, что, как уже отмечалось, сравнение мужской и женской выборок является элементом кроссвалидации (то есть позволяет проверить устойчивость результатов к такого рода искажениям), было признано полезным провести такое сравнение с учетом перечисленных выше особенностей данных.

Вначале было выполнено сравнение выборок с помощью стандартных средств анализа фМРТ-данных — при помощи модели GLM, реализованной в пакете FSL. На рисунке 5.17 приводятся результаты такого сравнения. Объединение данных по выборке выполнялось с помощью регрессионной модели со смешанными эффектами FLAME1 (Woolrich et al., 2004), реализованной в пакете FSL. Чтобы не делать выбор между различными стратегиями уменьшения ложноположительных результатов, на рисунке 5.17 визуализировались только те воксели, которые одновременно прошли порог  $p \leq 0,001$  без поправки на множественные сравнения и порог по кластерной поправке на множественные сравнения в пакете FSL при  $p \leq 0,05$ .

Результаты на рисунке 5.17 показывают, что имеются некоторые различия, преимущественно во фронтальных областях коры, по конфигурации напоминающие карты активаций, полученные при анализе субъективной значимости актуализируемой информации, приведенные в предыдущих разделах. Направление различий отмечается в сторону более высокой активности у мужской выборки.

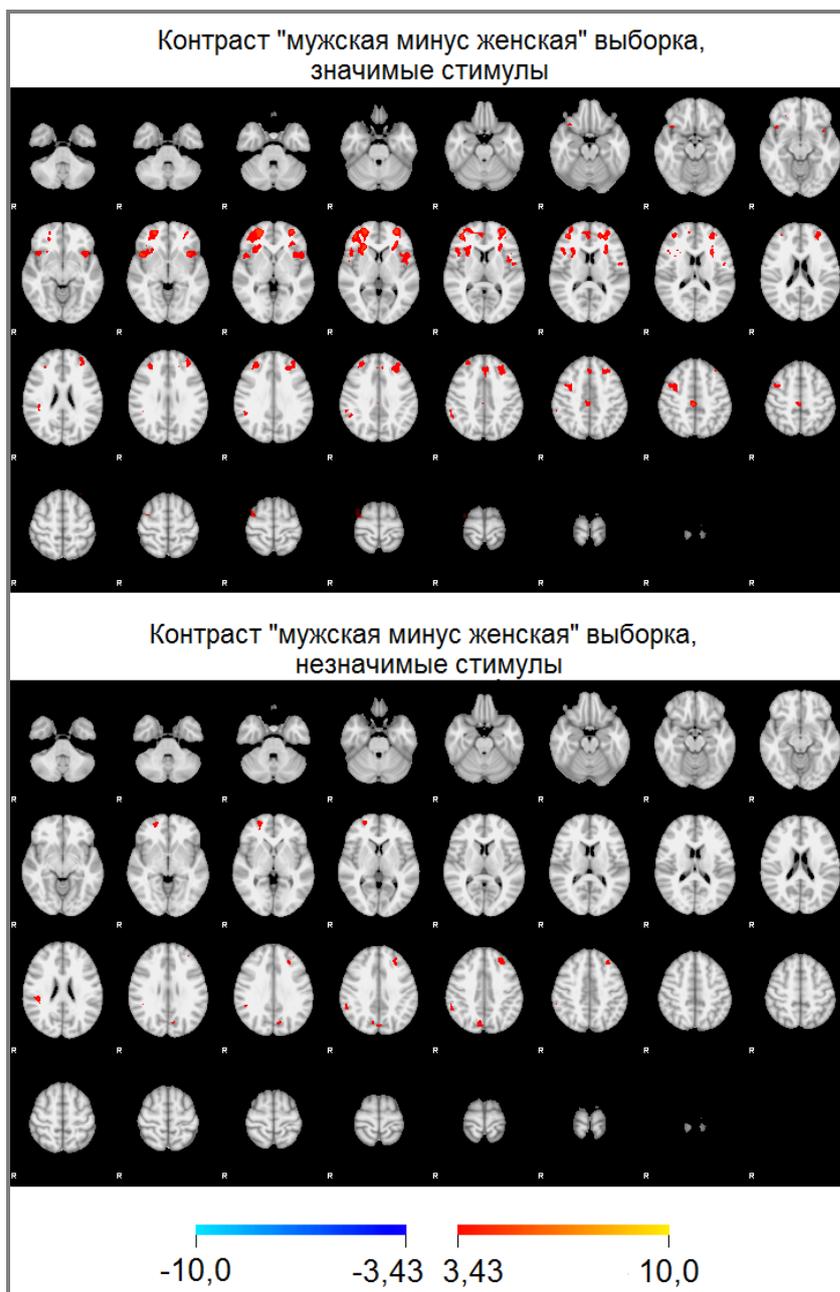


Рисунок 5.17 — Сравнение мужской и женской выборки с помощью FSL (показаны  $t$ -значения,  $n=37$  в каждой выборке, отсечка одновременно по порогу  $p \leq 0,001$  и по кластерной поправке на множественные сравнения в пакете FSL при  $p \leq 0,05$ ). Левое полушарие справа

Определенные недостатки стандартного подхода к визуализации по  $t$ -значениям были описаны ранее (см. раздел 4.2.5), поэтому для сравнения было выполнено картирование на основе амплитудных показателей, вычисленных по фМРТ-сигналу без использования GLM. На рисунке 5.18 приводятся результаты такого картирования. Отсечка визуализируемых вокселей по  $t$ -критерию для несвязанных выборок на уровне  $p \leq 0,05$  с поправкой FDR по методу Бенджамини-Хохберга.

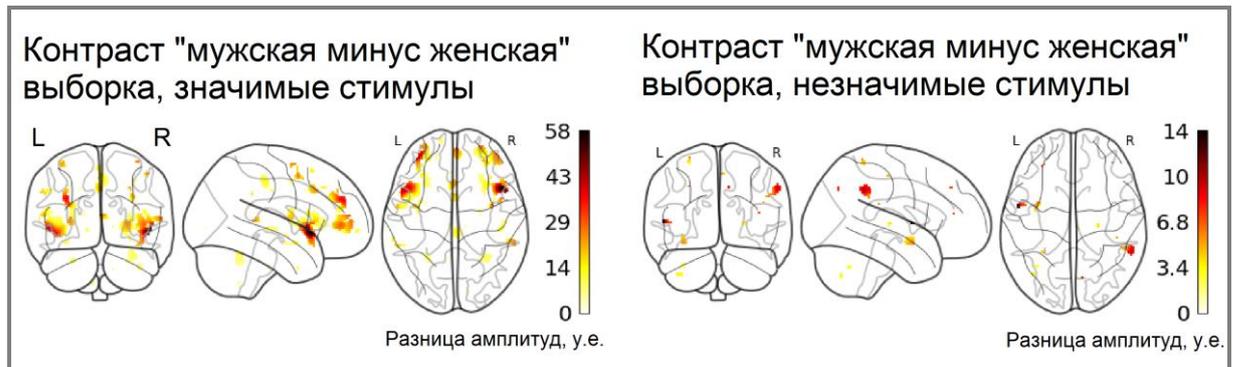


Рисунок 5.18 — Сравнение мужской и женской выборки по АКО на основе фМРТ-сигнала (порог отсечки по  $t$ -критерию для несвязанных выборок на уровне  $p \leq 0,05$  с поправкой FDR),  $n=37$  в каждой выборке, данные не нормированы

По рисунку 5.18 наблюдаются небольшие различия между мужской и женской выборкой по активности в некоторых областях коры, преимущественно фронтальных. Направление различий в сторону большей амплитуды сигнала у мужчин. Вокселей с обратной зависимостью не обнаружено. Максимальные различия по амплитуде сигнала наблюдаются в правой лобной оперкулярной коре (рисунок 5.18 слева сверху). Именно эта область ранее при сравнении по фактору субъективной значимости показывала наибольшие различия (как у мужчин, так и у женщин — см. рисунки 5.6-5.9 выше). Как отмечалось в разделе 1.2.2, интерес представляет поиск различий в межполушарной асимметрии активности мозга у мужчин и женщин. Однако проведенный дополнительный анализ (см. ниже) статистически значимых закономерностей не показал.

#### 5.4.2.2. Сопоставление мужской и женской выборки по метрике ПС

Ранее были рассмотрены возможности использования метрики ПС для выявления степени дифференциации структур мозга по отношению к тем или иным свойствам актуализируемой информации (см. раздел 5.4.1.4). Было отмечено, что метрика ПС решает проблему нормировки данных, проведенной во время предобработки фМРТ-данных (см. раздел 4.6), так как не зависит от нормировки. Чтобы сопоставить по этой метрике две группы, можно применить статистические критерии для таблиц сопряженности (используя вместо процентов исходное число совпадений и несовпадений). Это может быть критерий хи-

квадрат, точный критерий Фишера, критерий для долей на основе  $z$ -статистики (Ивин и др., 2017) и др. Другой способ — использовать исходные бинарные оценки совпадений и несовпадений для каждого участника эксперимента, применив к ним ранговый критерий — Манна-Уитни или Вилкоксона (для связанных выборок). На имеющихся данных были проведены вычисления с использованием разных критериев, и результаты показали несущественные различия получаемых  $p$ -значений, не влияющие на принятие итогового решения по статистическим гипотезам. Поэтому далее применялись те критерии, которые было удобно реализовать в используемых средствах обработки данных.

В таблице 4.8 приведены результаты сопоставления мужской и женской выборок с использованием критерия Манна-Уитни. Данные в таблице отобраны по  $p$ -значению с порогом  $p \leq 0,05$ .

Таблица 4.8 — Сравнение мужской и женской выборки по метрике ПС с усреднением по структурам мозга (сопоставление названий см. в приложении А)

Структура мозга	ПС, %		Разница ПС	$p$ -значение по критерию Манна-Уитни
	мужская выборка	женская выборка		
19. pSTG_r	70	32	38	0,001*
40. pSMG_1	89	59	30	0,004*
77. FO_1	76	49	27	0,018*
130. Ver8	49	24	24	0,031*
4. IC_1	62	38	24	0,038*

\*  $p \leq 0,05$ .

Результаты показывают, что между мужской и женской выборкой наблюдаются небольшие различия по дифференциации активаций, связанных со значимыми и незначимыми стимулами, что отражает метрика ПС. В таблице 4.8 перечислены структуры, находящиеся в височной коре (*задняя часть правой верхней височной извилины*), теменной коре (*задняя часть левой надкраевой извилины*), лобной коре (*правая лобная оперкулярная кора*), а также на стыке лобной, височной и теменной долей (*левая островковая кора*).

В таблице 4.8 присутствует также *червь мозжечка, область 8*. Различия в черве могут быть действительными, но нужно обратить внимание, что максимальное значение ПС в этой структуре не велико, а различия могут быть обусловлены сложностями анатомического совмещения небольших структур.

Дополнительно были проанализированы данные по более крупным единицам — объединению левосторонних и правосторонних частей наиболее информативных областей коры больших полушарий и объединению левосторонних и правосторонних частей подкорковых структур. Значимых различий между мужской и женской выборкой по этим данным обнаружено не было. Аналогичным образом была проанализирована разница между правосторонними и левосторонними структурами у мужской и женской выборки, а также разница между корой и подкорковыми структурами. Различия не достигают статистически значимого уровня.

Повоксельное сопоставление мужской и женской выборки по ПС с помощью критерия Манна-Уитни приведено на рисунке 5.19. Показано картирование с отсечкой по  $p \leq 0,001$  (отсечка по уровню  $p \leq 0,05$ ). С поправкой FDR значимых различий не выявляется.

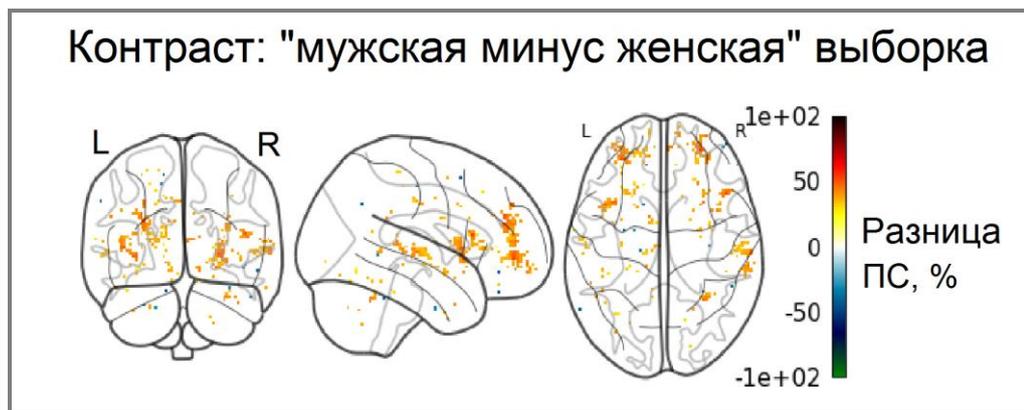


Рисунок 5.19 — Сравнение мужской и женской выборки по метрике ПС (контраст: «мужская минус женская» выборка, пороги по z-статистике долей на уровне  $p \leq 0,001$ ). Отрицательные значения соответствуют большим значениям ПС в женской выборке

Рисунок 5.19 в целом повторяет общие выводы, сделанные по таблице 4.8 выше. В мужской выборке больше вокселей показывают высокое значение ПС (то

есть лучше дифференцируются значимые и незначимые стимулы). Различия сосредоточены преимущественно во фронтальных областях коры.

#### **5.4.2.3. Сопоставление мужской и женской выборки по амплитудным свойствам фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга**

На рисунке 5.20 показаны фМРТ-сигналы, усредненные по структурам мозга (сопоставление названий с атласом см. в приложении А). Слева в каждой колонке мужская выборка, справа — женская,  $n=37$  для каждой выборки. Заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок (соответствует  $p \leq 0,05$  по статистике Стьюдента). Красным цветом обозначены активации, связанные с актуализацией значимой информации, синим цветом — менее значимой. Горизонтальными пунктирными линиями обозначены средние значения АКО. Звездочками обозначены статистически значимые различия АКО по критерию Манна-Уитни для независимых выборок на уровне  $p \leq 0,05$  (FDR) между мужской и женской выборками. Красной звездочкой показаны статистически значимые различия для субъективно значимых стимулов, синей — для незначимых.

По рисунку 5.20 видно, что в женской выборке сигнал в наиболее информативных областях коры (76, 77 — *лобная оперкулярная кора*; 60, 61 — *лобная орбитальная кора*; 1, 2 — *лобный полюс*) существенно меньше, чем в мужской выборке — и по амплитуде, и по разделению сигнала по фактору субъективной значимости. Это можно было бы объяснить физиологическими особенностями, но при этом в первичных слуховых областях коры (78-87 — *центральная оперкулярная кора, теменная оперкулярная кора, полярная плоскость, извилина Гешля, височная плоскость*) сигнал хотя и меньше, чем в мужской выборке, но не так сильно различается.

Это, вероятно, говорит о том, что процессы в первичных областях коры у мужчин и женщин в данном исследовании были примерно схожи. Но отношение к ним женщин (то есть субъективная значимость стимулов для них) отличалось, что видно по существенно меньшей активности фронтальных областей коры.

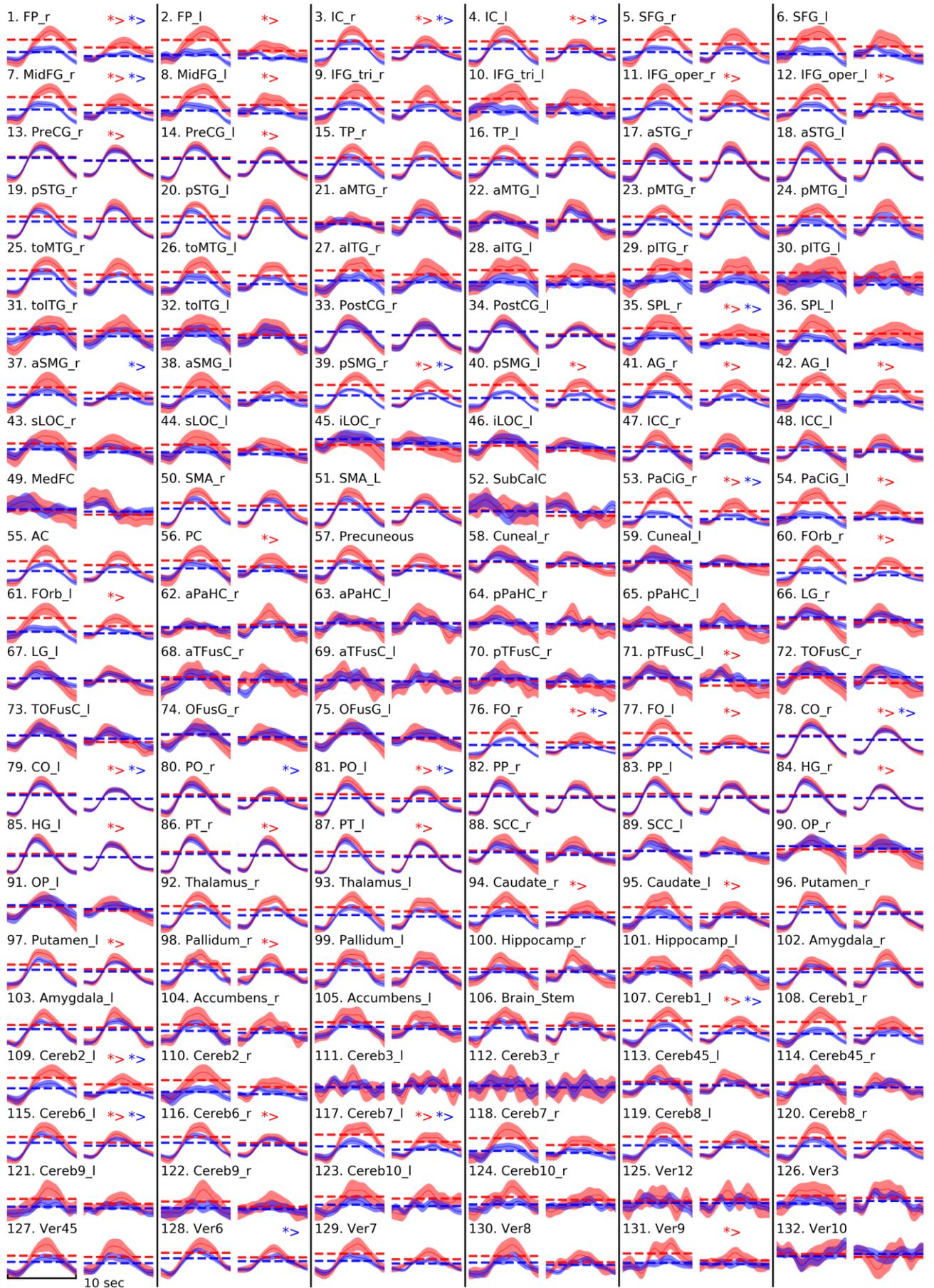


Рисунок 5.20 — Сопоставление мужской (в столбцах слева) и женской (справа) выборок по временным рядам фМРТ-сигнала (описание см. в основном тексте выше)

В более крупном масштабе данные представлены на рисунке 5.21. На этом рисунке сигнал объединен вместе по нескольким областям одновременно. На верхнем изображении показан объединенный сигнал от наиболее информативных областей коры. Информативные области (т.е. позволяющие выявлять субъективно значимые и незначимые для участника эксперимента стимулы по физиологическим сигналам) можно выделить разными способами. В данном случае использовался список областей, который был сформирован при анализе данных в главе 4 в разделе 4.4.

По рисунку 5.21 можно заметить, что различия между мужской и женской выборкой в информативных областях коры обусловлены преимущественно высоколатентным компонентом (вторая половина графика). У женщин (красная и розовая кривая) сигнал быстрее начинает возвращаться к исходным значениям.

В соответствии с единой концепцией сознания и эмоций и другими данными литературы (см. разделы 1.1.6 и 1.1.8), большая эмоциональность ассоциируется с низколатентными физиологическими и поведенческими ответами. Полученные данные находятся в согласии с этим подходом.

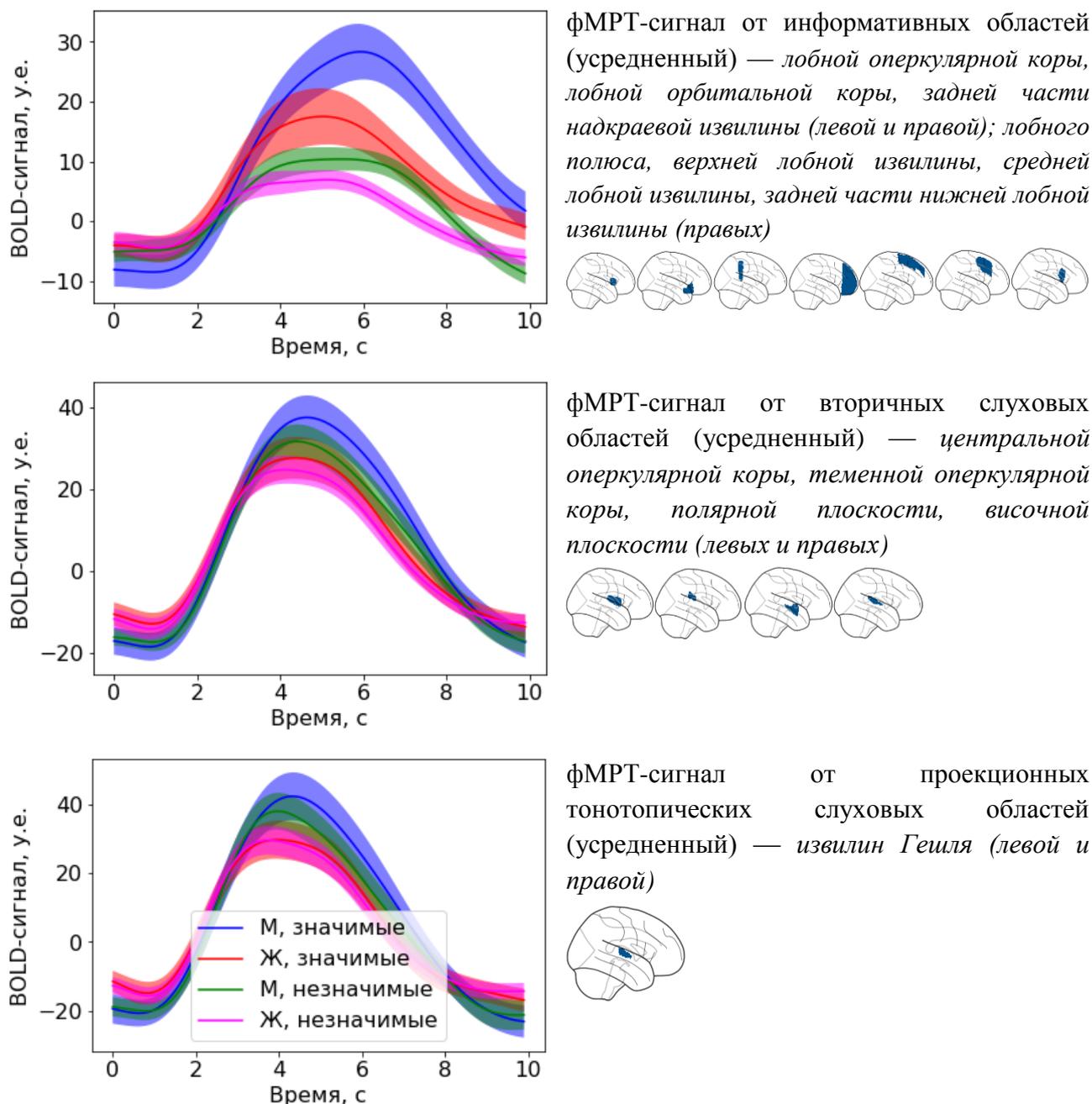


Рисунок 5.21 — фМРТ-сигналы, усредненные по группам областей коры больших полушарий мозга (сопоставление названий с атласом см. в приложении А),  $n=46$ , заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

Выше было замечено, что достаточно высокую информативность имеют структуры мозжечка. На рисунке 5.22 показан объединенный сигнал от нескольких структур мозжечка, показавших ранее высокие значения ПС (см. раздел 4.4).

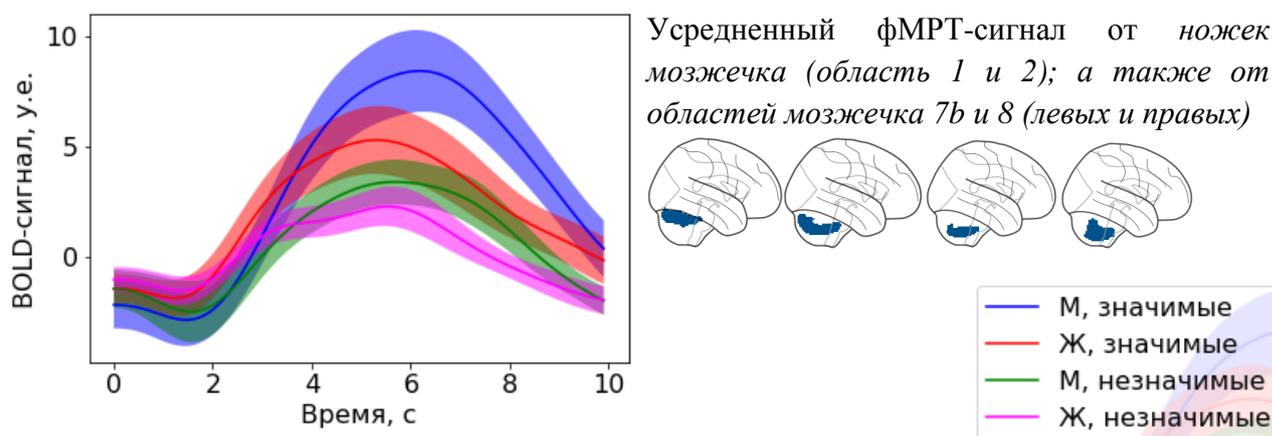


Рисунок 5.22 — фМРТ-сигналы, усредненные по структурам мозжечка (сопоставление названий с атласом см. в приложении А),  $n=46$ , заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

По рисунку 5.22 видно, что активность мозжечка во многом повторяет активность областей неокортекса. Это говорит о высокой степени взаимодействия коры больших полушарий и мозжечка.

Некоторые авторы обращают внимание на важность и единство таламо-кортикальной системы (см., например, теорию сознания Дж. Тонони — Tononi, 2004) и системы фронтальная кора — мозжечок — таламус (Данилова, 2004). Полученные в диссертационной работе результаты указывают на то, что сигналы мозжечка и неокортекса имеют большее сходство, чем сигналы неокортекса и таламуса (см. рисунок 5.23 далее). При этом, конечно, по имеющимся данным нельзя сделать вывод о направлении взаимодействия и других свойствах взаимодействия неокортекса и мозжечка в исследованных задачах.

На рисунке 5.23 ниже для сравнения показаны сигналы таламуса. Можно заметить, что они больше отличаются от сигнала коры, чем сигналы мозжечка. Сигналы таламуса имеют характерное смещение влево — ранние, и поздние компоненты достигают пика немного раньше (примерно на одну секунду), чем в других структурах мозга (за исключением сенсорных областей, в которых трудно выделить ранние и поздние компоненты фМРТ-сигнала). Эта же закономерность была замечена ранее в разделе 4.4.

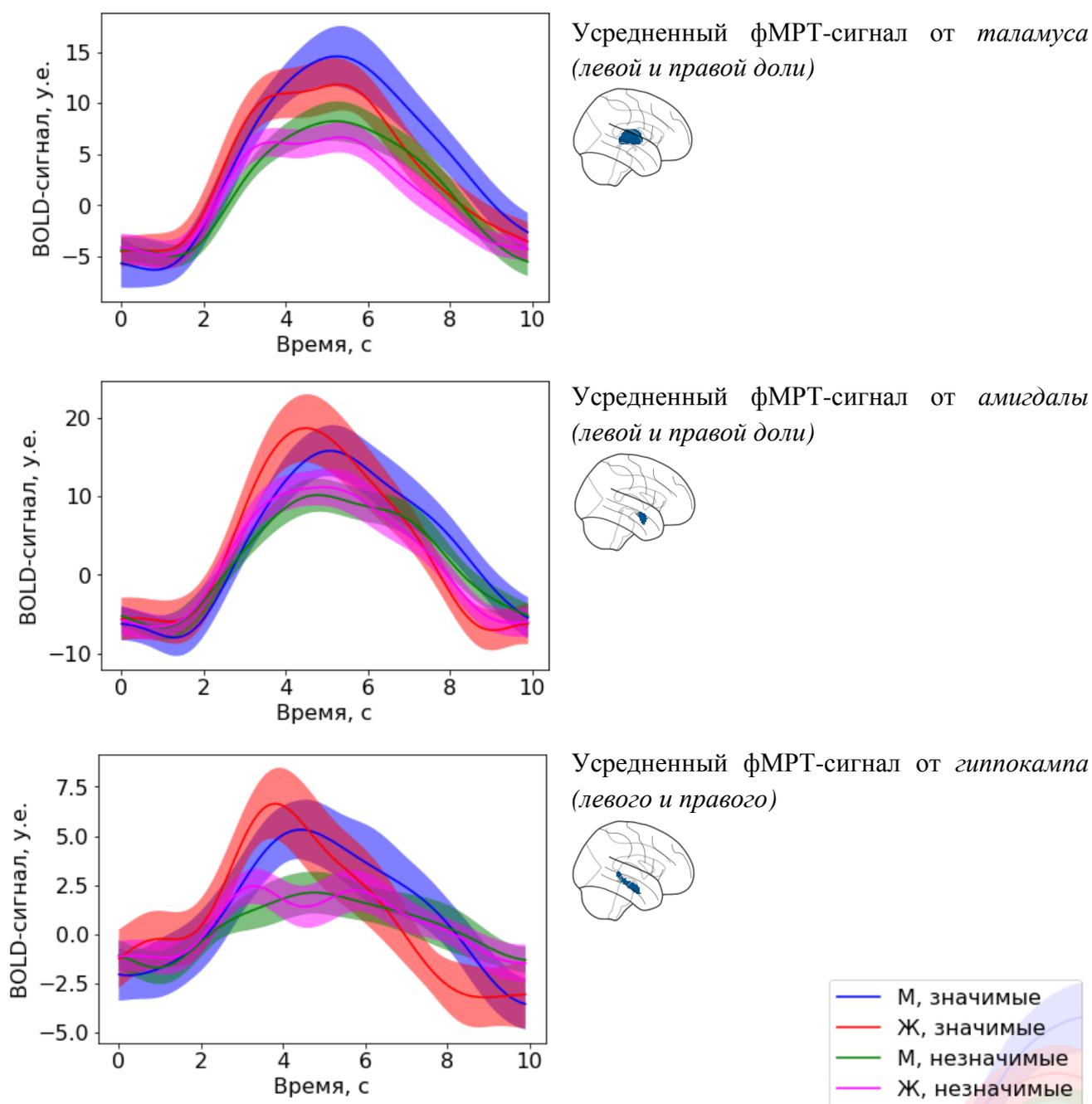


Рисунок 5.23 — фМРТ-сигналы, усредненные по группам структур мозга (сопоставление названий с атласом см. в приложении А),  $n=46$ , заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

Отдельно следует обратить внимание на активность амигдалы (рисунок 5.23). У женщин эта активность не меньше, чем у мужчин, и даже имеет тенденцию к более высоким значениям, особенно в низколлатентном компоненте (при том, что в целом, как отмечалось ранее, сигнал слабее). Учитывая, что эмоциональность женщин предположительно выше, чем мужчин, это может

говорить о том, что мозговое обеспечение эмоционального поведения и механизмы, связанные с субъективной значимостью, не перекрываются, хотя формулировки определений субъективной значимости и эмоций, приведенные в главе 1 в разделах 1.1.2, 1.1.3 и 1.1.6 по данным литературы, в значительной степени совпадают.

Учитывая, что исследование проводилось в парадигме сокрытия информации, то есть затрагивает психологическую проблематику лжи (хотя и не построено в парадигме выявления лжи, а сосредотачивается на субъективной значимости информации), можно обратить внимание на психологические различия восприятия лжи мужчинами и женщинами. По словам В.В. Знакова «женщины обращают внимание на *процессуальные*, коммуникативные аспекты искажений и анализируют, можно ли морально оправдать совершивших их людей. Мужчины неправду, ложь и обман связывают с искажением фактов» (Знаков, 1997, с. 38).

В этом контексте можно рассмотреть различия в физиологической картине активности мозга у мужчин и женщин. Одно из предположительных объяснений таких различий — разные стратегии экономии ресурсов. Женщины придавали меньшее значение созданным в эксперименте условиям и значимости актуализируемой информации, поэтому меньше активировались структуры мозга и связанные с ними соматические ресурсы организма, что дает экономию энергии. При этом постоянный мониторинг и оценка ситуации осуществлялись с помощью филогенетически древней структуры — амигдалы, активность которой в экспериментальной ситуации оказалась не меньше, чем в мужской выборке (а по пику раннего компонента даже больше).

На рисунке 5.23 показана активность гиппокампа. Можно обратить внимание, что амплитуда сигнала и дифференциация по фактору субъективной значимости здесь не являются высокими. Это может быть обусловлено как техническими трудностями автоматической локализации гиппокампа в фМРТ-данных в силу его анатомических особенностей, так и сложностью сигнала гиппокампа.

Для количественного сравнения амплитуд сигнала у мужчин и женщин в различных структурах мозга в исследованной задаче было выполнено вычисление АКО по описанной выше методике. Результаты приведены в таблице 4.9 ниже. Данные отсортированы по  $p$ -значению и отобраны по уровню  $p \leq 0,05$  с поправкой FDR. В таблице 4.9 использован критерий Стьюдента, а непараметрический критерий Манна-Уитни приведен для контроля на рисунке 5.20.

Таблица 4.9 — Сравнение мужской и женской выборки по АКО с усреднением по структурам мозга (ненормированные данные)

Стимулы	Структура мозга	$M_A$ мужская выборка	$M_B$ женская выборка	$p$ -значе- ние, FDR	$p$ -значе- ние не- корректи- рованное	$M_A - M_B$	$d_{\text{Козна}}$
значи- мые	77. FO_l	19	7	<0,001	<0,001*	13	1,3
	54. PaCiG_l	11	4	0,001	<0,001*	7	1,1
	4. IC_l	11	5	0,002	<0,001*	6	1,0
	53. PaCiG_r	17	8	0,002	<0,001*	8	1,0
	76. FO_r	29	13	0,002	<0,001*	17	1,0
	2. FP_l	10	4	0,005	<0,001*	6	0,9
	3. IC_r	13	6	0,005	<0,001*	6	0,9
	60. FOrb_r	15	8	0,006	<0,001	7	0,9
	116. Cereb6_r	8	4	0,006	<0,001	4	0,9
	79. CO_l	15	7	0,007	0,001	8	0,9
	61. FOrb_l	10	5	0,016	0,001	5	0,8
	7. MidFG_r	17	9	0,023	0,002	8	0,8
	117. Cereb7_l	6	3	0,023	0,002	3	0,7
	39. pSMG_r	22	14	0,025	0,003	8	0,7
	98. Pallidum_r	7	4	0,025	0,003	3	0,7
	1. FP_r	13	7	0,031	0,004	6	0,7
	8. MidFG_l	12	6	0,031	0,004	6	0,7
	78. CO_r	17	9	0,031	0,004	8	0,7
	115. Cereb6_l	9	5	0,031	0,004	4	0,7
	131. Ver9	4	1	0,038	0,006	2	0,7
	41. AG_r	20	12	0,040	0,007	8	0,7
	42. AG_l	17	10	0,040	0,007	6	0,7
	84. HG_r	12	7	0,040	0,007	5	0,7
12. IFG_oper_l	16	9	0,041	0,007	7	0,6	
95. Caudate_l	8	4	0,041	0,008	4	0,6	

Продолжение таблицы 4.9

Сти- мулы	Структура мозга	$M_A$ мужская выборка	$M_B$ женская выборка	$p$ -значе- ние, FDR	$p$ -значе- ние не- корректи- рованное	$M_A-M_B$	$d_{\text{Козна}}$
значи- мые	97. Putamen_l	7	5	0,041	0,008	3	0,6
	40. pSMG_l	19	12	0,042	0,009	7	0,6
	87. PT_l	20	13	0,042	0,009	8	0,6
	96. Putamen_r	8	5	0,044	0,010	3	0,6
не- значи- мые	39. pSMG_r	7	3	0,003	<0,001*	4	1,0
	81. PO_l	9	5	0,003	<0,001*	5	1,0
	80. PO_r	8	3	0,003	<0,001*	5	1,1
	79. CO_l	12	7	0,004	<0,001*	5	1,0
	35. SPL_r	2	0	0,005	<0,001*	2	0,9
	109. Cereb2_l	2	0	0,005	<0,001*	2	0,9
	4. IC_l	5	2	0,005	<0,001*	3	0,9
	1. FP_r	4	1	0,005	<0,001*	3	0,9
	78. CO_r	15	9	0,008	0,001	6	0,9
	37. aSMG_r	7	2	0,009	0,001	4	0,8
	3. IC_r	5	3	0,009	0,001	3	0,8
	115. Cereb6_l	5	3	0,010	0,001	2	0,8
	76. FO_r	8	3	0,015	0,002	5	0,8
	38. aSMG_l	5	1	0,015	0,002	3	0,8
	7. MidFG_r	4	1	0,016	0,002	3	0,8
	14. PreCG_l	8	5	0,020	0,002	3	0,7
	34. PostCG_l	6	3	0,024	0,003	3	0,7
	128. Ver6	4	2	0,025	0,003	2	0,7
	116. Cereb6_r	4	3	0,025	0,004	2	0,7
	41. AG_r	4	1	0,025	0,004	3	0,7
	60. FO_r	4	1	0,025	0,004	2	0,7
	77. FO_l	5	2	0,026	0,005	3	0,7
	25. toMTG_r	6	3	0,026	0,005	3	0,7
	107. Cereb1_l	3	1	0,026	0,005	2	0,7
117. Cereb7_l	2	0	0,028	0,005	1	0,7	
13. PreCG_r	8	6	0,030	0,006	3	0,7	
46. iLOC_l	3	1	0,033	0,007	2	0,7	
53. PaCiG_r	3	1	0,047	0,010	2	0,6	
57. Precuneous	3	1	0,048	0,010	3	0,6	

\* Обозначенные сравнения имеют  $p \leq (0,05/132)$  по Бонферрони.

Результаты в таблице 4.9 согласуются со сделанными ранее заключениями, что амплитуда фМРТ-сигнала у мужской выборки во многих структурах мозга выше, чем у женской. Размер эффекта по Коэну достигает 1,3 (таблица 4.9) и в целом примерно того же уровня, что и различия по фактору субъективной значимости (см. таблицу 4.7 выше). Эти параметры важны в качестве референсных значений в контексте дальнейшего сопоставления ТСИ и ТЗВ.

### **5.4.3. Прямое статистическое сравнение ТСИ и ТЗВ по фМРТ-данным**

Выше были проанализированы закономерности активности мозга, связанные с актуализацией информации, различающейся по субъективной значимости. Как было предположено в обзоре литературы, помимо субъективной значимости одновременно могут быть выделены и другие факторы. Например, при актуализации информации, приобретенной человеком в различные периоды жизни, должна различаться системная организация и, соответственно, регистрируемая физиологическая активность мозга. Чтобы выявить закономерности в активности мозга при актуализации памяти, различающейся по времени приобретения (см. раздел 1.2), в работе выполнено статистическое сравнение данных по тестам ТСИ и ТЗВ, моделирующих актуализацию информации, приобретенной человеком в различные периоды жизни.

#### **5.4.3.1. Повоксельное сравнение активаций в тестах ТСИ и ТЗВ**

Чтобы показать результаты вычислений с помощью стандартных методов, на рисунке 5.24 приводится картирование с помощью пакета FSL. Объединение данных по выборке выполнялось с помощью встроенного в FSL метода FLAME1 (Woolrich et al., 2004). Применялась кластерная поправка на множественное сравнение FSL при  $p \leq 0,05$ .

По рисунку 5.24 можно заметить, что в слуховых областях коры активность в ТЗВ больше, чем в ТСИ (синяя заливка). При этом в *цингулярной коре*, *угловой извилине* и *мозжечке* сигнал больше в ТСИ, чем в ТЗВ. Это говорит о том, что имеются различия стимулов по сенсорным свойствам, которые, однако,

нивелируются во вторичных областях (подробнее см. обсуждение этого вопроса в разделе 5.4.1.5, а также далее в разделе 5.4.3.3). В ассоциативных областях коры и мозжечке более высокая активность (красная заливка на рисунке 5.24) наблюдается при актуализации информации, приобретенной в более ранние периоды жизни (тест ТСИ).

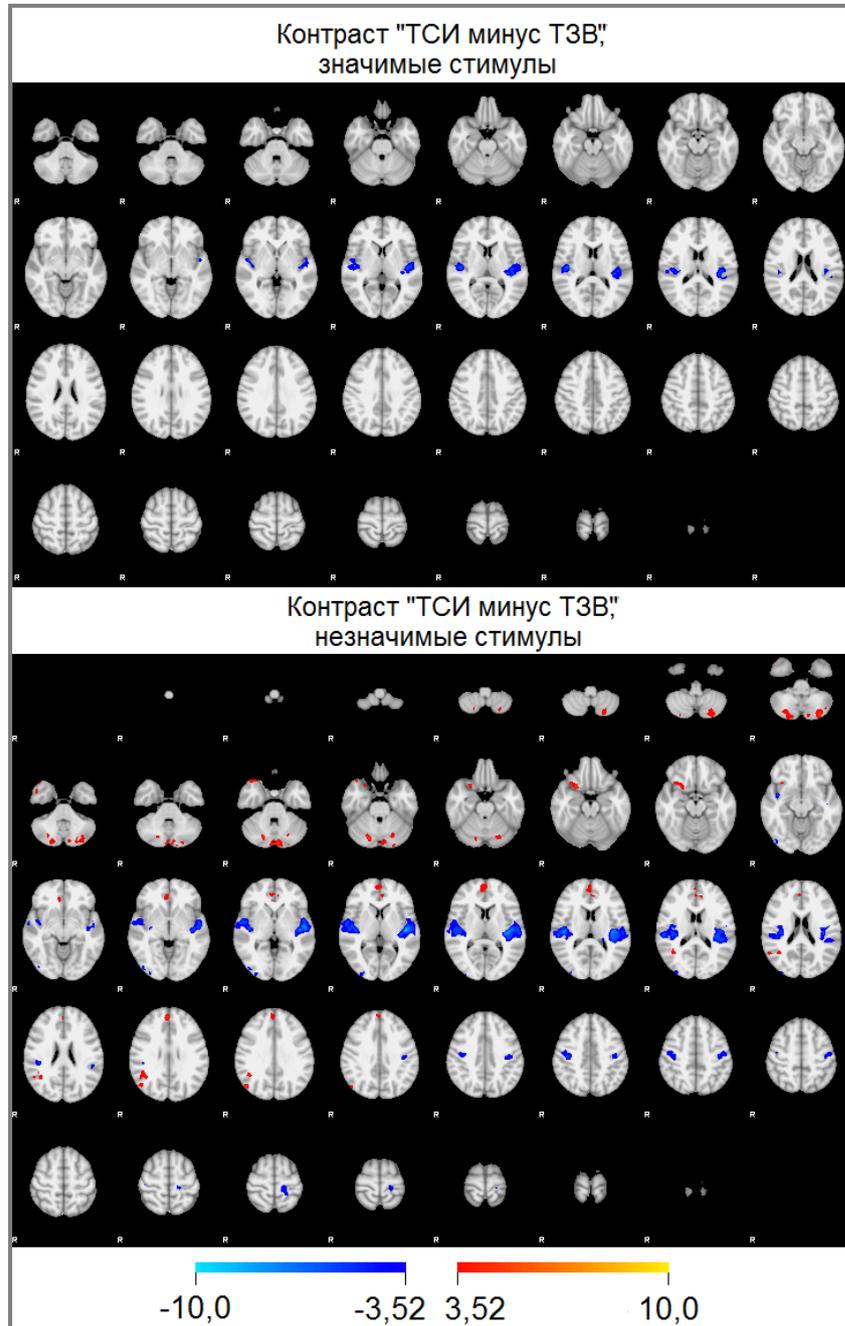


Рисунок 5.24 — Сравнение ТСИ и ТЗВ с помощью пакета FSL (показаны  $t$ -значения,  $n=46$  в каждом тесте, отсечка одновременно по порогу  $p \leq 0,001$  и по кластерной поправке на множественные сравнения в пакете FSL при  $p \leq 0,05$ ). Левое полушарие справа

Далее было выполнено амплитудное картирование. Дополнительная нормировка сигнала не применялась, если не считать трансформаций сигнала, выполненных в рамках процедуры очистки данных с помощью ICA (см. раздел 2.6). На рисунке 5.25 показаны результаты по субъективно незначимым стимулам (для субъективно значимых стимулов разница между ТСИ и ТЗВ этим способом обнаружена не была).

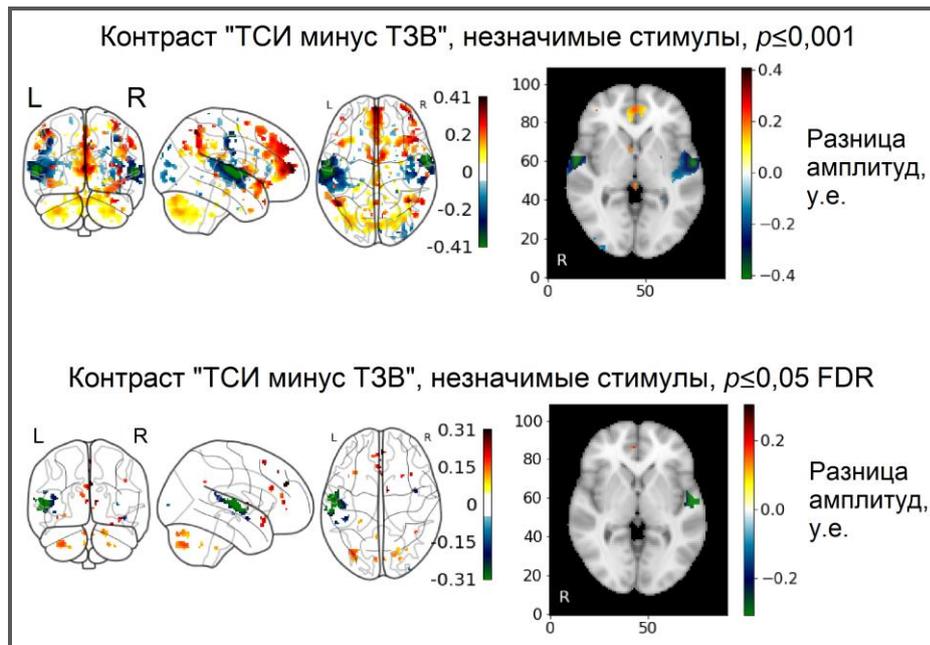


Рисунок 5.25 — Разница между тестами ТСИ и ТЗВ по АКО фМРТ-сигнала (сверху — порог отсечки по  $t$ -критерию для связанных выборок на уровне  $p \leq 0,001$ ; снизу — порог отсечки  $p \leq 0,05$  с поправкой FDR), общая выборка  $n=46$

Результаты на рисунке 5.25 согласуются с приведенными выше данными (рисунок 5.24). Наблюдаются различия в слуховых областях коры, которые можно объяснить различиями в сенсорных свойствах стимулов ТСИ и ТЗВ (синяя заливка). По амплитуде эти различия более выражены в левом полушарии. При этом в *цингулярной коре, фронтальной коре, угловой извилине, надкраевой извилине* и *мозжечке* сигнал больше в ТСИ, чем в ТЗВ. Выводы можно сделать те же, что и ранее. Имеются различия стимулов по сенсорным свойствам, проявляющиеся в слуховых областях, но в других (ассоциативных) областях коры и в мозжечке более высокая активность наблюдается при актуализации информации, приобретенной в более ранние периоды жизни.

Дополнительно был выполнен анализ и по «двойному» контрасту — то есть сначала вычислялся размер эффекта при сравнении значимых и незначимых стимулов, а затем по этому эффекту сравнивались тесты ТСИ и ТЗВ. Повоксельный анализ по двойному контрасту не показал статистически значимых различий между тестами ТСИ и ТЗВ ни в пакете FSL, ни с помощью АКО. Это значит, что дифференциация стимулов по субъективной значимости в тестах ТСИ и ТЗВ не различается.

#### 5.4.3.2. Сопоставление ТСИ и ТЗВ по метрике ПС

Один из наиболее интересных результатов был получен при сравнении ТСИ и ТЗВ по метрике ПС. Как уже было сказано ранее, этот метод не зависит от примененной нормировки данных и, соответственно, решает проблему нормализации медианы интенсивности отдельных фМРТ-сессий на этапе предобработки (см. раздел 2.6). Вначале было выполнено повоксельное сравнение. Результаты приведены на рисунке 5.26. Использован достаточно толерантный порог  $p \leq 0,05$  без поправок на множественные сравнения. Это не позволяет говорить о высокой достоверности выделения отдельного вокселя, но можно обнаружить общие закономерности.

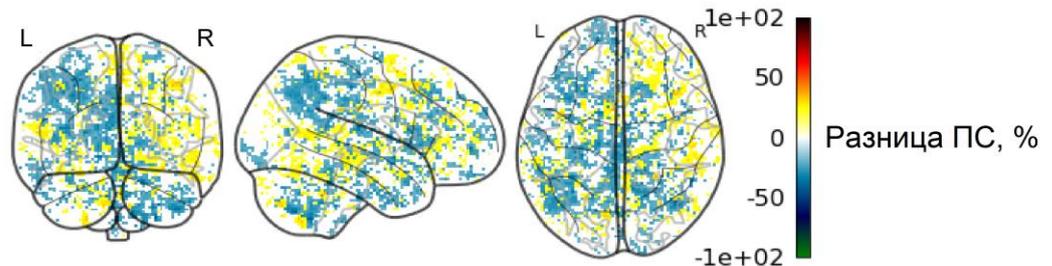


Рисунок 5.26 — Сравнение ТСИ и ТЗВ по метрике ПС (контраст: «ТСИ минус ТЗВ», пороги по  $z$ -статистике долей на уровне  $p \leq 0,05$ ). Отрицательные значения ПС соответствуют большим значениям ПС в ТЗВ

Можно заметить тенденцию, что в тесте ТЗВ (моделирует актуализацию новой информации) происходит большая дифференциация активности по фактору актуализируемой информации структурами левого полушария мозга, а также

контрлатеральным правым полушарием мозжечка. Это соответствует структуре проводящих путей мозжечка, которые либо не пересекаются, либо пересекаются дважды.

И наоборот, актуализация онтогенетически старой информации (тест ТСИ) связана с более дифференцированной активацией правого полушария. Активность контрлатерального полушария мозжечка (см. рисунок 5.26 слева) также соответствует этому выводу.

Этот результат согласуется с представлениями ряда авторов о том, что левое полушарие головного мозга связано с запоминанием новой информации (особенно семантической), а правое отвечает за более онтогенетически старую память (подробнее см. раздел 1.2 обзора литературы). На фундаментальном уровне эти различия могут быть связаны с гетерохронностью созревания полушарий (см. там же). Таким образом, полученные результаты и данные литературы о межполушарной асимметрии развития мозга говорят о том, что положения системной психофизиологии о системогенезе по принципу добавления новых систем могут выражаться не только в изменении состава специализированных нейронов и суммарной активности корковых и подкорковых структур, но также и в межполушарной асимметрии. Это утверждение находится в соответствии и со сформулированным в рамках системной психофизиологии предположением, базирующемся на «системогенетических представлениях о становлении системоспецифичности нейронов» и более позднем созревании структур левого полушария, о «специфичности нейронов этого [левого] полушария по отношению к более «молодым» дифференцированным системам, чем нейронов правого» (Александров, 1989, с. 178).

Далее была проанализирована метрика ПС с предварительным усреднением сигнала по структурам мозга. В таблице 4.10 приведены результаты как для отдельных структур по «Атласу CONN» (сопоставление названий см. в приложении А; сортировка по  $p$ -значению с отсечкой  $p \leq 0,05$ ), так и для еще более укрупненных единиц — информативных областей коры и подкорковых структур.

Статистически значимые различия показали лишь две структуры на уровне  $p \leq 0,05$  без поправок на множественные сравнения (таблица 4.10). Тем не менее, если обратить внимание на некоторые закономерности, то можно заметить, что в тесте ТЗВ большую дифференциацию по метрике ПС показала левосторонняя структура (левое хвостатое ядро), а в тесте ТСИ — правосторонняя (треугольная часть правой нижней лобной извилины), что соответствует обнаруженной выше тенденции. Эта тенденция заключается в правосторонней латерализации активаций, связанных с актуализацией старого опыта, по сравнению с левосторонней латерализацией при актуализации нового опыта.

Таблица 4.10 — Сравнение ТСИ и ТЗВ по метрике ПС с усреднением по структурам мозга

Структура мозга	ПС, %		Разница ПС, %	<i>p</i> -значение по критерию Вилкоксона
	ТСИ	ТЗВ		
95. Caudate_1 (левое хвостатое ядро)	35	61	-26	0,02*
9. IFG_tri_r (треугольная часть правой нижней лобной извилины)	72	52	20	0,05*
Объединение наиболее информативных областей коры: лобной оперкулярной коры, лобной орбитальной коры, задней части надкраевой извилины, лобного полюса, верхней лобной извилины, средней лобной извилины, задней части нижней лобной извилины (левых и правых)	51	55	-4	0,2
Таламус (левый и правый)	48	57	-9	0,4
Хвостатое ядро (левое и правое)	40	52	-12	0,2
Скорлупа (левая и правая)	36	47	-11	0,2
Паллидум (левый и правый)	34	38	-4	0,4
Гиппокамп (левый и правый)	37	28	9	0,3
Миндалина (левая и правая)	36	37	-1	0,9
Прилежащее ядро (левое и правое)	34	46	-12	0,1
Ствол мозга	63	65	-2	0,8

\*  $p \leq 0,05$ .

Объединение данных по наиболее информативным областям коры (одновременно левосторонним и правосторонним) не показывает статистически значимых различий между тестами ТСИ и ТЗВ по метрике ПС (таблица 4.10). То есть нельзя сказать, что уровень дифференциации активности коры в целом различается между тестами.

Статистических различий в подкорковых структурах между ТСИ и ТЗВ также не обнаруживается (таблица 4.10). Нет даже тенденции на меньшую дифференциацию подкорковых структур в ТЗВ — численно ПС даже больше в ТЗВ (кроме гиппокампа), но эти различия не достигают статистически значимого уровня.

Дополнительно была вычислена объединенная метрика — разница ПС между корой и подкорковыми структурами (в разных комбинациях) — и по ней сопоставлены ТСИ и ТЗВ. Такое сопоставление не показало значимых различий.

Приведенные выше результаты говорят о том, что различия в дифференциации активности (по метрике ПС), связанной с актуализацией материала памяти, приобретенного в различные периоды жизни человека (старого и нового индивидуального опыта), не имеют универсальной сильной связи с филогенетическим возрастом структур мозга. Обнаруживаемые различия носят локальный характер — относятся к отдельным областям коры головного мозга или другим структурам (*треугольная часть правой нижней лобной извилины и левое хвостатое ядро*). Обобщенная тенденция наблюдается лишь в отношении межполушарной асимметрии активаций (по рисунку 5.26).

Чтобы проверить приведенные выше утверждения прямым статистическим сравнением, требовалось выполнить анализ одновременно по нескольким измерениям — сопоставление левосторонних и правосторонних структур, сопоставление корковых и подкорковых структур и сравнение ТСИ и ТЗВ. Эта задача может быть решена путем понижения размерности с помощью объединения данных — вначале размеры эффекта объединяются по одному из измерений (например, вычисляется разница, процент изменений, соотношение, децибелы и т.д. — см. обсуждение этого вопроса в разделе 5.2.5), а затем

производится статистическое сравнение полученных оценок. Исходные размеры эффекта могут вычисляться как в исходных единицах измерения, так и относительно единиц разброса данных (по Коэну или другими способами). Каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки. Далее приводится анализ по размеру эффекта в исходных единицах измерения (ПС).

Чтобы выполнить понижение размерности, вычислялась разница между метриками ПС для правосторонних и левосторонних структур по формуле

$$D_{\text{ПЛ}} = \text{ПС}_{\text{П}} - \text{ПС}_{\text{Л}} \quad (3)$$

где  $\text{ПС}_{\text{П}}$  — значение метрики ПС в правосторонней структуре;

$\text{ПС}_{\text{Л}}$  — значение метрики ПС в левосторонней структуре.

Значение  $D_{\text{ПЛ}}$  вычислялось отдельно для тестов ТСИ и ТЗВ, а также вычислялся размер эффекта по разнице между полученными для ТСИ и ТЗВ индексами (см. таблицу 4.11).

Помимо обобщенных значений ПС, по вышеприведенной логике объединялись массивы совпадений и несовпадений по отдельным участникам эксперимента (то есть из бинарного массива для правосторонней структуры вычитался бинарный массив для левосторонней структуры). Полученные массивы сравнивались с помощью рангового критерия Вилкоксона. Результаты приведены в таблице 4.11. В этой таблице сортировка выполнена по  $p$ -значению, и данные отобраны по уровню  $p \leq 0,05$ .

Таблица 4.11 — Сравнение ТСИ и ТЗВ по разнице между правосторонними и левосторонними структурами мозга по метрике ПС (сопоставление названий структур см. в приложении А)

Сопоставляемые структуры мозга (левосторонняя и правосторонняя)	Разница ПС между правосторонней и левосторонней структурой мозга, %		Разница значений $D_{ПЛ}$ между тестами ТСИ и ТЗВ, %	$p$ -значение по критерию Вилкоксона
	$D_{ПЛ}$ , ТСИ	$D_{ПЛ}$ , ТЗВ		
43. sLOC_r — 44. sLOC_l	2	-4	6	0,004
76. FO_r — 77. FO_l	16	4	12	0,006
5. SFG_r — 6. SFG_l	12	6	6	0,016
1. FP_r — 2. FP_l	6	1	5	0,033
47. ICC_r — 48. ICC_l	4	-3	7	0,035
7. MidFG_r — 8. MidFG_l	9	2	7	0,038
39. pSMG_r — 40. pSMG_l	4	-4	8	0,043
120. Cereb8_r — 119. Cereb8_l	-3	4	-7	0,009
110. Cereb2_r — 109. Cereb2_l	-10	-3	-7	0,016
118. Cereb7_r — 117. Cereb7_l	-5	3	-8	0,018

Результаты в таблице 4.11 показывают, что наблюдается достаточно большое число областей коры больших полушарий мозга, имеющих латерализованную специализацию (и дифференциацию) по метрике ПС. Это *верхняя часть латеральной затылочной коры, лобная оперкулярная кора, верхняя лобная извилина, лобный полюс, внутренняя шпорная кора, средняя лобная извилина, задняя часть надкраевой извилины*. Направление специализации соответствует высказанным выше наблюдениям — правосторонние области

показывают большую специализацию в тесте ТСИ (старый опыт), а левосторонние, наоборот, связаны с новым опытом.

Структуры мозжечка также показали согласованную и сильную асимметрию в отношении актуализации старого и нового опыта. Они имеют противоположное направление различий по сравнению с корой больших полушарий, что объясняется отсутствием контрлатеральности у мозжечка.

Что касается сопоставления корковых и подкорковых структур, то, как уже было сказано выше, объединенная метрика — разница ПС между объединенными корковыми областями и подкорковыми структурами в различных комбинациях — при сравнении ТСИ и ТЗВ была вычислена, но не показала значимых различий (в таблице 4.11 не приводится).

#### **5.4.3.3. Сопоставление ТСИ и ТЗВ по временным рядам фМРТ-сигнала с усреднением по структурам мозга**

На рисунке 5.27 показаны фМРТ-сигналы, усредненные по структурам мозга (сопоставление названий см. в приложении А). Слева в каждой колонке данные ТСИ, справа — ТЗВ. Красным цветом обозначены активации, связанные с актуализацией значимой информации, синим цветом — менее значимой. Длительность эпохи анализа составляет 10 с от маркера предъявления стимула. Вертикальной пунктирной линией обозначена временная отметка 5 с от предъявления стимула. Заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ ). Масштабная отметка амплитуды на рисунке 5.27 (вертикальный штрих) пропорциональна для всех структур мозга. Горизонтальными пунктирными линиями на рисунке 5.27 обозначены средние значения АКО. Звездочками обозначены статистически значимые различия между тестами ТСИ и ТЗВ по критерию Вилкоксона на уровне  $p \leq 0,05$  (FDR), вычисленного на основе массива АКО по всем участникам эксперимента ( $n=46$  для каждого теста, общая выборка).

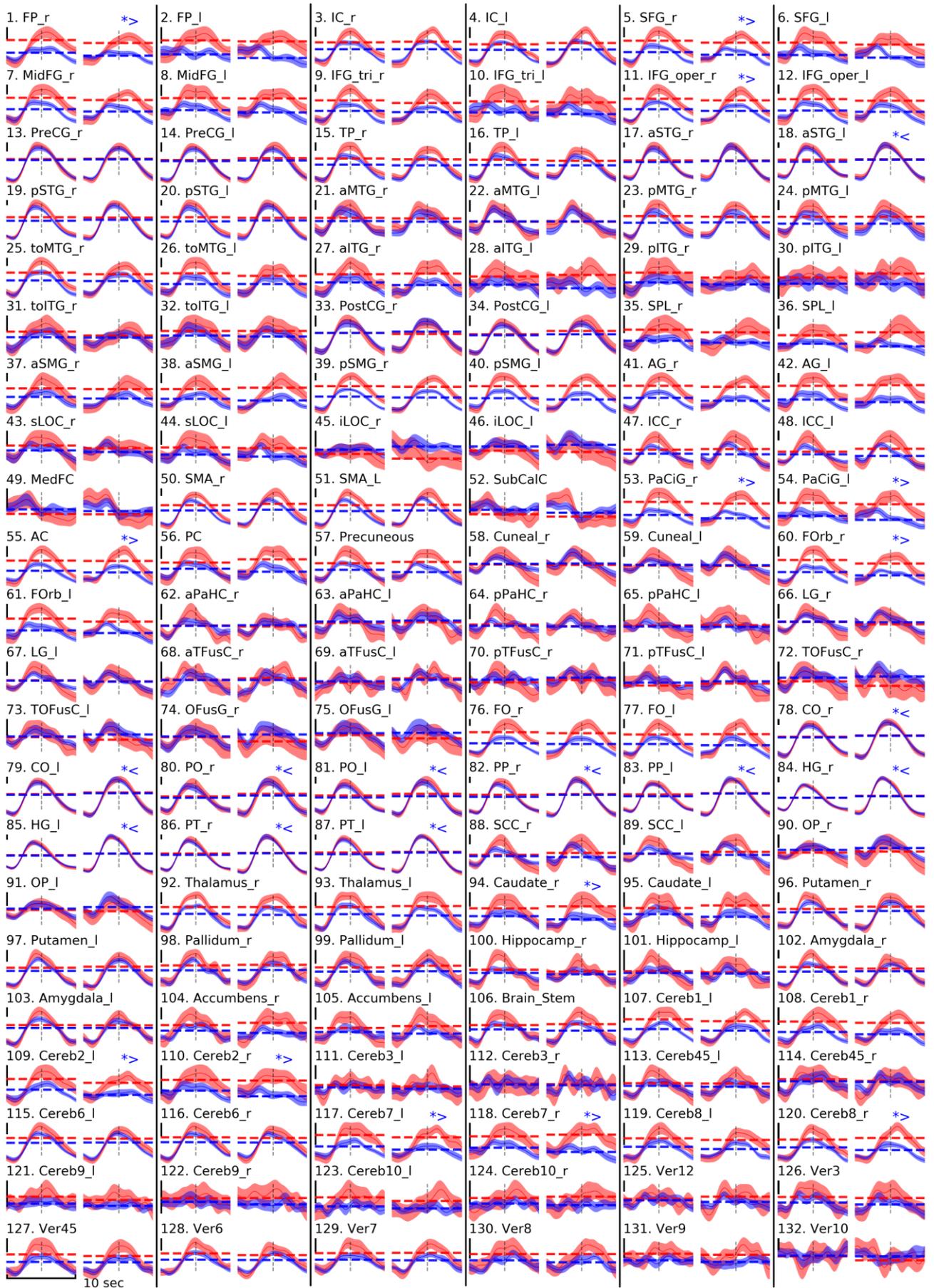


Рисунок 5.27 — Сопоставление ТСИ (в столбцах слева) и ТЗВ (справа) по временным рядам фМРТ-сигнала (описание см. в основном тексте)

Полученные результаты (рисунок 5.27) говорят о том, что имеется большое число структур мозга, показывающих статистически значимые различия активаций между тестами ТСИ и ТЗВ. Эти структуры графически показаны звездочками на рисунке 5.27 и таблично будут перечислены ниже.

Можно отметить, что различия обнаруживаются только для субъективно незначимых стимулов (как и в приведенном выше повоксельном анализе). Для субъективно значимых стимулов сигнал практически одинаков по амплитуде во всех структурах мозга (при сравнении ТСИ и ТЗВ), несмотря на существенно различающийся стимульный материал в ТСИ и ТЗВ. Такое совпадение амплитуд является интересным экспериментальным результатом. Можно вспомнить, что в предыдущих разделах не было выявлено различий между ТСИ и ТЗВ по сигналам КГР и ФПГ. Это значит, что для субъективно значимых стимулов активность мозга мало зависит от времени приобретения этой информации человеком по сравнению с фактором субъективной значимости. Возможно, это объясняется насыщением сигнала и выходом на плато или какими-либо другими причинами.

Что касается субъективно незначимых стимулов (или менее значимых, как было отмечено в главе 3), то для них в некоторых структурах мозга обнаруживаются различия активаций между ТСИ и ТЗВ (рисунок 5.27). Как уже было отмечено при повоксельном анализе, в первичных и вторичных слуховых областях активации больше в ТЗВ, а в некоторых ассоциативных областях коры и мозжечке — в ТСИ.

Для более детального анализа формы сигнала далее выполнена визуализация в более крупном масштабе с усреднением сигнала по группам структур мозга. На рисунке 5.28 показаны сигналы для информативных областей коры (см. раздел 4.4), вторичных слуховых областей и первичной слуховой коры (*извилины Гешля*).

По рисунку 5.28 можно заметить, что в информативных ассоциативных областях коры сигнал разделяется по фактору субъективной значимости, но практически совпадает по фактору времени приобретения материала памяти человеком (ТСИ-ТЗВ). В *извилине Гешля*, как уже было отмечено выше, напротив,

разделение происходит, вероятно, по акустическим свойствам сигнала (длительность, громкость и т.д.) в ТСИ и ТЗВ, но не по субъективной значимости.

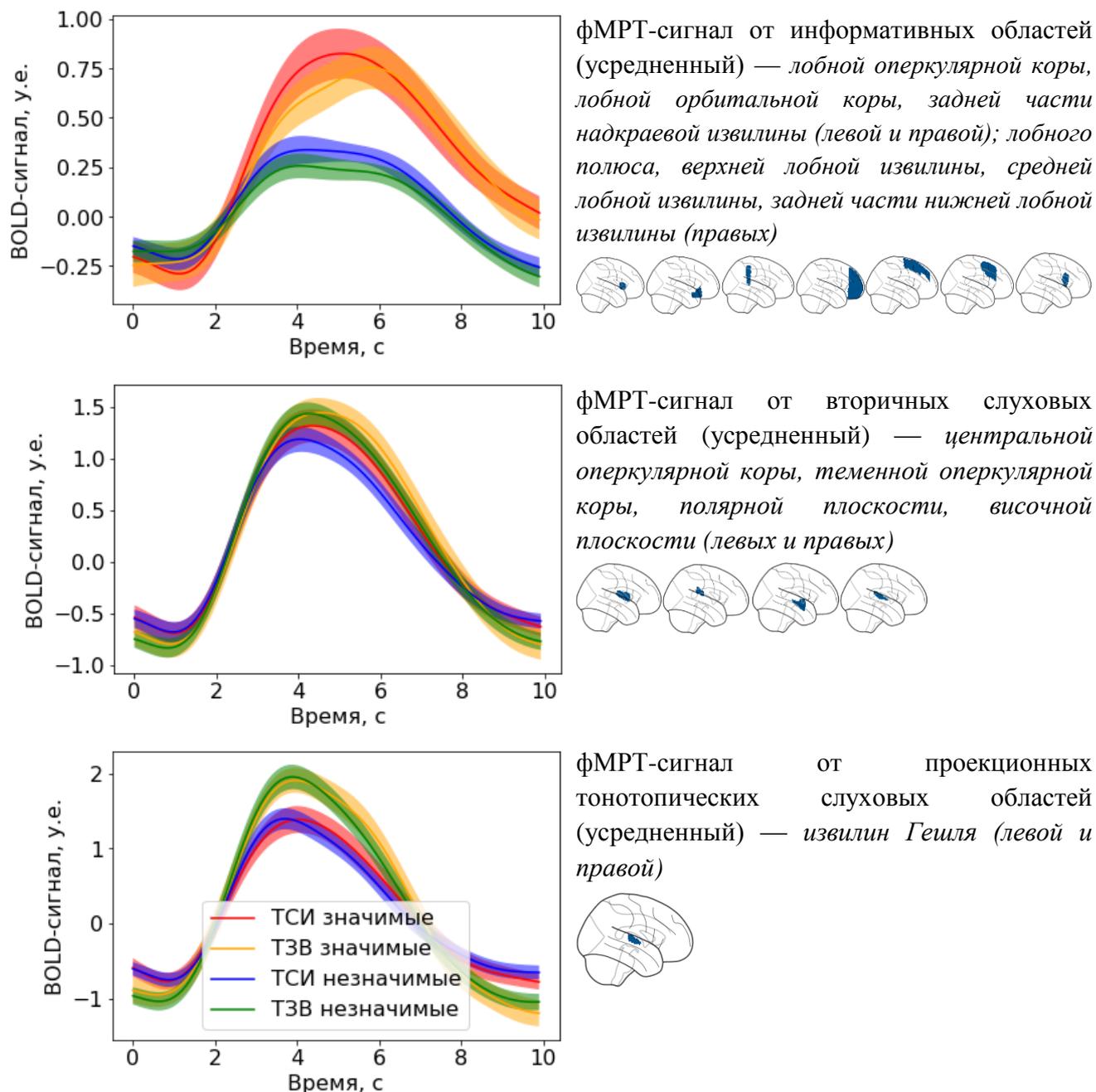


Рисунок 5.28 — фМРТ-сигналы, усредненные по группам областей коры больших полушарий мозга (сопоставление названий см. в приложении А),  $n=46$ , заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

Ранее было отмечено, что сигнал мозжечка с высокой точностью копирует сигнал информативных областей коры больших полушарий. На рисунке 5.29 показан объединенный сигнал от нескольких структур мозжечка. Можно заметить, что характерный скос для низколатентного компонента в ТЗВ (желтая

кривая) наблюдается и у областей коры, и у мозжечка. При этом у мозжечка наблюдаются небольшие различия между ТСИ и ТЗВ по незначимым стимулам.

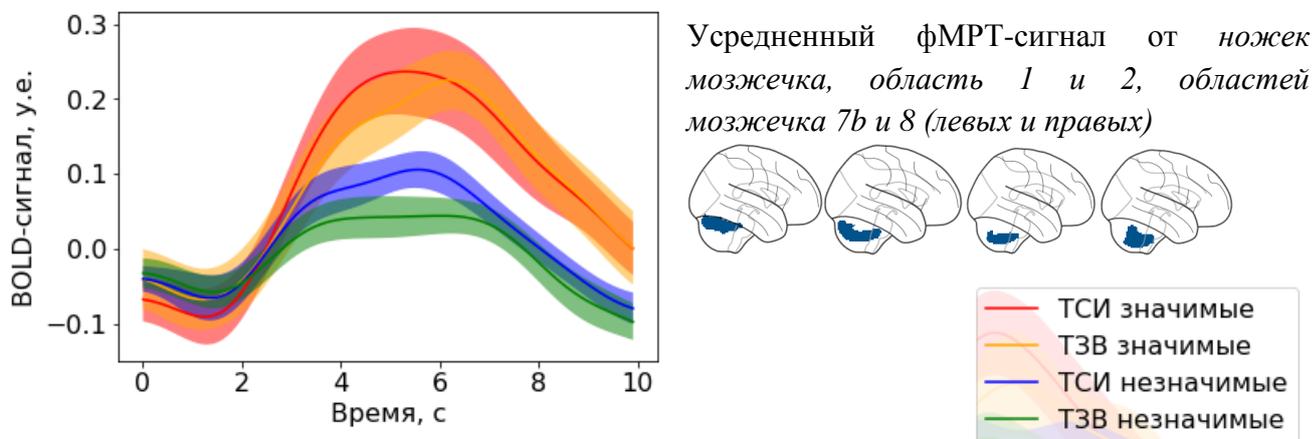


Рисунок 5.29 — фМРТ-сигналы, усредненные по группам структур мозжечка (сопоставление названий см. в приложении А),  $n=46$ , заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

На рисунке 5.30 ниже для сравнения показаны сигналы таламуса. Как уже было сказано ранее, они больше отличаются от сигнала коры, чем сигналы мозжечка. Сигналы таламуса имеют характерное смещение влево — и ранние, и поздние компоненты начинаются немного раньше, чем в других структурах мозга.

Активность амигдалы (рисунок 5.30) характеризуется высокоамплитудным ранним компонентом для субъективно значимых стимулов, а во второй половине эпохи сигнал быстро спадает и не различается ни по фактору значимости, ни по фактору времени приобретения информации. Различия сигнала по фактору субъективной значимости в амигдале не имеют такой выраженности, как у ранее рассмотренных структур. Это значит, что амигдала всегда включена в работу примерно в одинаковой степени.

Активность гиппокампа имеет сходство с активностью амигдалы в плане наличия высокоамплитудного раннего компонента. Амплитуда сигнала и дифференциация информации по значимости в гиппокампе не являются высокими. Как отмечалось ранее, это может быть обусловлено как техническими трудностями точной автоматической локализации гиппокампа в фМРТ-данных в силу его анатомических особенностей, так и сложностью сигнала гиппокампа.

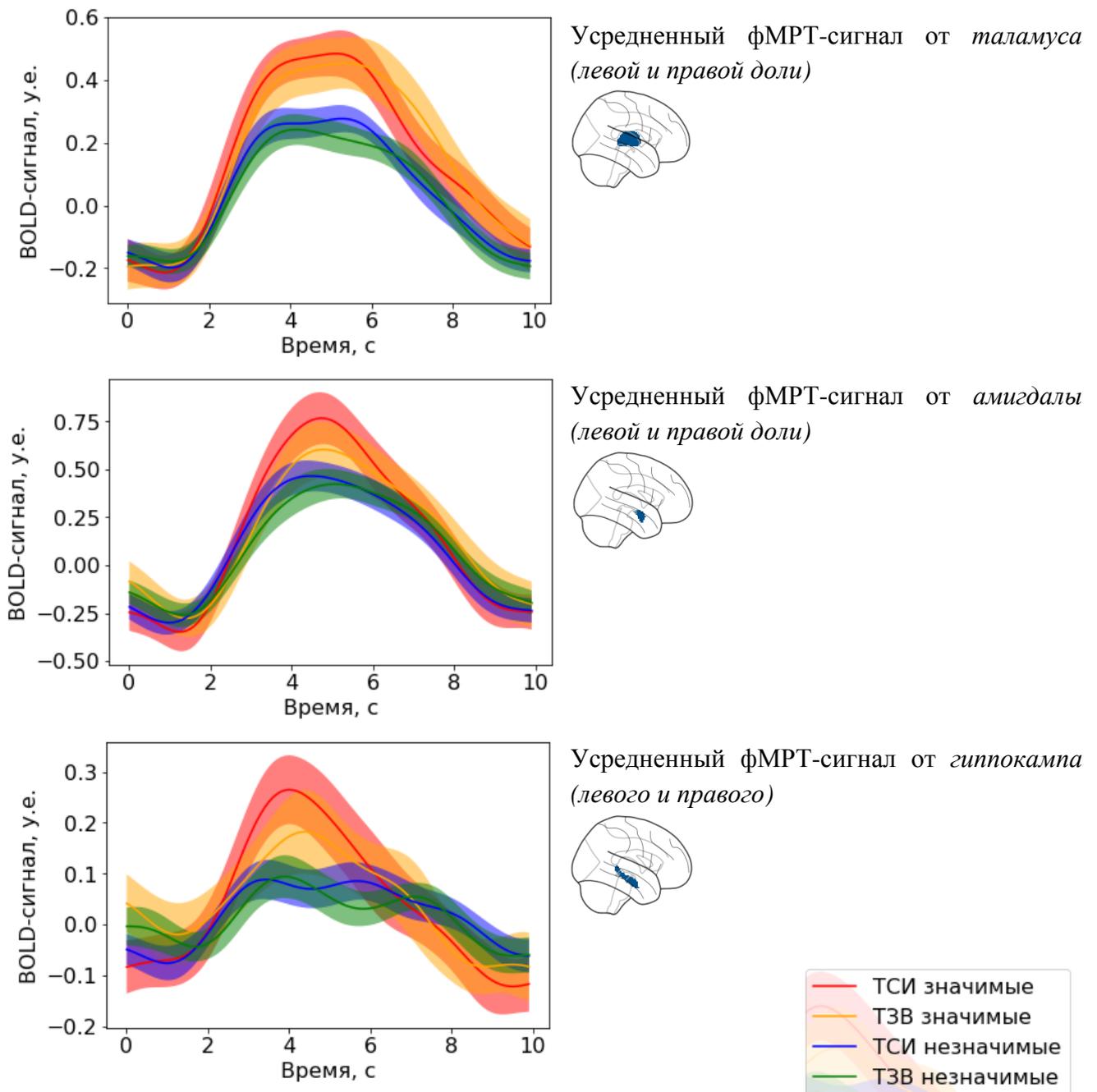


Рисунок 5.30 — фМРТ-сигналы, усредненные по группам подкорковых структур мозга (сопоставление названий см. в приложении А),  $n=46$ , заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ( $p \leq 0,05$ )

Для количественного сравнения амплитуд сигнала ТСИ и ТЗВ в различных структурах мозга были вычислены усредненные АКО по описанной выше методике. Результаты приведены в таблице 4.12 ниже. Данные отсортированы по  $p$ -значению и отобраны по уровню  $p \leq 0,05$  с поправкой FDR. В таблице 4.12 использован критерий Стьюдента для связанных выборок, а непараметрический критерий Вилкоксона приведен для контроля на рисунке 5.27 выше.

Таблица 4.12 — Сравнение ТСИ и ТЗВ по АКО, незначимые стимулы

Структура мозга	$M_A$ (ТСИ)	Направ- ле- ние	$M_B$ (ТЗВ)	$p$ -значе- ние, FDR	$p$ -значе- ние, некор- ректиро- ванное	$M_d$	$S_d$	$d_{\text{Козна}}$
41. AG_r	0,12	→	0,01	0,011	0,002	0,11	0,22	0,50
53. PaCiG_r	0,08		-0,02	<0,001	<0,001*	0,09	0,13	0,73
60. FOrb_r	0,10		0,01	<0,001	<0,001*	0,09	0,12	0,76
11. IFG_oper_r	0,24		0,16	0,020	0,003	0,08	0,17	0,46
7. MidFG_r	0,11		0,03	0,028	0,006	0,07	0,17	0,43
54. PaCiG_l	0,02		-0,06	<0,001	<0,001*	0,07	0,10	0,72
57. Precuneous	0,08		0,01	0,043	0,011	0,07	0,17	0,40
5. SFG_r	0,09		0,03	0,004	<0,001*	0,07	0,12	0,58
1. FP_r	0,07		0,01	0,010	0,002	0,06	0,12	0,50
109. Cereb2_l	0,04		-0,02	<0,001	<0,001*	0,06	0,07	0,79
94. Caudate_r	0,07		0,01	0,008	0,001	0,06	0,11	0,52
56. PC	0,05		0,00	0,041	0,009	0,06	0,14	0,41
6. SFG_l	0,01		-0,04	0,043	0,011	0,05	0,13	0,40
61. FOrb_l	0,04		0,00	0,041	0,009	0,04	0,10	0,41
110. Cereb2_r	0,01		-0,03	0,004	<0,001*	0,04	0,07	0,58
55. AC	0,11		0,07	0,027	0,005	0,04	0,09	0,44
118. Cereb7_r	0,01		-0,03	0,001	<0,001*	0,04	0,06	0,66
117. Cereb7_l	0,04		0,00	0,006	0,001	0,03	0,06	0,54
120. Cereb8_r	0,05		0,02	0,006	0,001	0,02	0,05	0,54
119. Cereb8_l	0,05		0,02	0,039	0,008	0,02	0,05	0,41
81. PO_l	0,27	←	0,35	0,010	0,002	-0,08	0,15	-0,50
19. pSTG_r	0,50		0,59	0,027	0,005	-0,08	0,19	-0,44
80. PO_r	0,21		0,30	0,020	0,004	-0,09	0,19	-0,46
20. pSTG_l	0,35		0,44	0,041	0,010	-0,09	0,21	-0,40
79. CO_l	0,39		0,49	0,004	<0,001	-0,10	0,17	-0,57
78. CO_r	0,51		0,63	0,027	0,005	-0,11	0,26	-0,44
84. HG_r	0,29		0,41	0,005	0,001	-0,12	0,21	-0,56
83. PP_l	0,25		0,36	<0,001	<0,001*	-0,12	0,14	-0,82
82. PP_r	0,36		0,49	0,002	<0,001*	-0,13	0,21	-0,61
18. aSTG_l	0,37		0,51	<0,001	<0,001*	-0,14	0,19	-0,70
86. PT_r	0,50		0,64	0,002	<0,001*	-0,14	0,23	-0,62
87. PT_l	0,45		0,61	<0,001	<0,001*	-0,15	0,17	-0,90
85. HG_l	0,34		0,52	<0,001	<0,001*	-0,18	0,21	-0,84

\* Обозначенные сравнения имеют  $p \leq (0,05/132)$  по Бонферрони.

Как уже отмечалось выше, различия между ТСИ и ТЗВ обнаруживаются только для субъективно незначимых стимулов. В первичных и вторичных слуховых областях коры активации больше в ТЗВ, а в некоторых ассоциативных областях коры и мозжечке — в ТСИ (см. направление различий в таблице 4.12). Из подкорковых структур выделяется только *правое хвостатое ядро*.

Таким образом, в некоторых структурах обнаруживаются различия между ТСИ и ТЗВ по субъективно незначимым стимулам. Можно ли сказать, что эти различия обусловлены временем приобретения материала памяти в онтогенезе? В данном случае это заключение не является единственным, так как альтернативным объяснением может быть то, что те стимулы, которые в работе имеют техническое название субъективно незначимых, являются лишь менее значимыми, чем целевые стимулы, а также вполне логично, что они могут иметь некоторые различия по значимости между ТСИ и ТЗВ. Как уже было выяснено ранее, различия стимулов по субъективной значимости имеют большой эффект в амплитуде физиологических сигналов, существенно превышающий эффект времени приобретения материала памяти, особенно если размер эффекта измеряется в исходных единицах — параметр  $M_d$  (см. таблицы 4.7 и 4.12). Эти небольшие различия субъективной значимости стимулов могут объяснить наблюдаемые различия между ТСИ и ТЗВ. Поэтому далее проведен более детальный анализ с балансировкой левосторонних и правосторонних структур.

Ранее в работе было выявлено, что перспективным в данном случае может быть анализ межполушарной асимметрии, связанной с гетерохронностью в развитии полушарий мозга (см. раздел 5.4.3.2). Обоснование заключается в том, что даже если нецелевые (обозначаемые как субъективно незначимые) стимулы несколько различаются в ТСИ и ТЗВ по субъективной значимости, то в случае отсутствия межполушарной асимметрии по времени формирования систем это различие должно симметрично проявляться в левом и правом полушарии и компенсироваться. Возможен аргумент, что межполушарная асимметрия имеется и в отношении субъективной значимости. Однако ранее при анализе эффектов субъективной значимости в разделе 5.4.1.4 было замечено, что асимметрия по

этому фактору слабо проявляется (тест ТЗВ), но становится существенной при предъявлении имени.

Чтобы проанализировать межполушарную асимметрию амплитудных эффектов в тестах ТСИ и ТЗВ, по возможности сбалансировав переменные, вычислялась разница между АКО для правосторонних и левосторонних структур по формуле

$$\Delta_{\text{ПЛ}} = (\text{АКО}_{\text{ЗНАЧ\_П}} - \text{АКО}_{\text{НЕЗНАЧ\_П}}) - (\text{АКО}_{\text{ЗНАЧ\_Л}} - \text{АКО}_{\text{НЕЗНАЧ\_Л}}) \quad (4)$$

где  $\text{АКО}_{\text{ЗНАЧ\_П}}$  — среднее значение АКО активаций, связанных со значимыми стимулами, в правосторонней структуре;

$\text{АКО}_{\text{НЕЗНАЧ\_П}}$  — среднее значение АКО активаций, связанных с незначимыми стимулами, в правосторонней структуре;

$\text{АКО}_{\text{ЗНАЧ\_Л}}$  — среднее значение АКО активаций, связанных со значимыми стимулами, в левосторонней структуре;

$\text{АКО}_{\text{НЕЗНАЧ\_Л}}$  — среднее значение АКО активаций, связанных с незначимыми стимулами, в левосторонней структуре.

Значение  $\Delta_{\text{ПЛ}}$  вычислялось отдельно для тестов ТСИ и ТЗВ, а также вычислялся размер эффекта по разнице между полученными для ТСИ и ТЗВ индексами (см. таблицу 4.13). Статистически значимые различия по указанному параметру обнаруживаются в областях коры, находящихся в задней части больших полушарий мозга — *внутренней шпорной коре, правой верхней теменной дольке, нижней части латеральной затылочной коры и постцентральной извилине*, а также в мозжечке (с ожидаемой контрлатеральной инверсией). Направление дифференциации соответствует высказанным выше наблюдениям — правосторонние области показывают большую дифференциацию в тесте ТСИ (старый опыт), а левосторонние, наоборот, связаны с новым опытом.

Если сравнить полученные результаты с аналогичным анализом по метрике ПС (таблица 4.11 выше), то можно заметить отсутствие фронтальных структур — *лобной оперкулярной коры, верхней лобной извилины, средней лобной извилины, лобного полюса*, показавших значимые различия ранее по метрике ПС. Это можно

объяснить тем, что метрика ПС лучше сбалансирована по сторонним факторам и оказывается более чувствительной. Ранее исследователями высказывались предположения о том, что многие мозговые процессы, связанные с различающимся поведением (включая мысленное), «скрыты» от регистрации с помощью простых методов анализа активности мозга по фМРТ-данным (Киреев, 2017). Более устойчивая к действию посторонних факторов метрика ПС позволяет лучше выявлять такие закономерности.

Таблица 4.13 — Сравнение ТСИ и ТЗВ по разнице амплитуд между правосторонними и левосторонними структурами мозга (сопоставление названий см. в приложении А)

Сопоставляемые структуры мозга (левосторонняя и правосторонняя)	Разница амплитуд между правосторонней и левосторонней структурой мозга, у.е.		Разница значений $\Delta_{ПЛ}$ между ТСИ и ТЗВ, у.е.	<i>p</i> -значение по <i>t</i> -критерию	$d_{\text{Козна}}$
	$\Delta_{ПЛ}$ , ТСИ	$\Delta_{ПЛ}$ , ТЗВ			
47. ICC_r — 48. ICC_l	0,04	-0,04	0,08	0,003	0,5
35. SPL_r — 36. SPL_l	-0,02	-0,13	0,11	0,012	0,4
45. iLOC_r — 46. iLOC_l	-0,01	-0,08	0,07	0,039	0,3
33. PostCG_r — 34. PostCG_l	-0,03	-0,13	0,11	0,043	0,3
120. Cereb8_r — 119. Cereb8_l	-0,01	0,03	-0,04	0,019	-0,4

В целом выводы согласуются между собой по наличию и направлению межполушарной асимметрии активности мозга, связанной со времени формирования актуализируемых систем. В коре больших полушарий более дифференцированно (т.е. по разделению актуализируемой информации по значимости) активируются правосторонние структуры при актуализации старой информации в тесте ТСИ, и левосторонние — при актуализации относительно недавно запомненной информации в тесте ТЗВ. В мозжечке полученные эффекты инвертированы в связи с отсутствием контрлатеральности (скрещенности)

проводящих путей) у мозжечка (из-за чего правое полушарие мозжечка связано преимущественно с левым полушарием неокортекса).

### 5.5. Заключение по пятой главе

В пятой главе были проанализированы сигналы КГР, ФПГ и фМРТ по следующей схеме: выявление закономерностей, связанных с субъективной значимостью актуализируемой информации; сопоставление мужской и женской выборки как элемент кроссвалидации; выявление закономерностей, связанных со временем приобретения актуализируемой информации. А также апробировано использование метрики ПС в качестве самостоятельного индикатора специализации структур мозга относительно какого-либо фактора. Апробировано использование АКО для визуализации фМРТ-данных.

Вначале было выполнено сравнение активаций по фактору субъективной значимости. С субъективной значимостью актуализируемой информации связано существенное повышение амплитуды активаций по сигналам КГР и ФПГ. Предъявление субъективно значимых стимулов связано с существенно большей амплитудой сигналов КГР и ФПГ, чем незначимых (менее значимых) стимулов. Различия являются статистически значимыми во всех исследованных подвыборках.

Анализ фМРТ-данных показал, что актуализация субъективно значимой информации связана с активностью практически всех структур мозга. При этом наблюдаются различия между структурами по форме и амплитуде гемодинамического ответа, а также по дифференциации их активности в соответствии с субъективной значимостью актуализируемой информации. В системе неокортекс — мозжечок — таламус особенно выделяются некоторые фронтальные области коры (*лобная оперкулярная кора, лобная орбитальная кора, нижняя лобная извилина* — левая и правая доли; *средняя лобная извилина, верхняя лобная извилина, лобный полюс, параингулярная кора* — преимущественно правые доли), некоторые области теменной коры (*задняя часть надкраевой извилины, угловая извилина*), а также височной коры (*задняя часть верхней*

*височной извилины, височно-затылочная часть средней височной извилины*). Активность некоторых структур *мозжечка* с высокой точностью копирует активность неокортекса, при этом сигнал *таламуса* несколько отличается по форме — в *таламусе* обнаруживается более раннее начало и завершение гемодинамического ответа (примерно на одну секунду), чем в других структурах мозга.

В затылочных областях коры форма сигнала более сложная. Сразу после предъявления стимулов начинается небольшое повышение фМРТ-сигнала (одинаковое для значимых и незначимых стимулов), а затем во второй половине десятисекундной эпохи наблюдается плавное снижение амплитуды сигнала ниже достимульного уровня, наложенное на обычную форму гемодинамического ответа. При этом с субъективно значимыми стимулами связано большее снижение. Природа этого явления точно не известна и требует отдельных исследований.

Далее с целью кроссвалидации были проанализированы мужская и женская подвыборки. В целом описанные выше выводы оказались верны и для мужчин и для женщин, что говорит о неслучайности выявленных закономерностей.

Статистическое сопоставление данных по мужской и женской выборкам показало, что у женской выборки все исследованные сигналы (КГР, ФПГ, фМРТ) существенно меньше по амплитуде, чем в мужской — как для значимых, так и для незначимых стимулов. При анализе фМРТ-данных статистически значимые различия были обнаружены в наиболее информативных областях коры (*лобной оперкулярной коре, лобной орбитальной коре, лобном полюсе*). При этом в первичных и вторичных слуховых областях коры сигнал был хотя и меньше, чем в мужской выборке, но различия были невелики. Это говорит о том, что процессы в первичных областях коры у мужчин и женщин в данном исследовании были примерно схожи, но отношение к ним женщин (то есть субъективная значимость информации для них) отличалось, что видно по существенно меньшей активности фронтальных областей коры. Активность амигдалы у женщин оказалась не меньше, чем у мужчин, и даже имеет тенденцию к более высоким значениям,

особенно в низколатентном компоненте. Это может говорить о том, что разные характеристики целостного поведения — субъективная значимость и эмоциональность — характеризуют разные аспекты общемозговой организации этого поведения.

По форме фМРТ-сигнал несколько различается между мужской и женской выборкой — во второй половине графика (после 5 с) у женщин сигнал быстрее начинает возвращаться к исходным значениям.

Разделение сигналов по фактору субъективной значимости актуализируемой информации в женской выборке оказалось хуже, чем в мужской, для всех видов сигналов (КГР, ФПГ, фМРТ). Для сигнала фМРТ различия по метрике ПС оказались статистически значимыми в височной коре (*задняя часть правой верхней височной извилины*), теменной коре (*задняя часть левой надкраевой извилины*), лобной коре (*правая лобная оперкулярная кора*), а также на стыке лобной, височной и теменной долей (*левая островковая кора*).

Дополнительно были проанализированы данные по более крупным единицам — объединению левосторонних и правосторонних частей наиболее информативных областей коры и объединению левосторонних и правосторонних частей подкорковых структур. Значимых различий между мужской и женской выборкой по этим данным обнаружено не было. Аналогичным образом была проанализирована разница между правосторонними и левосторонними структурами у мужской и женской выборки, а также разница между корой и подкорковыми структурами. Различия не достигают статистически значимого уровня.

Далее было выполнено сопоставление активаций в тестах ТСИ и ТЗВ, моделирующих актуализацию информации, различающейся по времени приобретения. Обнаружилось, что сигналы КГР и ФПГ в тестах ТСИ и ТЗВ статистически не отличаются по амплитуде, несмотря на существенные различия стимульного материала в этих тестах. Это значит, с одной стороны, что указанные сигналы малочувствительны к времени приобретения материала памяти; с другой стороны, показывает незначительность эффектов адаптации между тестами.

При анализе фМРТ-данных обнаружилась несколько большая амплитуда сигнала в ТСИ в ассоциативных областях коры (*угловой извилине, парацингулярной коре, задней цингулярной коре, лобной орбитальной коре, верхней, средней и нижней лобной извилине, лобном полюсе*), а также в мозжечке и хвостом ядра.

Различия в ассоциативных областях были обнаружены только для субъективно незначимых стимулов. Совпадение амплитуд для субъективно значимых стимулов по сигналу фМРТ (а также по сигналам КГР и ФПГ) в двух экспериментальных сессиях (ТСИ и ТЗВ) является интересным экспериментальным результатом.

В первичных и вторичных слуховых областях более сильный сигнал был в ТЗВ, что говорит о некоторых сенсорных различиях стимулов, но не приводящих к сонаправленным различиям в ассоциативных областях. Таким образом, в указанных выше ассоциативных областях коры и мозжечке более высокая активность наблюдалась при актуализации информации, приобретенной в более ранние периоды жизни (при актуализации более старого индивидуального опыта).

Была обнаружена межполушарная асимметрия специализаций структур мозга, по-разному выраженная при актуализации информации, различающейся по времени приобретения. В тесте ТЗВ (моделирует актуализацию онтогенетически новой информации) происходит большая дифференциация актуализируемой информации по субъективной значимости в структурах левого полушария мозга (и по амплитуде сигнала, и по метрике ПС), а также в контрлатеральном правом полушарии мозжечка. Это соответствует структуре проводящих путей мозжечка, которые либо не пересекаются, либо пересекаются дважды. И наоборот, актуализация онтогенетически старой информации (тест ТСИ) связана с более дифференцированной активацией правого полушария. Предложен вариант объяснения полученных наблюдений, заключающийся в том, что системогенез по принципу добавления новых систем может выражаться не только в изменении соотношения корковых и подкорковых структур, но также и в межполушарной асимметрии.

Статистически значимые различия в межполушарной асимметрии по метрике ПС наблюдаются в достаточно большом числе областей коры мозга — это *верхняя часть латеральной затылочной коры, лобная оперкулярная кора, верхняя лобная извилина, лобный полюс, внутренняя шпорная кора, средняя лобная извилина, задняя часть надкраевой извилины*. Структуры мозжечка также показали согласованную и сильную латерализацию в отношении актуализации старого и нового опыта. Они имеют ожидаемо противоположное направление различий по сравнению с корой больших полушарий, что объясняется отсутствием контрлатеральности у мозжечка.

Дополнительно было проанализировано соотношение специализации коры больших полушарий и подкорковых структур. Специализация коры в целом (по усреднению одновременно нескольких левосторонних и правосторонних областей коры) не показала различий между тестами. Статистических различий в подкорковых структурах между ТСИ и ТЗВ также не обнаружилось. Обобщающая метрика — разница ПС между объединенными корковыми областями и подкорковыми структурами в различных комбинациях — при сравнении ТСИ и ТЗВ также не показала значимых различий.

## Заключение

В работе выполнена разработка методического обеспечения и проведено эмпирическое исследование психофизиологических характеристик актуализации памяти человека, различающейся по субъективной значимости и времени приобретения. Полученные результаты имеют прикладное и фундаментальное значение. Детально результаты работы перечислены в заключительных разделах по главам.

Дальнейшее развитие полученных в работе результатов может быть выполнено по методическому направлению: разработка способов анализа комплексных данных на основе одновременной реализации индуктивного и дедуктивного вывода; разработка автоматизированных амплитудных способов анализа фМРТ-сигнала для прикладного применения. Неизвестными остаются причины выявленного разделения гемодинамического ответа в ассоциативных областях мозга на два компонента (с пиками примерно 3,3 с и 6,6 с от отметки предъявления стимула), а также причины подавления второго компонента гемодинамического ответа в окципитальных областях коры больших полушарий мозга.

Обобщенные **выводы** по работе следующие:

1. Сформулирован подход к сопоставлению психофизиологических методов и настройке параметров обработки данных в случае недостаточности информации о внутреннем устройстве источника сигнала и отсутствии эталонных средств измерения — например, в случае психофизиологических данных. В основе предложенного подхода лежит итерационное повторение комбинации прямой и обратной психофизиологической задачи с варьированием параметров и оценкой метрики качества решения обратной задачи, учитывая, что в общем

случае качество решения обратной задачи зависит от качества решения прямой задачи.

2. С помощью описанного подхода сопоставлены и выбраны наиболее эффективные методы и параметры обработки сигналов КГР, ФПГ и фМРТ для психофизиологических исследований.

3. Разработан амплитудный способ анализа фМРТ-сигналов в психофизиологических задачах, не привязанный к форме гемодинамического ответа. Установлено, что этот способ более устойчив к изменению размера выборки по сравнению с картированием на основе  $t$ -значений, имеет сопоставимую или большую информативность в отношении субъективной значимости актуализируемой информации, при этом обладая преимуществом в простоте реализации по сравнению с классическим способом анализа на основе GLM.

4. Установлено, что в различных структурах головного мозга форма фМРТ-сигнала существенно различается по амплитуде и форме, что повышает актуальность методов анализа, не привязанных к стандартному гемодинамическому ответу. В ассоциативных областях коры больших полушарий мозга были выделены низколатентные и высоколатентные компоненты сигнала с пиком около 3,3 с и 6,6 с соответственно. Обнаружено, что информативные временные интервалы для разных структур мозга отличаются — оптимум для таламуса смещен в сторону более раннего ответа примерно на 1 с.

5. Установлено, что актуализация субъективно значимой информации связана с существенно большей амплитудой активаций по сигналам КГР и ФПГ, чем актуализация незначимой (менее значимой) информации. Анализ фМРТ-данных показал, что актуализация субъективно значимой информации связана с активностью практически всех структур мозга. При этом наблюдаются различия между структурами по форме и амплитуде гемодинамического ответа, а также по дифференциации их активности в соответствии с субъективной значимостью актуализируемой информации. По информативности в отношении субъективной значимости выделяются области фронтальной, теменной и височной коры.

6. Сопоставление данных по мужской и женской выборкам показало, что у женской выборки все исследованные сигналы (КГР, ФПГ, фМРТ) существенно меньше по амплитуде и менее дифференцированы по субъективной значимости, чем в мужской. Статистически значимые различия обнаружены в лобной, височной и теменной коре, а также на их стыке. При этом активность амигдалы у женщин оказалась примерно на том же уровне, что у мужчин (статистически не различалась).

7. Обнаружено, что при актуализации материала памяти, различающегося по времени приобретения, сигналы КГР и ФПГ статистически не отличаются по амплитуде, несмотря на существенные различия стимульного материала. По фМРТ-данным при актуализации онтогенетически старой информации показана несколько большая амплитуда сигнала в ассоциативных областях коры, мозжечке и хвостатом ядре. При этом размер эффекта существенно меньше, чем в случае различий актуализируемой информации по субъективной значимости (т.е. эффект субъективной значимости может маскировать более слабые эффекты).

8. Была обнаружена межполушарная асимметрия специализаций структур мозга, по-разному выраженная при актуализации информации, различающейся по времени приобретения. При актуализации онтогенетически новой информации происходит большая дифференциация информации по субъективной значимости структурами левого полушария мозга (по амплитуде сигнала и по метрике ПС), а также контрлатеральным правым полушарием мозжечка. И наоборот, актуализация онтогенетически старой информации связана с более дифференцированной активацией правого полушария. Предложен вариант объяснения полученных наблюдений, заключающийся в том, что системогенез по принципу добавления новых систем может выражаться не только в изменении соотношения активности корковых и подкорковых структур, но также и в межполушарной асимметрии.

## Список литературы

1. Александров И.О., Максимова Н.Е., Горкин А.Г., Шевченко Д.Г., Тихомирова И.В., Филиппова Е.В., Никитин Ю.Б. Комплексное исследование структуры индивидуального знания // Психологический журнал. — 1999. — Т. 20, № 1. — С. 49-69.
2. Александров И.О. Формирование структуры индивидуального знания. — М.: Институт психологии РАН, 2006. — 560 с.
3. Александров С.Г. Функциональная асимметрия и межполушарные взаимодействия головного мозга: учебное пособие для студентов. — Иркутск: ИГМУ, 2014. — 62 с.
4. Александров Ю.И., Александров И.О. Сравнительный анализ влияния закрывания глаз на активность нейронов моторной и зрительной областей коры // Мозг и психическая деятельность. — М.: Наука, 1984. — С. 164-175.
5. Александров Ю.И., Гринченко Ю.В. Активность нейронов соматосенсорной и зрительной областей коры при тестировании их рецептивных полей и во время реализации пицедобывательного поведения // Нейрофизиология. — 1984. — Т. 16, № 2. — С. 254-262.
6. Александров Ю.И. Психофизиологическое значение активности центральных и периферических нейронов в поведении. — М.: Наука, 1989. — 206 с.
7. Александров Ю.И. Сознание и эмоции // Теория деятельности и социальная практика. 3-й международный конгресс. — М.: Физкультура, образование, наука, 1995. — С. 5-6.
8. Александров Ю.И., Греченко Т.Н., Гаврилов В.В. и др. Закономерности формирования и реализации индивидуального опыта // Журнал высшей нервной деятельности. — 1997а. — Т. 47, № 2. — С. 243-260.
9. Александров Ю.И., Самс М., Лавикайнен Ю., Рейникайнен К., Наатанен Р. Зависимость свойств связанных с событиями потенциалов от возраста

- элементов субъективного опыта, актуализируемых при категоризации слов родного и иностранного языка // Психологический журнал. — 1997б. — Т. 18, № 1. — С. 133-145.
10. Александров Ю.И., Брушлинский А.В., Судаков К.В., Умрюхин Е.А. Системные аспекты психической деятельности. — М.: Эдиториал УРСС, 1999. — 272 с.
  11. Александров Ю.И. Введение в системную психофизиологию // Психология XXI века / Под ред. В.Н. Дружинина. — М: Пэр Сэ, 2003. — С. 39-85.
  12. Александров Ю.И., Шевченко Д.Г. Научная школа «Системная психофизиология» // Психологический журнал. — 2004. — Т.25, № 6. — С. 93-100.
  13. Александров Ю.И. Научение и память: традиционный и системный подходы // Журнал высшей нервной деятельности имени И.П. Павлова. — 2005. — Т. 55, № 6. — С. 842-860.
  14. Александров Ю.И. От эмоций к сознанию // Психология творчества. Школа Я.А. Пономарева / Под ред. Д.В. Ушакова. — М.: Институт психологии РАН, 2006. — С. 293-328.
  15. Александров Ю.И., Александрова Н.Л. Субъективный опыт, культура и социальные представления. — М.: Институт психологии РАН, 2009 — 320 с.
  16. Александров Ю.И. Закономерности актуализации индивидуального опыта и реорганизации его системной структуры: комплексное исследование // Труды Института системного анализа РАН. — 2011. — Т. 61, № 3. — С. 3-25.
  17. Александров Ю.И., Горкин А.Г., Созинов А.А., Сварник О.Е., Кузина Е.А., Гаврилов В.В. Консолидация и реконсолидация памяти: психофизиологический анализ // Вопросы психологии. — 2015. — № 3. — С. 133-144.
  18. Александров Ю.И. Регрессия // 7-я международная конференция по когнитивной науке: Тезисы докладов / Отв. ред. Ю.И. Александров, К.В. Анохин. — М.: Институт психологии РАН, 2016. — С. 100-101.

19. Александров Ю.И., Сварник О.Е., Знаменская И.И., Колбенева М.Г., Арутюнова К.Р., Крылов А.К., Булава А.И. Регрессия как этап развития. — М.: Институт психологии РАН, 2017. — 191 с.
20. Александров Ю.И. Швырков Вячеслав Борисович: Формирование новой парадигмы в психологии и смежных науках // Выдающиеся ученые Института психологии РАН: Биографические очерки / Под ред. А.Л. Журавлева. — М.: Институт психологии РАН, 2020. — С. 218-255.
21. Александров Ю.И., Носуленко В.Н., Савицкая Т.Ю. Вербальная оценка эмоциональных и нейтральных изображений // Вопросы психологии. — 2020. — № 6. — С. 117-130.
22. Анохин П.К. Проблема центра и периферии в физиологии нервной деятельности. — Горький, 1935. — 492 с.
23. Анохин П.К. Системный анализ интегративной деятельности нейрона // Успехи физиологических наук. — 1974. — Т. 5, № 5.— С. 5-92.
24. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем. — М.: Медицина, 1975. — 448 с.
25. Анохин П.К. Избранные труды. Философские аспекты теории функциональной системы. — М.: Наука, 1978. — 400 с.
26. Бианки В.Л. Асимметрия мозга животных. — Л., 1985. — 295 с.
27. Бодунов М.В., Безденежных Б.Н., Александров Ю.И. Изменения шкальных оценок тестовых психодиагностических методик при воздействии алкоголя // Психологический журнал. — 1997. — Т. 18, № 5. — С. 97-101.
28. Бреслав Г.М. Психология эмоций. — М.: Смысл; Академия, 2004. — 544 с.
29. Букзайн В. Использование электрической активности кожи в качестве индикатора эмоций // Иностранная психология. — 1994. — Т. 2, № 2(4). — С. 57-66.
30. Бурлачук Л.Ф. Психодиагностика: Учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2006. — 351 с.

31. Вежбицкая А. Семантические универсалии и описание языков / Пер. с англ. А.Д. Шмелева под ред. Т.В. Булыгиной. — М.: Языки русской культуры, 1999. — 780 с.
32. Величковский Б.М. Когнитивная наука: Основы психологии познания: в 2 т. — М.: Смысл; Академия, 2006.
33. Выготский Л.С. Мышление и речь. — СПб.: Питер, 2019. — 432 с.
34. Гибсон Дж. Экологический подход к зрительному восприятию / Пер. с англ. Т.М. Сокольской / Общ. ред. и вступ. ст. А.Д. Логвиненко. — М.: Прогресс, 1988. — 460 с.
35. Горкин А.Г. Специализация нейронов в обучении: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата психологических наук: специальность 19.00.02 «психофизиология» / Горкин Александр Георгиевич. — М.: Институт психологии РАН, 1988. — 180 с.
36. Горкин А.Г., Шевченко Д.Г. Стабильность поведенческой специализации нейронов // Журнал высшей нервной деятельности. — 1990. — Т. 40, № 2. — С. 291-300.
37. Горкин А.Г. Параметры оптимальной фильтрации сигнала при тетродной регистрации нейрональной активности // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. — 2011. — Т. 61, № 5. — С. 534-544.
38. Горкин А.Г. Фиксация индивидуального опыта поведения в нейронной активности: диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук: специальность 03.03.06 «нейробиология» / Горкин Александр Георгиевич. — М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021. — 349 с.
39. Горкин А.Г. Фиксация опыта поведения в нейрональной активности: монография. — М.: Русайн, 2023. — 223 с.
40. Горошко Е.И. Функциональная асимметрия мозга, язык, пол: Аналитический обзор. — М.; Харьков: Институт языкознания РАН; ИНЖЭК, 2005. — 285 с.
41. Греченко Т.Н. Нейрофизиологические механизмы памяти / Академия наук СССР, Институт психологии. — М.: Наука, 1979. — 168 с.

42. Греченко Т.Н., Лебедев А.Н. Психофизиология памяти // Основы психофизиологии / Под ред. Ю.И. Александрова. — М., 1997. — С. 112-142.
43. Греченко Т.Н., Лебедев А.Н., Созинов А.А. Психофизиология памяти (разделы 6.1-6.5) // Психофизиология / Под ред. Ю.И. Александрова. — СПб.: Питер, 2023. — С. 117-139.
44. Данилова Н.Н. Психофизиология: Учебник для вузов. — М.: Аспект Пресс, 2004. — 368 с.
45. Дарвин Ч.Р. Происхождение видов путём естественного отбора, или сохранение благоприятных рас в борьбе за жизнь / Ч.Р. Дарвин; пер. с англ. К.А. Тимирязева, М.А. Мензбира, А.П. Павлова, И.А. Петровского. — М.: АСТ, 2019. — 592 с.
46. Доброхотова Т.А., Брагина Н.Н. Методологическое значение принципа симметрии в изучении функциональной организации человека / Функциональная межполушарная асимметрия. Хрестоматия. — М: Научный мир, 2004. — С. 10-54.
47. Дорохов В.Б. Сомнология и безопасность профессиональной деятельности // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. — 2013. — Т. 63, № 1. — С. 33-47.
48. Дорохов В.Б., Ковальзон В.М., Шевченко Д.Г. Сон и сновидения // Психофизиология / Под ред. Ю.И. Александрова. — СПб.: Питер, 2023. — С. 267-289.
49. Захарова Н.В., Ковальчук М.В., Костюк Г.П., Бравве Л.В., Кайдан М.А., Карташов С.И., Малахов Д.Г., Холодный Ю.И. Возможности прикладного использования полиграфа для изучения негативной симптоматики больных параноидной шизофренией // Психическое здоровье. — 2019. — Т. 12. — С. 50-60.
50. Зинченко В.П., Мамардашвили М.К. Проблема объективного метода в психологии // Вопросы философии. — 1977. — №7. — С. 109-125.
51. Знаков В.В. Половые различия в понимании неправды, лжи и обмана // Психологический журнал. — 1997. — Т. 18, № 1. — С. 38-49.

52. Иванов Р.С. Значимость стимула в ситуации психофизиологического исследования с применением полиграфа // Вестник психофизиологии. — 2019. — № 2. — С. 19-30.
53. Ивин Е.А., Курбацкий А.Н., Артамонов Д.В. Учебно-методическое пособие по математической статистике: для социально-экономических специальностей. — Вологда: ИСЭРТ РАН, 2017. — 141 с.
54. Измайлов Ч.А., Зимачев М.М., Соколов Е.Н., Черноризов А.М. Двухканальная модель ахроматического зрения лягушки // Сенсорные системы. — 2006. — Т. 20, № 1. — С. 21-31.
55. Исайчев Е.С., Исайчев С.А. Методологические аспекты инструментальной «детекции лжи» // Мир психологии. — 2016. — Т. 4, № 88. — С. 202-214.
56. Калафати А.Ю. Исследование длины линии ФПГ и дыхания для различных диапазонов оценки // Детекция лжи. — 2021. — Т. 4. — С. 33-40.
57. Киреев М.В. Системная организация работы мозга при обеспечении целенаправленного поведения: диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук: специальность 03.03.01 «физиология» / Максим Владимирович Киреев. — СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет, 2017. — 304 с.
58. Ковальчук М.В., Нарайкин О.С., Яцишина Е.Б. Конвергенция наук и технологий — новый этап научно-технического развития // Вопросы философии. — 2013. — № 3. — С. 3-11.
59. Колбенева М.Г., Александров Ю.И. Органы чувств, эмоции и прилагательные русского языка: Лингво-психологический словарь / Институт психологии РАН. — М.: Языки славянских культур, 2010. — 368 с.
60. Колбенева М.Г. Психофизиологические закономерности инициируемой словами актуализации индивидуального опыта разной дифференцированности: диссертация на соискание ученой степени кандидата психологических наук: специальность 19.00.02 «психофизиология» (психологические науки) / Марина Геннадьевна Колбенева. — М.: Институт психологии РАН, 2013. — 185 с.

61. Колосовский Е.А. Устройства приема и обработки сигналов. — М.: Горячая линия – Телеком, 2007. — 456 с.
62. Корнеев А.А., Захарова М.Н., Курганский А.В., Ломакин Д.И., Мачинская Р.И. Прогностическое значение электроэнцефалографических и нейропсихологических показателей состояния регуляторных функций мозга для оценки вероятности отклонений поведения у подростков // Экспериментальная психология. — 2021. — Т. 14, № 1. — С. 135–150.
63. Костандов Э.А. Функциональная асимметрия полушарий мозга и неосознаваемое восприятие. — М.: Наука, 1983. — 171 с.
64. Кошелев А.Д. В поисках универсальной схемы развития // Теории развития. Дифференционно-интеграционная парадигма. — М.: Языки славянских культур, 2009. — С. 57-77.
65. Кротков Е.А., Носова Т.В. Диагностическое познание // Эпистемология и философия науки. — 2006. — Т. 10, № 4. — С. 36-52.
66. Кротков Е.А., Носова Т.В. Диагностика // Энциклопедия эпистемологии и философии науки. — М.: Канон+; РООИ Реабилитация, 2009. — С. 179-181.
67. Кузина Е.А., Александров Ю.И. Особенности нейронного обеспечения инструментального поведения, сформированного одно- и многоэтапным способами // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. — 2019. — Т. 69, № 5. — С. 601-617.
68. Леонова А. Б. Психодиагностика функциональных состояний человека. — М.: Изд-во Московского университета, 1984. — 200 с.
69. Лешли К.С. Мозг и интеллект. — М.; Л., 1933. — 222 с.
70. Лурия А.Р. Язык и сознание / Под ред. Е.Д. Хомской. — М.: Изд-во Московского университета, 1979. — 320 с.
71. Лурия А.Р. Диагностика следов аффекта // Психология эмоций. Тексты. — М.: Московский государственный университет, 1984. — С. 228-234.
72. Максимова Н.Е., Александров И.О., Тихомирова И.В., Филиппова Е.В., Никитин Ю.Б. Соотношение грамматики и семантики высказываний со структурой индивидуального знания (к проблеме рационального-

- интуитивного) // Психологический журнал. — 1998. — Т. 19, № 3. — С. 63-83.
73. Малахов Д.Г., Орлов В.А., Карташов С.И., Скитева Л.И., Ковальчук М.В., Александров Ю.И., Холодный Ю.И. Оптимизация параметров обработки сигналов в психофизиологических исследованиях на примере КГР и ФПГ // Экспериментальная психология. — 2023. — Т. 16, № 1. — С. 62-68.
74. Малахов Д.Г. Сопоставление статистического параметрического и амплитудного подходов к картированию фМРТ-данных при помощи объективного критерия // Вестник психофизиологии. — 2024. — № 1. — С. 48-56.
75. Маркс К., Энгельс Ф. Сочинения. — Изд. 2. — М.: Государственное издательство политической литературы, 1961. — 827 с.
76. Марченко О.П., Безденежных Б.Н. Категоризация слов как способ изучения межсистемных отношений // Психологический журнал. — 2008. — Т. 29, № 3. — С. 77-85.
77. Марютина Т.М., Ермолаев О.Ю. Введение в психофизиологию. — 2-е издание, исправленное и дополненное — М.: Московский психолого-социальный институт; Флинта, 2001. — 400 с.
78. Матурана У. Биология познания // Язык и интеллект. Сб. Пер. с англ. и нем. / Сост. и вступ. ст. В.В. Петрова. — М.: Издательская группа «Прогресс», 1996. — С. 95-141.
79. Мещеряков Б.Г., Зинченко В.П. Большой психологический словарь / Ред. Б.Г. Мещеряков, В.П. Зинченко. — 3-е издание, дополненное и переработанное. — СПб.: Прайм-Еврознак, 2006. — 672 с.
80. Николенко С.И., Кадуриин А.А., Архангельская Е.О. Глубокое обучение. — СПб.: Питер, 2019. — 480 с.
81. Носуленко В.Н. Вопросы интеграции качественных и количественных методов в психологическом исследовании // Экспериментальная психология. — 2021. — Т. 14, № 3. — С. 4-16.

82. Орлов В.А. Построение модели когнитивного пространства человека по данным функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ): диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук: специальности 03.01.02, 03.01.08 / Орлов Вячеслав Андреевич. — М., 2021. — 121 с.
83. Орлов В.А., Карташов С.И., Малахов Д.Г., Ковальчук М.В., Александров Ю.И., Холодный Ю.И. Исследования в парадигме сокрытия информации: оценка фМРТ-данных на групповом уровне // Экспериментальная психология. — 2024. — Т. 17, № 1. — С. 86-107.
84. Павлов И.П. Избранные произведения. — М.: АН СССР, 1949. — 638 с.
85. Патент RU 2756566 С1. Российская Федерация, МПК А61В 5/0205 (2006.01). Система одновременного контроля и оценки динамики физиологических процессов в условиях проведения функциональной магнитно-резонансной томографии человека: № 2021105235: заявл. 02.03.2021: опубл. 01.10.2021 / Малахов Д.Г., Холодный Ю.И. — 19 с.
86. Пушина Е.В., Жарикова Е.И., Вараксин А.А. Нейрогенез у взрослых позвоночных животных: вопросы адаптации, эволюции и функциональной специализации // Тихоокеанский медицинский журнал. — 2016. — № 2. — С. 55-61.
87. Ребеко Т.А. Ментальная репрезентация как формат хранения информации // Ментальная репрезентация: динамика и структура. — М.: Институт психологии РАН, 1998. — С. 25-54.
88. Ротенберг В. Межполушарная асимметрия, ее функция и онтогенез // Руководство по функциональной межполушарной асимметрии. — М.: Научный мир, 2009. — С. 164-184.
89. Роуз С. Устройство памяти: от молекул к сознанию. — М.: Мир, 1995. — 384 с.
90. Рубинштейн С.Л. Основы общей психологии. — СПб.: Питер, 2002. — 720 с.

91. Русалова М.Н. Функциональная асимметрия мозга: эмоции и активация // Функциональная межполушарная асимметрия. Хрестоматия. — М: Научный мир, 2004. — С. 465-514.
92. Савицкая Т.Ю., Носуленко В.Н., Александров Ю.И. Динамика сердечного ритма у индивидов при оценке и описании ими эмоционально окрашенных изображений // Экспериментальная психология. — 2020. — Т. 13, № 1. — С. 5-19.
93. Сварник О.Е. Формирование индивидуального опыта и его нейрогенетическое обеспечение: экспрессия гена c-fos: диссертация на соискание ученой степени кандидата психологических наук: специальность 19.00.02 «психофизиология» / Ольга Евгеньевна Сварник. — М.: Институт психологии РАН, 2003. — 107 с.
94. Сварник О.Е., Фадеева Т.А., Александров Ю.И. Психофизиологические особенности процессов научения при поэтапном приобретении навыка // Материалы IV Всероссийского съезда РПО. — М.: Ростов н/Д.: Кредо, 2007. — Т. 3. — С. 149.
95. Сварник О.Е., Булава А.И., Фадеева Т.А., Александров Ю.И. Закономерности реорганизации опыта, приобретенного при одно- и многоэтапном обучении // Экспериментальная психология. — 2011. — Т. 4, № 2. — С. 5-13.
96. Сварник О.Е. Активность мозга: Специализация нейрона и дифференциация опыта. — М.: Институт психологии РАН, 2016. — 190 с.
97. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2021618804. Программа для получения численных нормированных показателей сигналов полиграфа: заявка № 2021617841: заявл. 24.05.2021: опубл. 01.06.2021 / Холодный Ю.И., Малахов Д.Г., Скитева Л.И. — 1 с.
98. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022662059. Программа для кластерного анализа полиграмм: заявка № 2022660845: заявл. 15.06.2022: опубл. 29.06.2022 / Лисицин И.С., Малахов Д.Г., Орлов В.А., Скитева Л.И. — 1 с.

99. Сергиенко Е.А. Когнитивная репрезентация в раннем онтогенезе человека // Ментальная репрезентация: динамика и структура. — М.: Институт психологии РАН, 1998. — С. 135-162.
100. Сергиенко Е.А., Дозорцева А.В. Функциональная асимметрия полушарий мозга // Функциональная межполушарная асимметрия. Хрестоматия. — М.: Научный мир, 2004. — С. 331-379.
101. Сергиенко Е.А. Раннее когнитивное развитие: Новый взгляд. — М.: Институт психологии РАН, 2006. — 464 с.
102. Сеченов И.М. Элементы мысли. — М.: Книжный Клуб Книговек, 2011. — 416 с.
103. Симонов П.В. Эмоциональный мозг. — М.: Книжный Клуб Книговек, СПб.: Северо-Запад, 2021. — 288 с.
104. Симонов П.В. Мотивированный мозг. — М.: Наука, 1987. — 270 с.
105. Симонов П.В. Функциональная асимметрия эмоций // Функциональная межполушарная асимметрия. Хрестоматия. — М.: Научный мир, 2004. — С. 457-464.
106. Созинов А.А., Александров Ю.И. Стабильность и динамика памяти. — М.: Институт психологии РАН, 2022. — 274 с.
107. Соколов Е.Н. Нейроны сознания. Психология // Журнал Высшей школы экономики. — 2004. — Т. 1, № 2. — С. 3-15.
108. Судаков К.В. Системогенез поведенческого акта // Механизмы деятельности мозга. — М.: Госнаучтехиздат, 1979. — С. 88-89.
109. Учаев А.В., Александров Ю.И. Обусловленные стрессом особенности актуализации субъективного опыта в процессе сокрытия информации // Российский психологический журнал. — 2022а. — Т. 19, № 1. — С. 158-172.
110. Учаев А.В., Александров Ю.И. Системный анализ заданного экспериментатором и “свободного” поведения продуцирования лжи // Психологический журнал. — 2022б. — Т. 43, № 6. — С. 43-50.

111. Фресс П., Пиаже Ж. Экспериментальная психология. Выпуск 5. Мотивация, эмоции и личность / Ред.-сост. П. Фресс, Ж. Пиаже. — М.: Прогресс, 1975. — 282 с.
112. Холодный Ю.И. Применение полиграфа при профилактике, раскрытии и расследовании преступлений: Монография. — М.: Мир безопасности, 2000. — 157 с.
113. Холодный Ю.И. Некоторые малоизвестные страницы истории становления применения полиграфа в России // Вестник Академии Следственного комитета РФ. — 2015. — № 4. — С. 174-183.
114. Холодный Ю.И. Использование полиграфа для получения криминалистически значимой информации // Криминалистика: учебник для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки «Юриспруденция» / под ред. А.И. Бастрыкина, А.Ф. Волынского, С.В. Дубровина. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: ЮНИТИ-ДАНА: Закон и право, 2020. — 779 с.
115. Холодный Ю.И. Некоторые теоретические аспекты технологии исследований с применением полиграфа (статья вторая) // Расследование преступлений: проблемы и пути их решений. — 2021. — № 2. — С. 147-152.
116. Холодный Ю.И., Малахов Д.Г., Орлов В.А., Карташов С.И., Александров Ю.И., Ковальчук М.В. Изучение нейрокогнитивных процессов в парадигме сокрытия информации // Экспериментальная психология. — 2021. — Т. 14, № 3. — С. 17-39.
117. Холодный Ю.И. Криминалистическая психофизиология: эволюция и текущее состояние // Психофизиология / Под ред. Ю.И. Александрова. — СПб.: Питер, 2023. — С. 479-508.
118. Хомская Е.Д., Батова Н.Я. Мозг и эмоции: нейропсихологическое исследование. — М.: Российское педагогическое агентство, 1998. — 268 с.
119. Чуприкова Н.И. Психология умственного развития: принцип дифференциации. — М.: Столетие, 1997. — 480 с.

120. Шапиро Д.И. Человек и виртуальный мир. Когнитивные, креативные и прикладные проблемы. — М.: Эдиториал УРСС, 2000. — 224 с.
121. Швырков В.Б. Нейрональные механизмы обучения как формирование функциональной системы поведенческого акта // Механизмы системной деятельности мозга. — Горький, 1978. — С. 147.
122. Швырков В.Б., Вогник С. Изучение структуры пищедобывательного поведения кролика // Системные механизмы мотивации / Материалы VI семинара «Развитие общей теории функциональных систем». — Суздаль: Минздрав СССР, 1982. — С. 31-34.
123. Швырков В.Б. Психофизиология поведения и эмоции // Материалы международной Советско-Американской Павловской конференции, посвященной П.К. Анохину «Эмоции и поведение: системный подход». — М., 1984. — С. 317-319.
124. Швырков В.Б. Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики. — М.: Институт психологии РАН, 1995. — 162 с.
125. Швырков В.Б. Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики. Избранные труды / Под ред. Ю.И. Александрова. — М.: Институт психологии РАН, 2006. — 592 с.
126. Швыркова Н.А., Швырков В.Б. Активность нейронов зрительной коры при пищевом и оборонительном поведении // Нейрофизиология. — 1975. — Т. 7, № 1. — С. 727-736.
127. Юнг К.Г. Критика психоанализа. — СПб.: Академический проект, 2000. — 304 с.
128. Abraham A., Pedregosa F., Eickenberg M., Gervais P., Mueller A., Kossaifi J., Gramfort A., Thirion B., Varoquaux G. Machine learning for neuroimaging with scikit-learn // *Frontiers in Neuroinformatics*. — 2014. — V. 8. — P. 1-10.
129. Alexandrov L.I., Alexandrov Yu.I. Changes of auditory-evoked potentials in response to behaviorally meaningful tones induced by acute ethanol intake in altricial nestlings at the stage of formation of natural behavior // *Alcohol*. — 1993. — V. 10. — P. 213-217.

130. Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Laukka S., Järvillehto T., Maz V.N., Svetlaev I.A. Acute effect of ethanol on the pattern of behavioral specialization of neurons in the limbic cortex of the freely moving rabbit // *Acta Physiologica Scandinavica*. — 1990a. — V. 140. — P. 257-268.
131. Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Jarvillehto T. Change in the pattern of behavioral specialization of neurons in the motor cortex of the rabbit following lesion of the visual cortex// *Acta Physiologica Scandinavica*. — 1990b. — V. 139. — P. 371-385.
132. Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Laukka S., Järvillehto T., Maz V.N., Korpusova A.V. Effect of ethanol on hippocampal neurons depends on their behavioral specialization // *Acta Physiologica Scandinavica*. — 1993. — V. 149. — P. 429-435.
133. Alexandrov Yu.I., Sams M., Lavikainen J., Naatanen R., Reinikainen K. Differential effects of alcohol on the cortical processing of foreign and native language // *International Journal of Psychophysiology*. — 1998. — V. 28. — P. 1-10.
134. Alexandrov Yu.I. Comparative description of consciousness and emotion in the framework of systemic understanding of behavioral continuum and individual development // *Neuronal bases and psychological aspects of consciousness / C. Teddei-Ferretti, C. Musio (editors)*. — Singapore; New Jersey; London; Hong Kong: World Scientific, 1999. — P. 220-235.
135. Alexandrov Yu.I., Grechenko T.N., Gavrilov V.V., Gorkin A.G., Shevchenko D.G., Grinchenko Yu.V., Aleksandrov I.O., Maksimova N.E., Bezdenezhnykh B.N., Bodunov M.V. Formation and realization of individual experience: a psychophysiological approach // *Miller R., Ivanitsky A.M., Balaban P.V. (editors). Conceptual advances in brain research. Vol. 2. Conceptual advances in Russian neuroscience: Complex brain functions*. — Amsterdam: Harwood Academic Publishers, 2000. — P. 181-200.
136. Alexandrov Yu.I. On the way towards neuroculturology: From the neuronal specializations through the structure of subjective world to the structure of culture

- and back again // Proceeding of the International symposium “Perils and Prospects of the New Brain Sciences”. — Stockholm, 2001. — P. 36-38.
137. Alexandrov Yu.I., Grinchenko Yu.V., Shevchenko D.G., Averkin R.G., Matz V.N., Laukka S., Korpusova A.V. A subset of cingulate cortical neurons is specifically activated during alcohol-acquisition behavior // *Acta Physiologica Scandinavica*. — 2001. — V. 171. — P. 87–97.
138. Alexandrov Yu.I., Sams M.E. Emotion and consciousness: Ends of a continuum // *Cognitive brain research*. — 2005. — V. 25. — P. 387-405.
139. Alexandrov Yu.I., Klucharev V., Sams M. Effect of emotional context in auditory-cortex processing // *International Journal of Psychophysiology*. — 2007. — V. 65. — P. 261-271.
140. Alexandrov Yu.I. How we fragment the world: the view from inside versus the view from outside // *Social Science Information*. — 2008. — V. 47 (3). — P. 419-457.
141. Alexandrov Yu., Feldman B., Svarnik O., Znamenskaya I., Kolbeneva M., Arutyunova K., Krylov A., Bulava A. Regression II. Development through regression // *Journal of Analytical Psychology*. — 2020a. — V. 65 (3). — P. 476-496.
142. Alexandrov Yu., Feldman B., Svarnik O., Znamenskaya I., Kolbeneva M., Arutyunova K., Krylov A., Bulava A. Regression I. Experimental approaches to regression // *Journal of Analytical Psychology*. — 2020b. — V. 65 (2). — P. 345-365.
143. Alexopoulos Th., Ric F. The evaluation-behavior link: Direct and beyond valence // *Journal of Experimental Social Psychology*. — 2007. — V. 43. — P. 1010-1016.
144. Åstrand K., Hämäläinen H., Aleksandrov Y. I., Järvilehto T. Response characteristics of peripheral mechanoreceptive units in man: relation to the sensation magnitude and to the subject's task // *Electroencephalography and clinical neurophysiology*. — 1986. — V. 64 (5). — P. 438-446.

145. Bach D.R., Flandin G., Friston K.J., Dolan R.J. Time-series analysis for rapid event-related skin conductance responses // *Journal of Neuroscience Methods*. — 2009. — V. 184. — P. 224-234.
146. Bach D.R., Flandin G., Friston K.J., Dolan R.J. Modelling event-related skin conductance responses // *International Journal of Psychophysiology*. — 2010. — V. 75. — P. 349-356.
147. Bach D.R., Friston K.J., Dolan R.J. An improved algorithm for model-based analysis of evoked skin conductance responses // *Biological Psychology*. — 2013. — V. 94. — P. 490-497.
148. Bach D.R. A head-to-head comparison of SCRalyze and Ledalab, two model-based methods for skin conductance analysis // *Biological Psychology*. — 2014. — V. 103. — P. 63-68.
149. Balaban P.M., Roshchin M., Timoshenko A.K., Gainutdinov K.L., Bogodvid T.K., Muranova L.N., Zuzina A.B., Korshunova T.A. Nitric oxide is necessary for labilization of a consolidated context memory during reconsolidation in terrestrial snails // *European Journal of Neuroscience*. — 2014. — V. 40. — P. 2963-2970.
150. Barsalou L.W., Simmons W.K., Barbey A.K., Wilson C.D. Grounding conceptual knowledge in modality specific systems // *Trends in cognitive sciences*. — 2003. — V. 7 (2). — P. 84-91.
151. Baumeister R.F., Bratslavsky E., Finkenauer C., Vohs K.D. Bad is stronger than good // *Review of general psychology*. — 2001. — V. 5 (4). — P. 323-370.
152. Bayley P.J., Hopkins R.O., Squire L.R. The fate of old memories after medial temporal lobe damage // *Journal of Neuroscience*. — 2006. — V. 26. — P. 13311-13317.
153. Bell B.G., Grubin D. Functional Magnetic Resonance Imaging may promote theoretical understanding of the Polygraph Test // *The Journal of Forensic Psychiatry & Psychology*. — 2010. — V. 21 (1). — P. 52-65.
154. Benjamini Y., Hochberg Y. Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. — 1995. — V. 57 (1). — P. 289-300.

155. Bensafi M., Rouby C., Farget V., Bertrand B., Vigouroux M., Holley A. Autonomic nervous system responses to odours: the role of pleasantness and arousal // *Chemical Senses*. — 2002. — V. 27 (8). — P. 703–709.
156. Berntson G.G., Boysen S.T., Cacioppo J.H. Neurobehavioral organisation and the cardinal principle of evaluative bivalence // *Annals of The N.Y. Academy of Sciences*. — 1993. — V. 702. — P. 75-102.
157. Bontempi B., Laurent-Demir C., Destrade C., Jaffard R. Time-dependent reorganization of brain circuitry underlying long-term memory storage // *Nature*. — 1999. — V. 400. — P. 671-675.
158. Brecht M., Schneider M., Manns I.D. Silent neurons in Sensorimotor Cortices: Implication for Cortical Plasticity // *Neural plasticity in adult somatic sensorymotor systems* / Ebner F.F. (editor). — Boca Raton: Taylor & Francis Group, LLC, 2005. — P. 1-19.
159. Brenowitz E.A., Lent K.L., Miller K.E., Perkel D.J. Adult neurogenesis is necessary for functional regeneration of a forebrain neural circuit // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. — 2024. — V. 121 (28). — P. e2400596121.
160. Bressler D., Spotswood N., Whitney D. Negative BOLD fMRI response in the visual cortex carries precise stimulus-specific information // *PLoS One*. — 2007. — V. 2 (5). — P. 1-10.
161. Brosch M., Selezneva E., Scheich H. Nonauditory events of a behavioral procedure activate auditory cortex of highly trained monkeys // *Journal of Neuroscience*. — 2005. — V. 25 (29). — P. 6797-6806.
162. Bublitz J.C. My Mind Is Mine!? Cognitive Liberty as a Legal Concept // *Cognitive Enhancement. Trends in Augmentation of Human Performance*, vol. 1 / Hildt E., Franke A. (editors). — Dordrecht; Heidelberg; N.Y.; London: Springer, 2013. — P. 233-264.
163. Camos V. Domain-specific versus domain-general maintenance in working memory: reconciliation within the time-based resource sharing model // *Psychology of Learning and Motivation*. — 2017. — V. 67. — P. 135-171.

164. Canli T., Desmond J.E., Zhao Z., Glover G., Gabrieli J.D. Hemispheric asymmetry for emotional stimuli detected with fMRI // *Neuroreport*. — 1998. — V. 9 (14). — P. 3233-3239.
165. Caramazza A., Shelton J.R. Domain specific knowledge systems in the brain: the animate-inanimate distinction // *Journal of Cognitive Neuroscience*. — 1998. — V. 10. — P. 1-34.
166. Carleton A., Petreanu L.T., Lansford L., Lledo P-M. Becoming a new neuron in the adult olfactory bulb // *Nature Neuroscience*. — 2003. — V. 6. — P. 507-518.
167. Chen G., Taylor P.A., Cox R.W. Is the statistic value all we should care about in neuroimaging? // *NeuroImage*. — 2017. — V. 147. — P. 952-959.
168. Chernigovskaya T.V., Arshavsky V.V. Olfactory and visual processing and verbalization // *Speaking of colors and odors*. Eds. M. Plumacher, P. Holz. Amsterdam, Philadelphia: John Benjamins Publishing Company. — 2003. — P. 227-238.
169. Chestek C.A., Batista A.P., Santhanam G., Yu B.M., Afshar A., Cunningham J.P., Gilja V., Ryu S.I., Churchland M.M., Shenoy K.V. Single-neuron stability during repeated reaching in macaque premotor cortex // *The Journal of Neuroscience*. — 2007. — V. 27. — P. 10742-10750.
170. Chumbley J.R., Friston K.J. False discovery rate revisited: FDR and topological inference using Gaussian random fields // *NeuroImage*. — 2009. — V. 44 (1). — P. 62-70.
171. Clark R.A., Nikolova N., McGeown W.J., Macdonald M. Eigenvector alignment: Assessing functional network changes in amnesic mild cognitive impairment and Alzheimer's disease // *PLoS One*. — 2020. — V. 15 (8). — P. 1-22.
172. Cohen J. Some statistical issues in psychological research // B.B. Wolman (editor). *Handbook of clinical psychology*. — N.Y.: McGraw-Hill, 1965. — P. 95-191.
173. Cohen J. Things I have learned (so far) // *American Psychologist*. — 1990. — V. 45 (12). — P. 1304-1312.
174. Cohen J. *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. 2-nd edition. — Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, 1998. — 567 p.

175. Davatzikos C., Ruparel K., Fan Y., Shen D.G., Acharyya M., Loughhead J.W., Gur R.C., Langleben D.D. Classifying spatial patterns of brain activity with machine learning methods: application to lie detection // *Neuroimage*. — 2005. — V. 28. — P. 663-668.
176. Davidson R.J., Ekman P., Friesen W.V., Saron C.D., Senulis J.A. Approach-withdrawal and cerebral asymmetry: emotional expression and brain physiology // *Journal of Personality and Social Psychology*. — 1990. — V. 58. — P. 330-341.
177. Dawson M.E., Schell A.M., Filion D.L. The electrodermal system // J.T. Cacioppo, L.G. Tassinary, G.G. Berntson (editors). *Handbook of psychophysiology*. — Cambridge University Press, 2007. — P. 159-181.
178. Desikan R.S., Ségonne F., Fischl B., Quinn B.T., Dickerson B.C., Blacker D., Buckner R.L., Dale A.M., Maguire R.P., Hyman B.T., Albert M.S., Killiany R.J. An automated labeling system for subdividing the human cerebral cortex on MRI scans into gyral based regions of interest // *Neuroimage*. — 2006. — V. 31 (3). — P. 968-80.
179. Diesendruck G., Gelman S.A. Domain differences in absolute judgments of category membership: Evidence for an essentialist account of categorization // *Psychonomic Bulletin and Review*. — 1999. — V. 6. — P. 338-346.
180. Douville K., Woodard J.L., Seidenberg M., et al. Medial temporal lobe activity for recognition of recent and remote famous names: an event-related fMRI study // *Neuropsychologia*. — 2005. — V. 43 (5) — P. 693-703.
181. Edelman G.M. *Neural Darwinism: The theory of neural group selection*. — N. Y.: Basic Books, 1987 — 371 p.
182. Eilola T.M., Havelka J. Behavioral and physiological responses to the emotional and taboo Stroop tasks in native and non-native speakers of English // *International journal of bilingualism*. — 2011. — V. 15 (3). — P. 353-369.
183. Eklund A., Nichols T.E., Knutsson H. Cluster failure: Why fMRI inferences for spatial extent have inflated false-positive rates // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. — 2016. — V. 113 (28). — P. 7900-7905.

184. Eklund A., Knutsson H., Nichols T.E. Cluster failure revisited: Impact of first level design and physiological noise on cluster false positive rates // *Human Brain Mapping*. — 2019. — V. 40 (7). — P. 2017-2032.
185. Elaad E., Ben-Shakhar G. Finger pulse waveform length in the detection of concealed information // *International Journal of Psychophysiology*. — 2006. — V. 61. — P. 226-234.
186. Erk S., Martin S., Walter H. Emotional context during encoding of neutral items modulates brain activation not only during encoding but also during recognition // *NeuroImage*. — 2005. — V. 26. — P. 829-838.
187. Estes Z., Verges M. Freeze or flee? Negative stimuli elicit selective responding // *Cognition*. — 2008. — V. 108 (2). — P. 557-565.
188. Farah M.J., Hutchinson J.B, Phelps E.A., Wagner A.D. Functional MRI-based lie detection: Scientific and societal challenges // *Nature Reviews. Neuroscience*. — 2014. — V. 15 (2). — P. 123-131.
189. Farrow T.F.D., Johnson N.K., Hunter M.D., Barker A.T., Wilkinson I.D. Woodruff P.W.R. Neural correlates of the behavioral-autonomic interaction response to potentially threatening stimuli // *Frontiers in human neuroscience*. — 2013. — V. 6. — P. 1-17.
190. Finn E.S., Shen X., Scheinost D., Rosenberg M.D., Huang J., Chun M.M., Papademetris X., Constable R.T. Functional connectome fingerprinting: identifying individuals using patterns of brain connectivity // *Nature Neuroscience*. — 2015. — V. 18 (11). — P. 1664-1671.
191. Frankland P.W., Bontempi B., Talton L.E., Kaczmarek L., Silva A.J. The involvement of the anterior cingulate cortex in remote contextual fear memory // *Science*. — 2004. — V. 304 — P. 881-883.
192. Fraser G.W., Schwartz A.B. Recording from the same neurons chronically in motor cortex // *Journal of Neurophysiology*. — 2012. — V. 107. — P. 1970-1978.
193. Frazier J.A., Chiu S., Breeze J.L., Makris N., Lange N., Kennedy D.N., Herbert M. R., Bent E.K., Koneru V.K., Dieterich M.E., Hodge S.M., Rauch S.L., Grant P.E., Cohen B.M., Seidman L.J., Caviness V.S., Biederman J. Structural brain magnetic

- resonance imaging of limbic and thalamic volumes in pediatric bipolar disorder // *The American Journal of Psychiatry*. — 2005. — V. 162 (7). — P. 1256-1265.
194. Friedman A. Memorial comparisons without the “mind’s eye” // *Journal of verbal learning and verbal behaviour*. — 1978. — V. 17. — P. 427-444.
195. Galese V., Lakoff G. The brain’s concepts: The role of the sensory-motor conceptual knowledge // *Cognitive Neuropsychology*. — 2005. — V. 22 (3/4). — P. 455-479.
196. Ganis G., Kosslyn S.M., Stose S., Thompson W.L., Yurgelun-Todd D.A. Neural correlates of different types of deception: An fMRI investigation // *Cerebral Cortex*. — 2003. — V. 13 (8). — P. 830.
197. Gavrilov V.V., Grinchenko Yu.V., Alexandrov Yu.I. 334 Behaviorally specialized limbic cortex neurons in rats and rabbits: Comparative study // *International Journal of Psychophysiology*. — 1998. — V. 30 (1-2). — P. 130.
198. Goldstein J.M., Seidman L.J., Makris N., Ahern T., O'Brien L.M., Caviness V.S. Jr., Kennedy D.N., Faraone S.V., Tsuang M.T. Hypothalamic abnormalities in schizophrenia: sex effects and genetic vulnerability // *Biological Psychiatry*. — 2007. — V. 61 (8). — P. 935-945.
199. Gordon N.J., Mohamed F.B., Platek S., Ahmad H., Williams J.M., Faro S. The effectiveness of fMRI data when combined with polygraph data // *European polygraph*. — 2018. — V. 12 (1). — P. 19-25.
200. Gottlieb G. Ontogenesis of sensory function in birds and mammals // E. Tobach, L.A. Aronson, E. Shaw (editors). *The biopsychology of development*. — New York, London: Academic Press, 1971. — P. 67-128.
201. Greenberg P.A., Wilson F.A. Functional stability of dorsolateral prefrontal neurons // *Journal of Neurophysiology*. — 2004. — V. 92. — P. 1042-1055.
202. Griffanti L., Gwenaëlle D., et al. Hand classification of fMRI ICA noise components // *Neuroimage*. — 2017. V. 154. — P. 188-205.
203. Gur R.C., Alsop D., Glahn D., Petty R., Swanson C.L., Maldjian J.A., Turetsky B.I., Detre J.A., Gee J., Gur R.E. An fMRI study of sex differences in regional

- activation to a verbal and a spatial task // *Brain and Language*. — 2000. — V. 74(2). — P. 157-170.
204. Harris C.L., Ayçiçeği A., Gleason J.B. Taboo words and reprimands elicit greater autonomic reactivity in a first language than in a second language // *Applied psycholinguistics*. — 2003. — V. 24. — P. 561–579.
205. Hauk O., Johnsrude I., Pulvermüller F. Somatotopic representation of action words in human motor and premotor cortex // *Neuron*. — 2004. — V. 41. — P. 301-307.
206. Hebb D.O. *The organization of behavior: A neuropsychological theory*. — N.Y.: John Wiley and Sons, Inc, 1949. — 335 p.
207. Hedges L. Distribution Theory for Glass's Estimator of Effect Size and Related Estimators // *Journal of Educational Statistics*. — 1981. — V. 6 (2). — P. 107-108.
208. Hedges L. V., Olkin I. *Statistical methods for meta-analysis*. — San Diego: Academic Press, 1985. — 369 p.
209. Hussain G., Akram R., Anwar H., Sajid F., Iman T., Han H.S., Raza C., De Aguilar J.G. Adult neurogenesis: a real hope or a delusion? // *Neural regeneration research*. — 2024. — V. 19 (1). — P. 6-15.
210. Izmalkova A., Barmin A., Velichkovsky B.B., Prutko G., Chistyakov I. Cognitive resources in working memory: domain-specific or general? // *Behavioral Sciences*. — 2022. — V. 12 (11). — P. 1-10.
211. Jackson A., Mavoori J., Fetz E.E. Correlations between the same motor cortex cells and arm muscles during a trained task, free behavior, and natural sleep in the macaque monkey // *Journal of Neurophysiology*. — 2007. — V. 97. — P. 360-374.
212. Jeannerod M., Decety J., *Mental motor imagery: a window into the representational stages of action* // *Current opinion in neurobiology*. — 1995. — V. 5. — P. 727-732.
213. Ienca M., Andorno R. Towards new human rights in the age of neuroscience and neurotechnology // *Life Sciences, Society and Policy*. — 2017. — V. 13. — P. 1-27.

214. Kaiser A., Haller S., Schmitz S., Nitsch C. On sex/gender related similarities and differences in fMRI language research // *Brain Research Reviews*. — 2009. — V. 61 (2) — P. 49-59.
215. Kalafati A., Krapohl D.J. The difference between the manual and automatic settings for the electrodermal channel and a potential effect on manual scoring // *Polygraph & Forensic Credibility Assessment: A Journal of Science and Field Practice*. — 2018. — V. 47 (1). — P. 37-44.
216. Kaplan A.Y., Shishkin S.L., Zhigalov A.Yu, Ganin I.P., Basyul I.A. On the way to symbiotyc brain-computer interface // *Proceedings of the II International Symposium: Topical Problems of Biophotonics*. — Nizhny Novgorod, 2009. — P. 19-24.
217. Kempermann G., Kuhn G.H., Gage F.H. Experience-induced neurogenesis in the senescent dentate gyrus // *Journal of Neuroscience*. — 1998. — V. 18. — P. 3206-3212.
218. Kendrick K.M., Baldwin B.A. The effects of sodium appetite on the responses of cells in the zona incerta to the sight or ingestion of food, salt and water in sheep // *Brain research*. — 1989. — V. 492 (1-2). — P. 211-218.
219. Kensinger E.A. Remembering the details: effects of emotion // *Emotion Review*. — 2009. — V. 1 (2). — P. 99-113.
220. Khalfa S., Peretz I., Blondin J.-P., Manon R. Event-related skin conductance responses to musical emotions in humans // *Neuroscience letters*. — 2002. — V. 328. — P. 145-149.
221. Khayutin S.N., Dmitrieva L.P., Alexandrov L.I. Maturation of the early species-specific behavior. The role of environmental factors // *Physiology and General Biology Reviews*. — 1997. — V. 12. — P. 1-45.
222. Kholodny Y.I., Kartashov S.I., **Malakhov D.G.**, Orlov V.A. Improvement of the technology of fMRI experiments in the concealed information paradigm // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2021a. — V. 1310. — P. 591-597.

223. Kholodny Y.I., Kartashov S.I., **Malakhov D.G.**, Orlov V.A. Study of neurocognitive mechanisms in the concealed information paradigm // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2021б. — V. 1310. — P. 149-155.
224. Kolbeneva M.G. Modalities-related words: speed of pleasantness assessment // Третья международная конференция по когнитивным наукам: Сборник тезисов: В 2 т. Т. 1. — М.: Художественно-издательский центр, 2008. — С. 89-91.
225. Kolbeneva M.G., Alexandrov Yu.I. Mental reactivation and pleasantness judgment of experience related to vision, hearing, skin sensations, taste and olfaction // *PLoS One*. — 2016. — V. 11 (7). — P. 1-37.
226. Kosslyn S.M. Mental images and the brain. // *Cognitive neuropsychology*. — 2005. — V. 22 (3/4). — P. 333-347.
227. Kovalchuk M.V., Kholodny Y.I. Functional magnetic resonance imaging augmented with polygraph: new capabilities // *Advances in Intelligent Systems and Computing*.— 2020. V. 948. — P. 260-265.
228. Lang P.J., Greenwald M.K., Bradley M.M., Hamm A.O. Looking at pictures: affective, facial, visceral, and behavioral reactions // *Psychophysiology*. — 1993. — V. 30. — P. 261–273.
229. Langleben D.D., Schroeder L., Maldjian J.A., Gur R.C., McDonald S., Ragland J.D., O'Brien C.P., Childress A.R. Brain activity during simulated deception: An event related functional magnetic resonance study // *NeuroImage*. — 2002. — V. 15. — P. 727-732.
230. Langleben D.D., Loughead J.W., Bilker W.B., Ruparel K., Childress A.R., Busch S.I., Gur R.C. Telling truth from lie in individual subjects with fast event-related fMRI // *Human Brain Mapping*. — 2005. — V. 26. — P. 262-272.
231. Larkman D.J., Hajnal J.V., Herlihy A.H., Coutts G.A., Young I.R., Ehnholm G. Use of multicoil arrays for separation of signal from multiple slices simultaneously excited // *Journal of Magnetic Resonance Imaging*. — 2001. — V. 13 (2). — P. 313-317.

232. Lee S.A. Domain Specificity // *Encyclopedia of Animal Cognition and Behavior* / J. Vonk, T. Shackelford (editors). — Cham: Springer, 2018.
233. Lee T.M., Liu H., Tan L., Chan C.C., Mahankali S., Feng C.M., Hou J., Fox P.T., Gao J.H. Lie Detection by Functional Magnetic Resonance Imaging // *Human Brain Mapping*. — 2002. — V. 15. — P. 157-164.
234. Levenson R.W., Ekman P., Friesen W.V. Voluntary facial action generates emotion-specific autonomic nervous system activity // *Psychophysiology*. — 1990. — V. 27 (4). — P. 363-384.
235. Lickliter R., Bahrick L.E. The development of infant intersensory perception: advantages of a comparative convergent-operations approach // *Psychological bulletin*. — 2000. — V. 126 (2). — P. 260-280.
236. Liu Y., Shen H., Zhou Z., Hu D. Sustained negative BOLD response in human fMRI finger tapping task // *PLoS One*. — 2011. — V. 6 (8). — P. 1-7.
237. Luczak A., McNaughton B.L., Kubo Y. Neurons learn by predicting future activity // *Nature machine intelligence*. — 2022. V. 4 (1). — P. 62-72.
238. Makris N., Goldstein J.M., Kennedy D., Hodge S.M., Caviness V.S., Faraone S.V., Tsuang M.T., Seidman L.J. Decreased volume of left and total anterior insular lobule in schizophrenia // *Schizophrenia Research*. — 2006. — V. 83 (2-3). — P. 155-171.
239. Mactatus C.F., Riccio D.C., Ferek J.M. Retrograde amnesia for old (reactivated) memory: some anomalous characteristics // *Science*. — 1979. — V. 204 (4399). — P. 1319-1320.
240. Martin R.C., Rapp B., Purcell J. Domain-specific working memory: perspectives from cognitive neuropsychology // *Working Memory: The state of the science* / R. Logie, V. Camos, N. Cowan (editors). — Oxford: Oxford University Press, 2020 — P. 235-281.
241. Matsuzaka Y., Picard N., Strick P.L. Skill representation in the primary motor cortex after long-term practice // *Journal of neurophysiology*. — 2007. — V. 97 (2). — P. 1819-1832.

242. Maviel T., Durkin T.P., Menzaghi F., Bontempi B. Sites of neocortical reorganization critical for remote spatial memory // *Science*. — 2004. — V. 305. — P. 96-99.
243. McGlone J. Sex differences in human brain asymmetry: A critical survey // *Behavioral and Brain Sciences*. — 1980. — V. 3 (2). — P. 215-263.
244. Monti M.M. Statistical Analysis of fMRI Time-Series: A Critical Review of the GLM Approach // *Frontiers in human neuroscience*. — 2011 — V. 5. — P. 1-13.
245. Morawetz C., Bode S., Derntl B., Heekeren H.R. The effect of strategies, goals and stimulus material on the neural mechanisms of emotion regulation: A meta-analysis of fMRI studies // *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*. — 2017. — V. 72. — P. 111-128.
246. National Research Council. The polygraph and lie detection. — Washington: The National Academies Press. — 2003. — 416 p.
247. Nemeth C.P. Polygraphs: erosion of the privacy right // *Forensic science international*. — 1983. — V. 21 (2). — P. 103-115.
248. Niedenthal P.M. Embodying Emotion // *Science*. — 2007. — V. 316. — P. 1002-1005.
249. Ofen N, Whitfield-Gabrieli S., Chai X.J., Schwarzlose R.F., Gabrieli J.D. Neural correlates of deception: Lying about past events and personal beliefs // *Social Cognitive & Affective Neuroscience*. — 2017. — V. 12 (1). — P. 116-127.
250. Orlov V.A., Kholodny Y.I., Kartashov S.I., Malakhov D.G., Kovalchuk M.V., Ushakov V.L. Application of registration of human vegetative reactions in the process of functional magnetic resonance imaging // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2020. — V. 948. — P. 393-399.
251. Palomero-Gallagher N., Amunts K. A short review on emotion processing: a lateralized network of neuronal networks // *Brain Structure and Function*. — 2022. — V. 227 (2). — P. 673-684.
252. Panksepp J. The neuro-evolutionary cusp between emotions and cognitions: Implications for understanding consciousness and the emergence of a unified mind science // *Consciousness & Emotion*. — 2000. — V. 1. — P. 15-54.

253. Park J., Seok H.S., Kim S.S., Shin H. Photoplethysmogram Analysis and Applications: An Integrative Review // *Frontiers in Physiology*. — 2022. — V. 12. — P. 1-23.
254. Paton J.A., Nottebohm F.N. Neurons generated in the adult brain are recruited into functional circuits // *Science*. — 1984. — V. 225. — P. 1046-1048.
255. Pavlenko A. Affective processing in bilingual speakers: disembodied cognition? // *International journal of psychology*. — 2013. — V. 47 (6). — P. 405-428.
256. Peeters G., Czapinski J. Positive-negative asymmetry in evaluations: the distinction between affective and informational negativity effects // W. Stroebe, M. Hewstone (editors). *European Review of Social Psychology*. Vol. 1. — N.Y.: John Wiley and Sons Ltd, 1990. — P. 34-60.
257. Peth J., Sommer T., Hebart M.N., Vossel G., Büchel C., Gamer M. Memory detection using fMRI — does the encoding context matter? // *Neuroimage*. — 2015. — V. 113. — P. 164-174.
258. Piaget J. *Play, dreams and imitation in childhood*. — N.Y.: W.W. Norton and Company, Inc, 1962. — 296 p.
259. Poldrack R.A., Mumford J.A., Nichols T.E. *Handbook of Functional MRI Data Analysis*. — N.Y.: Cambridge University Press, 2011. — 228 p.
260. Posada-Quintero H.F., Florian J.P., Orjuela-Cañón A.D., Aljama-Corrales T., Charleston-Villalobos S., Chon K.H. Power Spectral Density Analysis of Electrodermal Activity for Sympathetic Function Assessment // *Annals of Biomedical Engineering* — 2016. — V. 44. — P. 3124-3135.
261. Prickaerts J., Koopmans G., Blokland A., Scheepens A. Learning and adult neurogenesis: Survival with or without proliferation? // *Neurobiology of Learning and Memory*. — 2004. — V. 81. — P. 1-11.
262. Pulvermüller F. Brain mechanisms linking language and action // *Neuroscience*. — 2005. — V. 6. — P. 576-582.
263. Pylyshyn Z.W. Mental imagery: in search of a theory // *Behavioral and brain sciences*. — 2002. — V. 25. — P. 157-238.

264. Rizzolatti G., Craighero L. The mirror-neuron system // *Annual Review of Neuroscience*. — 2004. — V. 27. — P. 169-192.
265. Robin O., Alaouli-Ismaili O., Dittmar A., Vernet-Maury E. Basic emotions evoked by eugenol odor differ according to the dental experience. A neurovegetative analysis. // *Chemical Senses*. — 1999. — V. 24. — P. 327-335.
266. Rosenfeld J.P. (editor). *Detecting concealed information and deception: Recent Developments*. — London: Elsevier; Academic Press, 2018. — 440 p.
267. Schmidt E.M., Bak M.J., McIntosh J.S. Long-term chronic recordings from cortical neurons // *Experimental neurology*. — 1976. — V. 52. — P. 496-506.
268. Schneirla T.C. An evolutionary and developmental theory of biphasic processes underlying approach and withdrawal // M.D. Jones (editor). *Nebraska symposium on motivation*. Vol. 7. — Lincoln: University of Nebraska Press, 1959. — P. 1-42.
269. Schwarz N. Feelings as information. Informational and motivational functions of affective states // E.T. Higgins, R.M. Sorrentino (editors). *The Handbook of motivation and cognition: Foundations of social behavior*. Vol. 2. — N.Y.: Guilford Press, 1990. — P. 527-561.
270. Sententia W. Neuroethical considerations: cognitive liberty and converging technologies for improving human cognition // *Annals of the N.Y. Academy of Sciences*. — 2004. — V. 1013. — P. 221-228.
271. Shors T.J., Miesegaes G., Beylin A., Zhao M., Rydel T., Gould E. Neurogenesis in the adult is involved in the formation of trace memories // *Nature*. — 2001. — V. 410. — P. 372-376.
272. Shvyrkov V.B. Neurophysiological investigations of structure of psychics // *Soviet-Finnish Symposium on Psychophysiology, Moscow, 1981* / Zhuravlev B.V. et al. — Helsinki, 1982. — P. 3-29.
273. Shvyrkov V.B. Behavioral specialization of neurons and the system-selection hypothesis of learning // F. Klix, H. Hagendorf (editors). *Human memory and cognitive capabilities*. — Amsterdam: Elsevier, 1986. — P. 599-611.
274. Shvyrkova N.A., Shvyrkov V.B. Visual cortical unit activity during feeding and avoidance behavior // *Neurophysiology*. — 1975. — V. 7. — P. 82-83.

275. Sirotin Y.B., Aniruddha Das. Anticipatory haemodynamic signals in sensory cortex not predicted by local neuronal activity // *Nature*. — 2009 — V. 457 (7228). — P. 475-479.
276. Slotnick S.D. Cluster success: fMRI inferences for spatial extent have acceptable false-positive rates // *Cognitive neuroscience*. — 2017. V. 8 (3). — P. 150-155.
277. Smith M.L., Glass G.V. Meta-analysis of psychotherapy outcome studies // *American Psychologist*. — 1977. — V. 32 (9). — P. 752-760.
278. Spence S.A., Farrow T.F., Herford A.E., Wilkinson I.D., Zheng Y., Woodruff P.W. Behavioral and functional anatomical correlates of deception in humans // *Neuroreport*. — 2001. — V. 12 (13). — P. 2849-2853.
279. Smith C.N., Squire L.R. Medial temporal lobe activity during retrieval of semantic memory is related to the age of the memory // *Journal of Neuroscience*. — 2009. — V. 29 (4) — P. 930-938.
280. Strauss E., Kosaka B., Waada J. The neurobiological basis of lateralized cerebral function: A review // *Human Neurobiology*. — 1983. — V. 2 (3). — P. 115-127.
281. Squire L.R., Cohen N.J. Human memory and amnesia // *The neurobiology of learning and memory* / J.L. McGaugh, G. Lynch, N.M. Weinberger (editors). — N.Y.: Guilford Press, 1984. — P. 3-64.
282. Svarnik O. E., Anokhin K. V., Aleksandrov Yu. I. Distribution of Behaviorally Specialized Neurons and Expression of Transcription Factor c-Fos in the Rat Cerebral Cortex during Learning // *Neuroscience and Behavioral Physiology*. — 2003. — V. 33 (2). — P. 139-142.
283. Swadlow H.A., Hicks T.P. Subthreshold receptive fields and baseline excitability of «silent» S1 callosal neurons in awake rabbits: contributions of AMPA/kainate and NMDA receptors // *Experimental Brain Research*. — 1997. — V. 115. — P. 403-409.
284. Takashima A., Petersson K.M., Rutters F., Tendolkar I., Jensen O., Zwarts M.J., McNaughton B.L., Fernandez G. Declarative memory consolidation in humans: a prospective functional magnetic resonance imaging study // *Proceedings of the*

- National Academy of Sciences of the United States of America. — 2006. — V. 103. — P. 756-761.
285. Thompson L.T., Best P.J. Long-term stability of the place-field activity of single units recorded from the dorsal hippocampus of freely behaving rats // *Brain Research*. — 1990. — V. 509. — P. 299-308.
286. Tian Y., Beier M.E., Fischer-Baum S. The domain-specificity of serial order working memory // *Memory and Cognition*. — 2022. — V. 50. — P. 941-961.
287. Tononi G., Edelman G.M. Consciousness and complexity // *Science*. — 1998. — V. 282. — P. 1846-1851.
288. Tononi G. An information integration theory of consciousness // *BioMed Central Neuroscience*. — 2004. — V. 5. — P. 1-22.
289. Tronstad C., Staal O.M., Saelid S., Martinsen O.G. Model-based filtering for artifact and noise suppression with state estimation for electrodermal activity measurements in real time // *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2015. — Piscataway: IEEE, 2015. — P. 2750-2753.
290. Tzourio-Mazoyer N., Landeau B., Papathanassiou D., Crivello F., Étard O., Delcroix N., Mazoyer B., Joliot M. Automated Anatomical Labeling of Activations in SPM Using a Macroscopic Anatomical Parcellation of the MNI MRI Single-Subject Brain // *NeuroImage*. — 2002. — V. 15. — P.273-289.
291. U.S. Congress, Office of Technology Assessment. Scientific validity of polygraph testing: a research review and evaluation — a technical memorandum. — Washington: U.S. Congress, Office of Technology Assessment, 1983. — 132 p.
292. Ushakov V.L., Malakhov D.G., Orlov V.A., Kartashov S.I., Kholodny Y.I. Research of Neurocognitive Mechanisms of Revealing of the Information Concealing by the Person // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. — 2019. — V. 848. — P. 310-315.
293. Ushakov V., Khazova M., Zhigulina P., Orlov V., Malakhov D., Dorokhov V. Brain Neural Network Architectures in Sleep-Wake Cycle // *Studies in Computational Intelligence*. — 2024. — V. 1130— P. 894-903.

294. Van Niftrik C.H.B., Hiller A., Sebök M., Halter M., Duffin J., Fisher J.A., Mikulis D.J., Regli L., Piccirelli M., Fierstra J. Heterogeneous motor BOLD-fMRI responses in brain areas exhibiting negative BOLD cerebrovascular reactivity indicate that steal phenomenon does not always result from exhausted cerebrovascular reserve capacity // *Magnetic Resonance Imaging*. — 2023. — V. 103. — P. 124-130.
295. Vandebosch K., Verschuere B., Crombez G., DeClercq A. The validity of finger pulse line length for the detection of concealed information // *International Journal of Psychophysiology*. — 2009. — V. 71 (2). — P. 118-123.
296. Vendemia J.M.C. fMRI as a method of detection of deception: a review of experiences // *European polygraph*. — 2014. — V. 8 (1). — P. 5-21.
297. Viard A., Piolino P., Desgranges B., et al. Hippocampal activation for autobiographical memories over the entire lifetime in healthy aged subjects: an fMRI study // *Cerebral Cortex*. — 2007. — V. 17 (10). — P. 2453-2467.
298. Vinikainen M., Jaaskelainen I.P., Alexandrov Y., Balk M., Autti T., Sams M. Nonlinear relationship between emotional valence and brain activity: evidence of separate negative and positive valence dimensions // *Human Brain Mapping*. — 2010. — V. 31. — P. 1030-1040.
299. Wagner A.D. Can neuroscience identify lies? // *A judge's guide to neuroscience* / Gazzaniga M. (editor). — Santa Barbara: University of California, SAGE Center, 2010. — P. 13-25.
300. Walley A.C., Metsala J.L. Young children's age-of-acquisition estimates for spoken words // *Memory and cognition*. — 1992. — V. 20 (2). — P. 171-182.
301. Ward T., Wilshire C., Jackson L. The Contribution of Neuroscience to Forensic Explanation // *Psychology, Crime & Law*. — 2018. — V. 24 (3). — P. 195-209.
302. Weiskrantz L. Experimental studies of amnesia // *Amnesia*. — London, 1966. — P. 1-35.
303. Werner H., Kaplan B. The developmental approach to cognition: its relevance to the psychological interpretation of anthropological and ethnolinguistic data // *American Anthropologist*. — 1956. — V. 58. — P. 866-880.

304. Westlin C., Theriault J.E., Katsumi Y., Nieto-Castanon A., Kucyi A., Ruf S.F., Brown S.M., Pavel M., Erdogmus D., Brooks D.H., Quigley K.S., Whitfield-Gabrieli S., Barrett L.F. Improving the study of brain-behavior relationships by revisiting basic assumptions // *Trends in cognitive sciences*. — 2023. — V. 27 (3). — P. 246-257.
305. Whitfield-Gabrieli S., Nieto-Castanon A. Conn: a functional connectivity toolbox for correlated and anticorrelated brain networks // *Brain connectivity*. — 2012. — V. 2 (3). — P. 125-141.
306. Williams J.C., Rennaker R.L., Kipke D.R. Stability of chronic multichannel neural recordings: implications for a long-term neural interface // *Neurocomputing*. — 1999. — V. 26. — P. 1069-1076.
307. Wilson E.O. *Consilience. The unity of knowledge*. — N.Y.: A.A. Knoff, 1998. — 367 p.
308. Wilson M.A., McNaughton B.L. Dynamics of the hippocampal ensemble code for space // *Science*. — 1993. — V. 261. — P. 1055-1058.
309. Winton W.M., Putnam L.E., Krauss R.M. Facial and autonomic manifestations of the dimensional structure of emotion // *Journal of experimental social psychology*. — 1984. — V. 20. — P. 195-216.
310. Wolff P., Medin L.D., Pankratz C. Evolution and development of folk-biological knowledge // *Cognition*. — 1999. — V. 73. — P. 177-204.
311. Woo C.W., Krishnan A., Wager T.D. Cluster-extent based thresholding in fMRI analyses: pitfalls and recommendations // *NeuroImage*. — 2014. — V. 91. — P. 412-419.
312. Woolrich M.W., Behrens T.E.J., Beckmann C.F., Jenkinson M., Smith S.M. Multilevel linear modeling for FMRI group analysis using Bayesian inference // *NeuroImage*. — 2004. — V. 21 (4). P. 1732-1747.
313. Xue Z.M. The studies on neurogenesis induced by brain injury in adult ring dove // *Cell Research*. — 1998. — V. 8. — P. 151-162.
314. Zajonc R.B. Feeling and thinking. Preferences need no inferences // *American Psychologist*. — 1980. — V. 35. — P. 151-175.

## Перечень обозначений и сокращений

BOLD	Blood Oxygen Level Dependent (зависящий от уровня кислорода в крови)
CONN	Название программного пакета для выявления функциональных связей мозга по фМРТ-данным
$d_{\text{Коэна}}$	Размер эффекта по Коэну
FDR	False Discovery Rate (средняя доля ложноположительных результатов) — ряд методов коррекции эффекта множественных сравнений
FLAME	Название регрессионной модели со смешанными эффектами в пакете FSL
$f_s$	Частота дискретизации
FSL	Название программного пакета обработки фМРТ-данных (Оксфорд, Великобритания)
FWER	Family-Wise Error Rate (групповая вероятность ошибки первого рода) — ряд методов коррекции эффекта множественных сравнений
GLM	General Linear Model (обобщенная линейная модель)
ICA	Метод независимых компонент (Independent Component Analysis)
$M_A$ и $M_B$	Средние арифметические значения АКО сравниваемых независимых выборок
$M_d$	Среднее арифметическое разностей АКО сравниваемых зависимых выборок

MNI-152	Стандартизированная модель мозга Монреальского неврологического института (Montreal Neurological Institute), построенная на основе томограмм 152 человек
$n$	Число участников эксперимента в выборке
$S_A$ и $S_B$	Стандартные отклонения значений АКО сравниваемых независимых выборок
SD	Стандартное отклонение (Standard Deviation)
$S_d$	Стандартное отклонение разностей АКО сравниваемых зависимых выборок
SE	Стандартная ошибка (Standard Error)
SPM12	Название программного пакета обработки фМРТ-данных (Лондон, Великобритания)
TR	Период циклического повторения регистрации функциональных данных по объему мозга (Time of Repetition) во время выполнения фМРТ
АКО	Автоматическая количественная оценка
ИО	Инвертированная огибающая
ИПП	Исследование с применением полиграфа
КГР	Кожно-гальваническая реакция
МРТ	Магнитно-резонансная томография
МРТсП	МРТ-совместимый полиграф
МЭГ	Магнитоэнцефалография
ПС	Процент совпадений

ПЭТ	Позитрон-эмиссионная томография
ТЗВ	«Тест на знание виновного»
ТСИ	«Тест со скрываемым именем»
У.е.	Условная единица (arbitrary unit)
ФВЧ	Фильтр верхних частот
фМРТ	Функциональная магнитно-резонансная томография
ФНЧ	Фильтр нижних частот
ФПГ	Фотоплетизмография
ЧСС	Частота сердечных сокращений
ЭЭГ	Электроэнцефалография

Примечание — Расшифровка условных обозначений областей мозга, используемых в работе, а также их перевод с английского на русский язык, приведены в приложении А.

## Приложение А

Приведен пример визуализации «Атласа CONN» (раздел 2.5) (рисунок А.1).

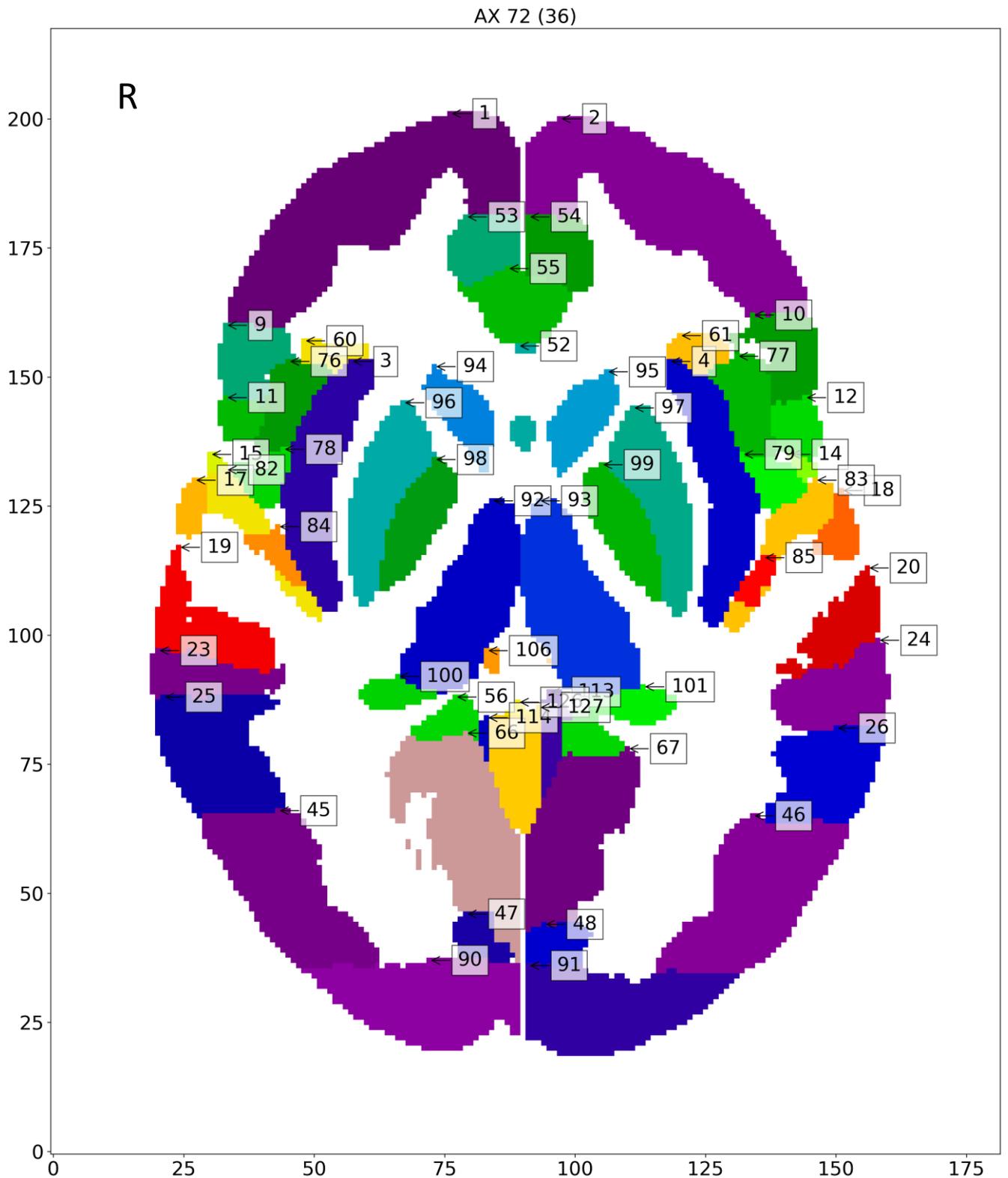


Рисунок А.1 — Визуализация аксиального среза № 72 (36) «Атласа CONN» в пространстве MNI-152 с размером вокселя  $1 \times 1 \times 1 \text{ мм}^3$ . Названия структур см. в таблице А.1

Визуализация атласа выполнена автором диссертационной работы с применением специально разработанной палитры для цветового различения большого числа одновременно отображаемых структур мозга.

Вопрос истории разработки, авторства и названия «Атласа CONN» подробно разобран в разделе 2.5.

На рисунке A.2 приведена визуализация отдельных структур по «Атласу CONN» в трехмерных проекциях. Названия и номера структур на рисунке A.2 соответствуют таблице A.1.

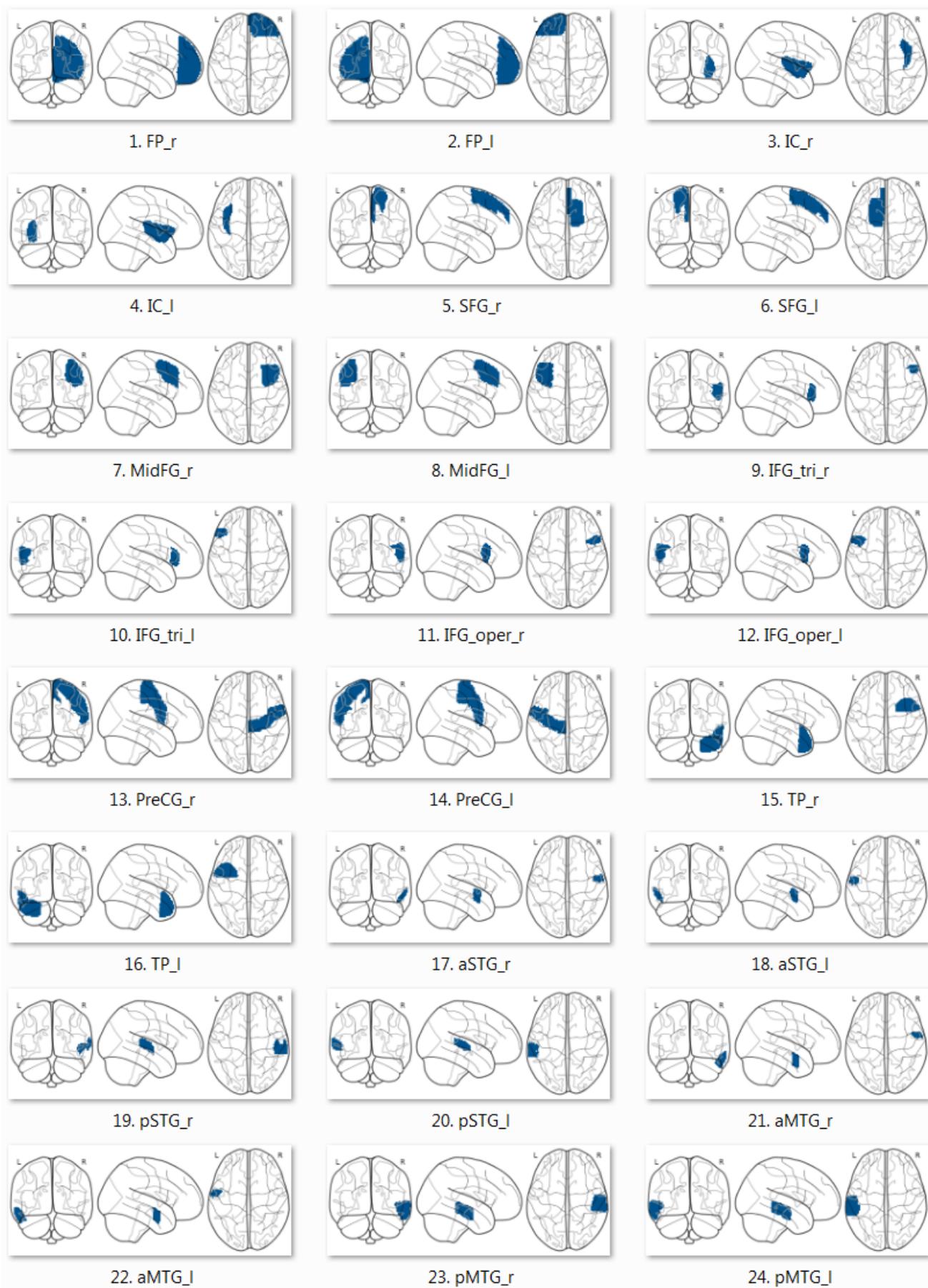


Рисунок А.2 — Трехмерные проекции структур головного мозга человека по «Атласу CONN» (лист 1 из 6)

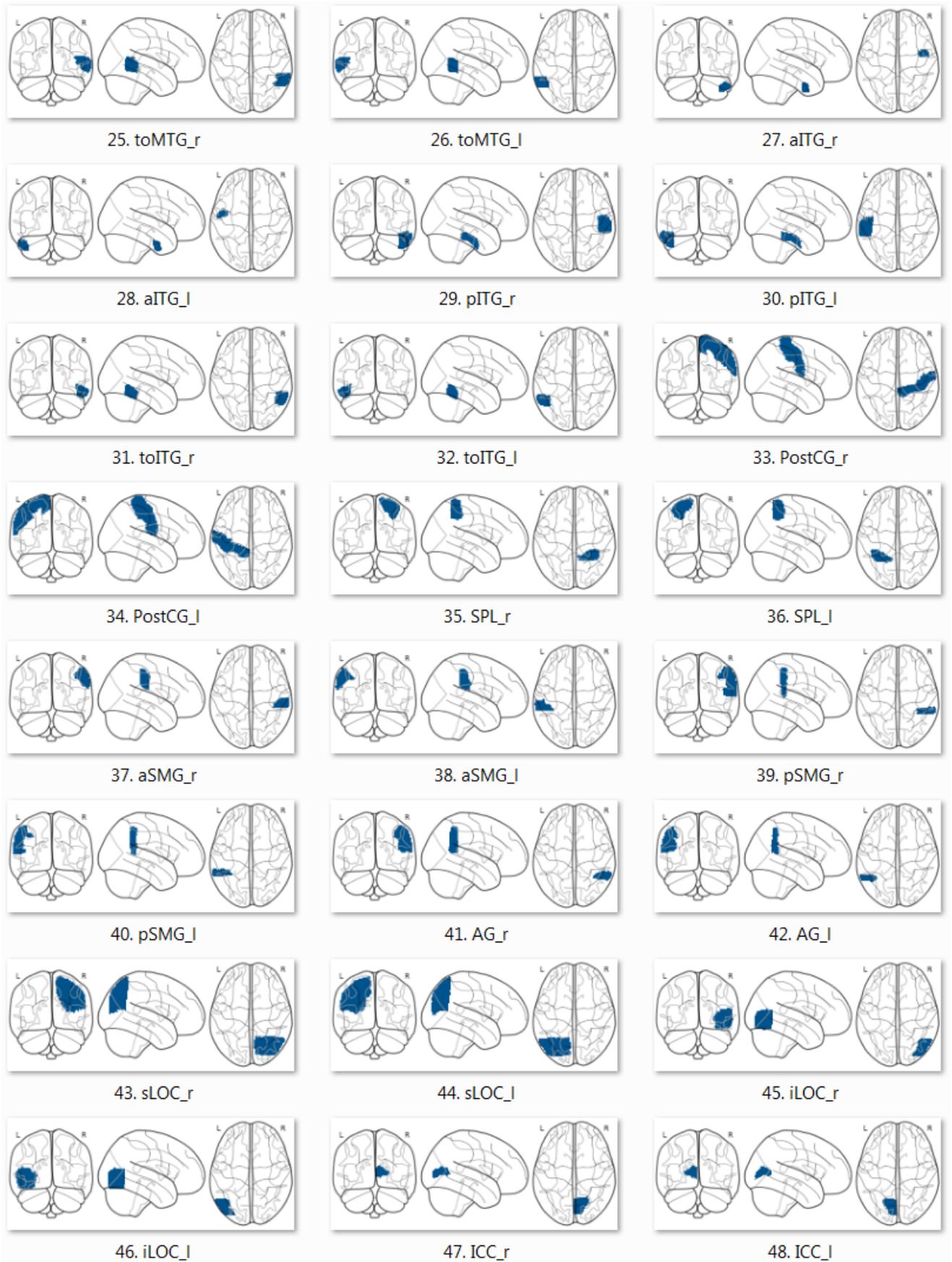


Рисунок А.2 (лист 2 из 6)

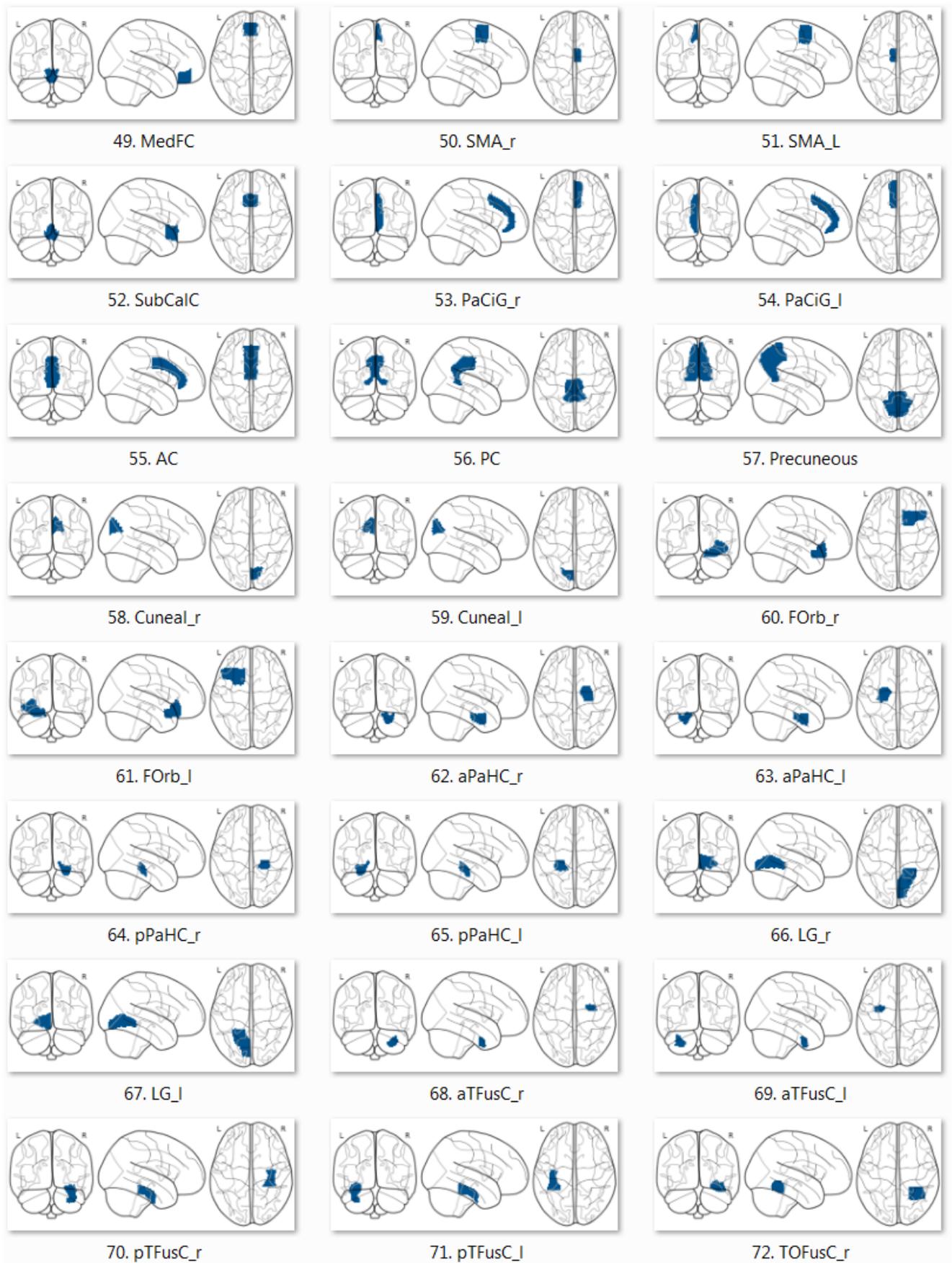


Рисунок А.2 (лист 3 из 6)

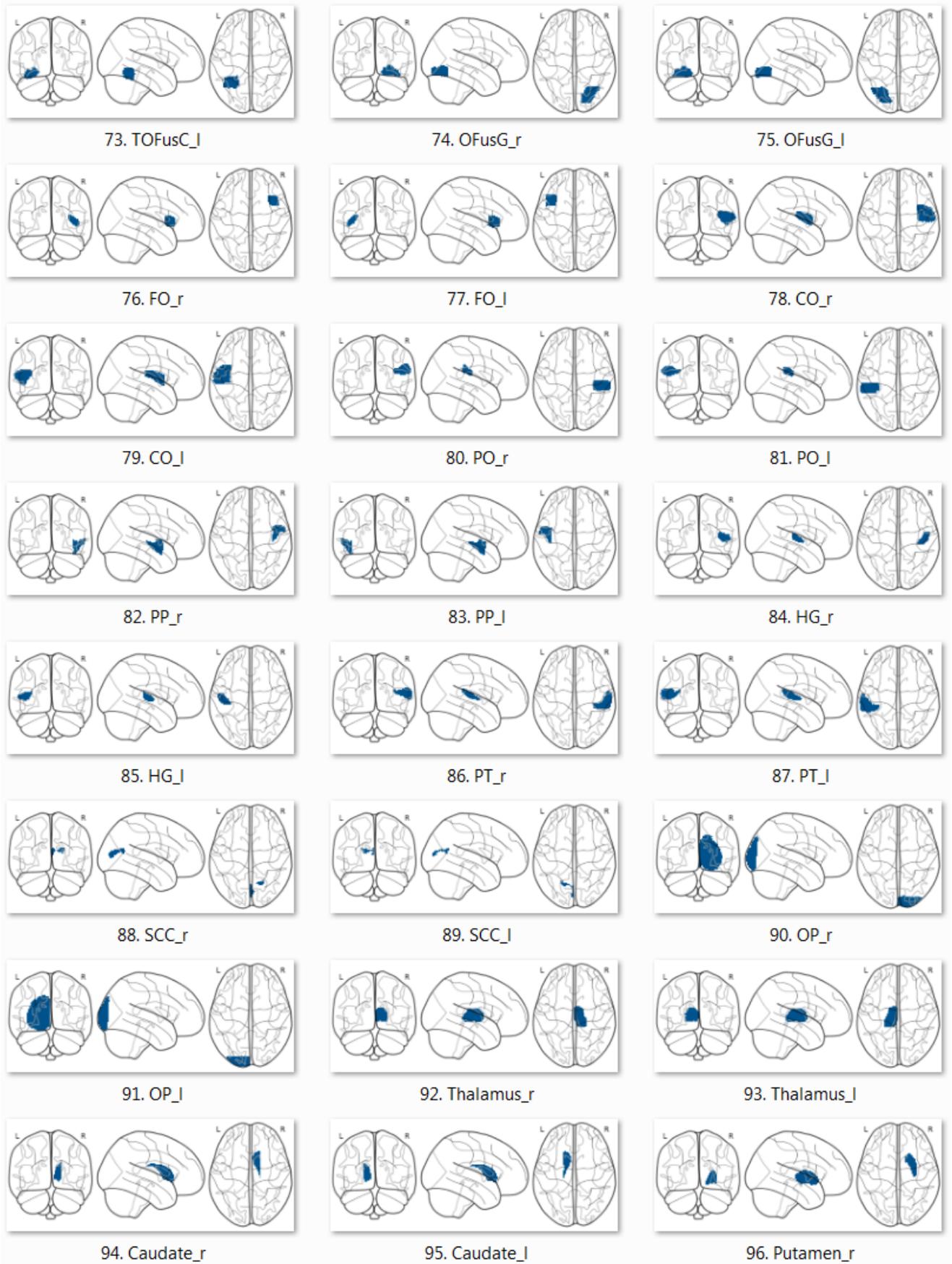


Рисунок А.2 (лист 4 из 6)

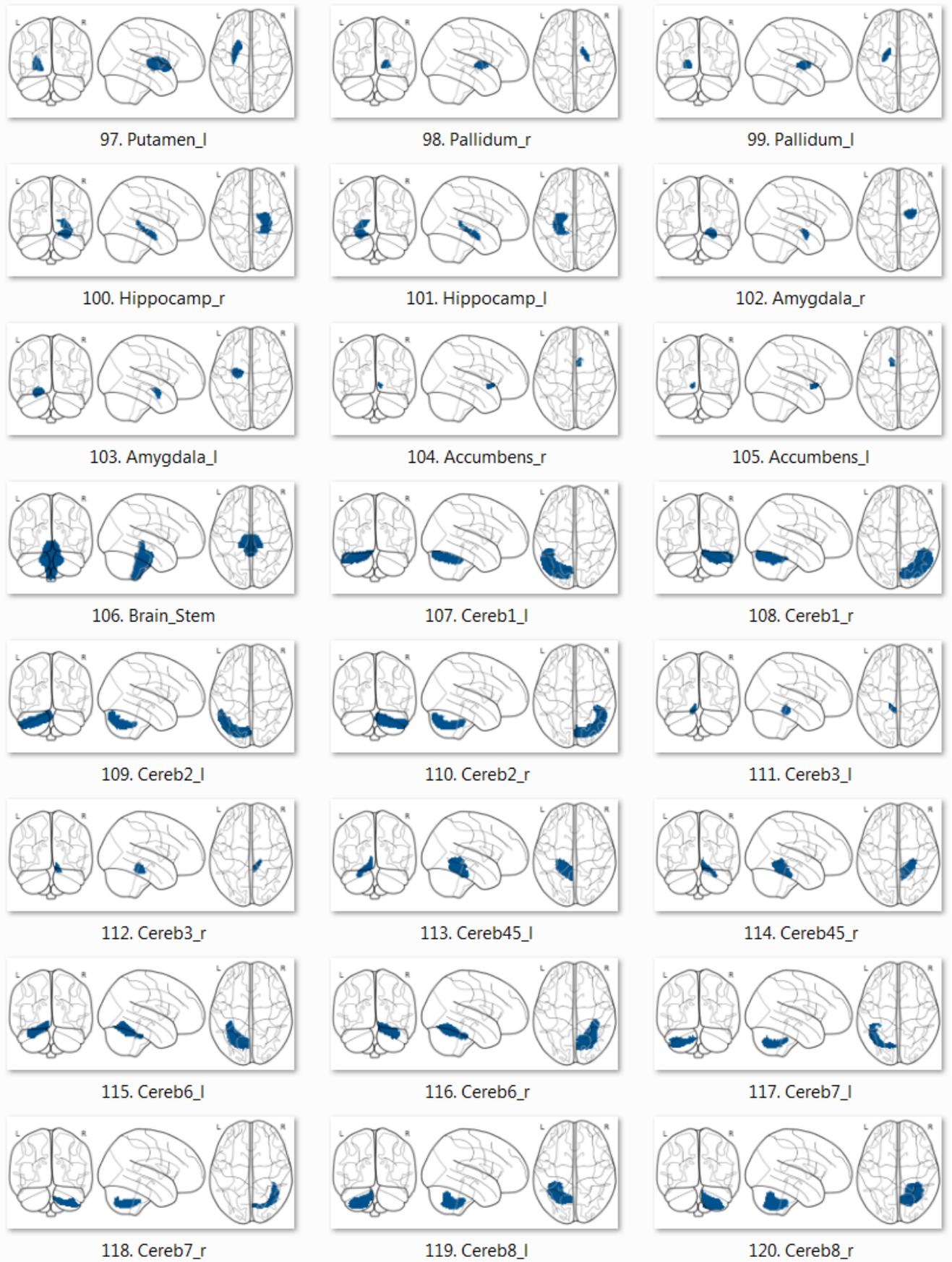


Рисунок А.2 (лист 5 из 6)

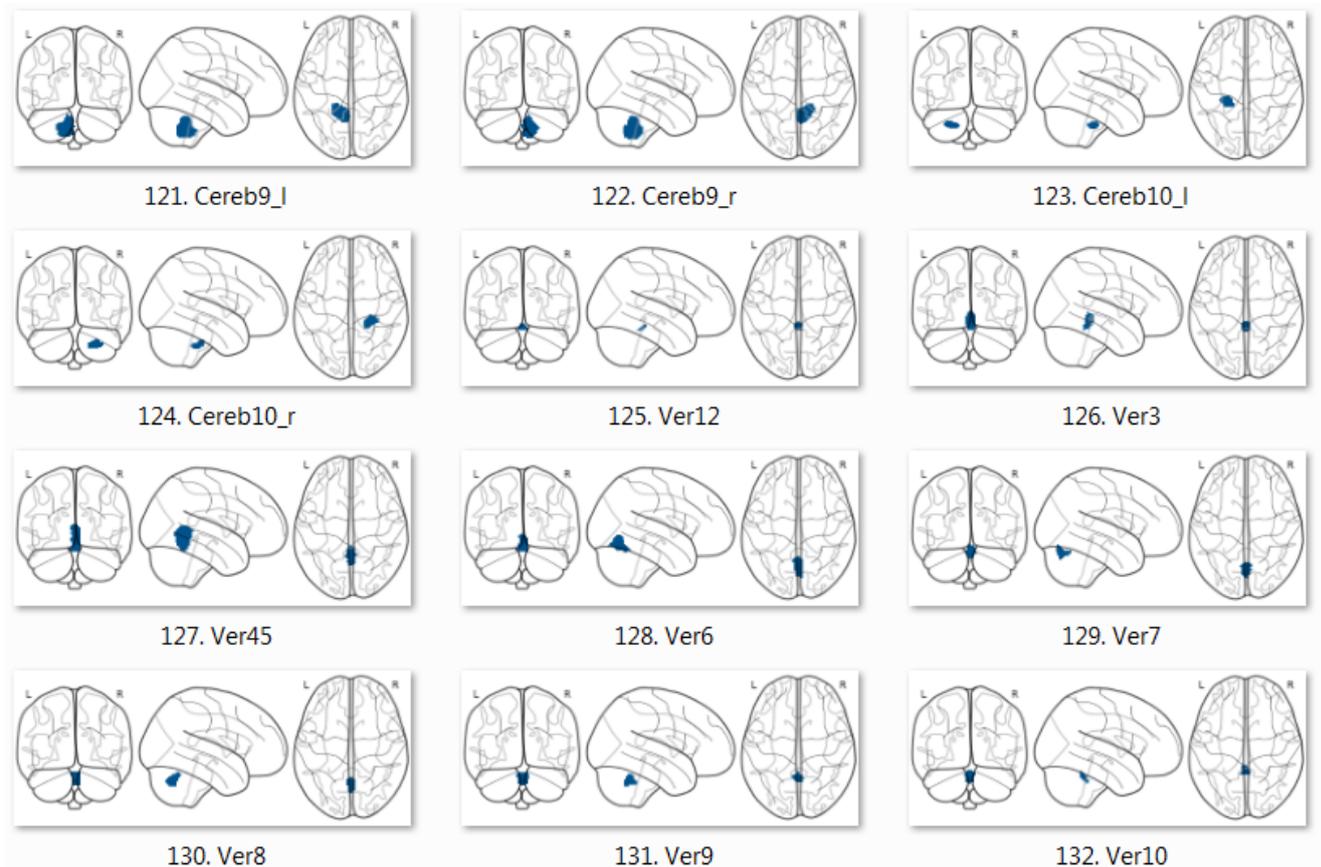


Рисунок А.2 (лист 6 из 6)

В таблице А.1 приведены соответствия между номерами структур мозга по «Атласу CONN» и их названиями, а также перевод этих названий на русский язык. Эти соответствия используются на рисунках А.1 и А.2, и в других разделах диссертационной работы. Цитирование англоязычных названий структур мозга приведено по работе R.A. Clark с соавторами (Clark et al., 2020, table S1).

Таблица А.1 — Перевод на русский язык названий структур мозга по «Атласу CONN»

Номер	Сокращенное название	Полное название
1	FP_r	« <i>Frontal Pole Right</i> » — «правый лобный полюс»
2	FP_l	« <i>Frontal Pole Left</i> » — «левый лобный полюс»
3	IC_r	« <i>Insular Cortex Right</i> » — «правая островковая кора»
4	IC_l	« <i>Insular Cortex Left</i> » — «левая островковая кора»
5	SFG_r	« <i>Superior Frontal Gyrus Right</i> » — «правая верхняя лобная извилина»
6	SFG_l	« <i>Superior Frontal Gyrus Left</i> » — «левая верхняя лобная извилина»
7	MidFG_r	« <i>Middle Frontal Gyrus Right</i> » — «правая средняя лобная извилина»
8	MidFG_l	« <i>Middle Frontal Gyrus Left</i> » — «левая средняя лобная извилина»
9	IFG_tri_r	« <i>Inferior Frontal Gyrus, pars triangularis Right</i> » — «треугольная

		часть правой нижней лобной извилины»
10	IFG_tri_l	« <i>Inferior Frontal Gyrus, pars triangularis Left</i> » — «треугольная часть левой нижней лобной извилины»
11	IFG_oper_r	« <i>Inferior Frontal Gyrus, pars opercularis Right</i> » — «задняя часть правой нижней лобной извилины»
12	IFG_oper_l	« <i>Inferior Frontal Gyrus, pars opercularis Left</i> » — «задняя часть левой нижней лобной извилины»
13	PreCG_r	« <i>Precentral Gyrus Right</i> » — «правая прецентральная извилина»
14	PreCG_l	« <i>Precentral Gyrus Left</i> » — «левая прецентральная извилина»
15	TP_r	« <i>Temporal Pole Right</i> » — «правый височный полюс»
16	TP_l	« <i>Temporal Pole Left</i> » — «левый височный полюс»
17	aSTG_r	« <i>Superior Temporal Gyrus, anterior division Right</i> » — «передняя часть правой верхней височной извилины»
18	aSTG_l	« <i>Superior Temporal Gyrus, anterior division Left</i> » — «передняя часть левой верхней височной извилины»
19	pSTG_r	« <i>Superior Temporal Gyrus, posterior division Right</i> » — «задняя часть правой верхней височной извилины»
20	pSTG_l	« <i>Superior Temporal Gyrus, posterior division Left</i> » — «задняя часть правой верхней височной извилины»
21	aMTG_r	« <i>Middle Temporal Gyrus, anterior division Right</i> » — «передняя часть правой средней височной извилины»
22	aMTG_l	« <i>Middle Temporal Gyrus, anterior division Left</i> » — «передняя часть левой средней височной извилины»
23	pMTG_r	« <i>Middle Temporal Gyrus, posterior division Right</i> » — «задняя часть правой средней височной извилины»
24	pMTG_l	« <i>Middle Temporal Gyrus, posterior division Left</i> » — «задняя часть левой средней височной извилины»
25	toMTG_r	« <i>Middle Temporal Gyrus, temporooccipital part Right</i> » — «височно-затылочная часть правой средней височной извилины»
26	toMTG_l	« <i>Middle Temporal Gyrus, temporooccipital part Left</i> » — «височно-затылочная часть левой средней височной извилины»
27	aITG_r	« <i>Inferior Temporal Gyrus, anterior division Right</i> » — «передняя часть правой нижней височной извилины»
28	aITG_l	« <i>Inferior Temporal Gyrus, anterior division Left</i> » — «передняя часть левой нижней височной извилины»
29	pITG_r	« <i>Inferior Temporal Gyrus, posterior division Right</i> » — «задняя часть правой нижней височной извилины»
30	pITG_l	« <i>Inferior Temporal Gyrus, posterior division Left</i> » — «задняя часть левой нижней височной извилины»
31	toITG_r	« <i>Inferior Temporal Gyrus, temporooccipital part Right</i> » — «височно-затылочная часть правой нижней височной извилины»
32	toITG_l	« <i>Inferior Temporal Gyrus, temporooccipital part Left</i> » — «височно-затылочная часть левой нижней височной извилины»
33	PostCG_r	« <i>Postcentral Gyrus Right</i> » — «правая постцентральная извилина»
34	PostCG_l	« <i>Postcentral Gyrus Left</i> » — «левая постцентральная извилина»

35	SPL_r	« <i>Superior Parietal Lobule Right</i> » — «правая верхняя теменная доля»
36	SPL_l	« <i>Superior Parietal Lobule Left</i> » — «левая верхняя теменная доля»
37	aSMG_r	« <i>Supramarginal Gyrus, anterior division Right</i> » — «передняя часть правой надкраевой извилины»
38	aSMG_l	« <i>Supramarginal Gyrus, anterior division Left</i> » — «передняя часть левой надкраевой извилины»
39	pSMG_r	« <i>Supramarginal Gyrus, posterior division Right</i> » — «задняя часть правой надкраевой извилины»
40	pSMG_l	« <i>Supramarginal Gyrus, posterior division Left</i> » — «задняя часть левой надкраевой извилины»
41	AG_r	« <i>Angular Gyrus Right</i> » — «правая угловая извилина»
42	AG_l	« <i>Angular Gyrus Left</i> » — «левая угловая извилина»
43	sLOC_r	« <i>Lateral Occipital Cortex, superior division Right</i> » — «верхняя часть правой латеральной затылочной коры»
44	sLOC_l	« <i>Lateral Occipital Cortex, superior division Left</i> » — «верхняя часть левой латеральной затылочной коры»
45	iLOC_r	« <i>Lateral Occipital Cortex, inferior division Right</i> » — «нижняя часть правой латеральной затылочной коры»
46	iLOC_l	« <i>Lateral Occipital Cortex, inferior division Left</i> » — «нижняя часть левой латеральной затылочной коры»
47	ICC_r	« <i>Intracalcarine Cortex Right</i> » — «правая внутренняя шпорная кора»
48	ICC_l	« <i>Intracalcarine Cortex Left</i> » — «левая внутренняя шпорная кора»
49	MedFC	« <i>Frontal Medial Cortex</i> » — «переднемедиальная кора»
50	SMA_r	« <i>Juxtapositional Lobule Cortex -formerly Supplementary Motor Cortex- Right</i> » — «правая дополнительная моторная кора»
51	SMA_l	« <i>Juxtapositional Lobule Cortex -formerly Supplementary Motor Cortex- Left</i> » — «левая дополнительная моторная кора»
52	SubCalC	« <i>Subcallosal Cortex</i> » — «подмозолистая кора»
53	PaCiG_r	« <i>Paracingulate Gyrus Right</i> » — «правая парацингулярная кора»
54	PaCiG_l	« <i>Paracingulate Gyrus Left</i> » — «левая парацингулярная кора»
55	AC	« <i>Cingulate Gyrus, anterior division</i> » — «передняя цингулярная кора»
56	PC	« <i>Cingulate Gyrus, posterior division</i> » — «задняя цингулярная кора»
57	Precuneous	« <i>Precuneous Cortex</i> » — «предклинная кора»
58	Cuneal_r	« <i>Cuneal Cortex Right</i> » — «правая клиновидная кора»
59	Cuneal_l	« <i>Cuneal Cortex Left</i> » — «левая клиновидная кора»
60	Forb_r	« <i>Frontal Orbital Cortex Right</i> » — «правая лобная орбитальная кора»
61	Forb_l	« <i>Frontal Orbital Cortex Left</i> » — «левая лобная орбитальная кора»
62	aPaHC_r	« <i>Parahippocampal Gyrus, anterior division Right</i> » — «передняя часть правой парагиппокампальной извилины»
63	aPaHC_l	« <i>Parahippocampal Gyrus, anterior division Left</i> » — «передняя часть

		<i>левой парагиппокампальной извилины»</i>
64	pPaHC_r	« <i>Parahippocampal Gyrus, posterior division Right</i> » — «задняя часть правой парагиппокампальной извилины»
65	pPaHC_l	« <i>Parahippocampal Gyrus, posterior division Left</i> » — «задняя часть левой парагиппокампальной извилины»
66	LG_r	« <i>Lingual Gyrus Right</i> » — «правая язычная извилина»
67	LG_l	« <i>Lingual Gyrus Left</i> » — «левая язычная извилина»
68	aTFusC_r	« <i>Temporal Fusiform Cortex, anterior division Right</i> » — «задняя часть правой височной веретенообразной коры»
69	aTFusC_l	« <i>Temporal Fusiform Cortex, anterior division Left</i> » — «передняя часть левой височной веретенообразной коры»
70	pTFusC_r	« <i>Temporal Fusiform Cortex, posterior division Right</i> » — «задняя часть правой височной веретенообразной коры»
71	pTFusC_l	« <i>Temporal Fusiform Cortex, posterior division Left</i> » — «задняя часть левой височной веретенообразной коры»
72	TOFusC_r	« <i>Temporal Occipital Fusiform Cortex Right</i> » — «правая височно-затылочная веретенообразная извилина»
73	TOFusC_l	« <i>Temporal Occipital Fusiform Cortex Left</i> » — «левая височно-затылочная веретенообразная извилина»
74	OFusG_r	« <i>Occipital Fusiform Gyrus Right</i> » — «правая затылочная веретенообразная извилина»
75	OFusG_l	« <i>Occipital Fusiform Gyrus Left</i> » — «левая затылочная веретенообразная извилина»
76	FO_r	« <i>Frontal Operculum Cortex Right</i> » — «правая лобная оперкулярная кора»
77	FO_l	« <i>Frontal Operculum Cortex Left</i> » — «левая лобная оперкулярная кора»
78	CO_r	« <i>Central Opercular Cortex Right</i> » — «правая центральная оперкулярная кора»
79	CO_l	« <i>Central Opercular Cortex Left</i> » — «левая центральная оперкулярная кора»
80	PO_r	« <i>Parietal Operculum Cortex Right</i> » — «правая теменная оперкулярная кора»
81	PO_l	« <i>Parietal Operculum Cortex Left</i> » — «левая теменная оперкулярная кора»
82	PP_r	« <i>Planum Polare Right</i> » — «правая полярная плоскость»
83	PP_l	« <i>Planum Polare Left</i> » — «левая полярная плоскость»
84	HG_r	« <i>Heschl's Gyrus Right</i> » — «правая извилина Гешля»
85	HG_l	« <i>Heschl's Gyrus Left</i> » — «левая извилина Гешля»
86	PT_r	« <i>Planum Temporale Right</i> » — «правая височная плоскость»
87	PT_l	« <i>Planum Temporale Left</i> » — «левая височная плоскость»
88	SCC_r	« <i>Supracalcarine Cortex Right</i> » — «правая верхняя шпорная кора»
89	SCC_l	« <i>Supracalcarine Cortex Left</i> » — «левая верхняя шпорная кора»
90	OP_r	« <i>Occipital Pole Right</i> » — «правый затылочный полюс»

91	OP_l	«Occipital Pole Left» — «левый затылочный полюс»
92	Thalamus_r	«Thalamus r» — «правый таламус»
93	Thalamus_l	«Thalamus l» — «левый таламус»
94	Caudate_r	«Caudate r» — «правое хвостатое ядро»
95	Caudate_l	«Caudate l» — «левое хвостатое ядро»
96	Putamen_r	«Putamen r» — «правая скорлупа»
97	Putamen_l	«Putamen l» — «левая скорлупа»
98	Pallidum_r	«Pallidum r» — «правый паллидум»
99	Pallidum_l	«Pallidum l» — «левый паллидум»
100	Hippocampus_r	«Hippocampus r» — «правый гиппокамп»
101	Hippocampus_l	«Hippocampus l» — «левый гиппокамп»
102	Amygdala_r	«Amygdala r» — «правая миндалина»
103	Amygdala_l	«Amygdala l» — «левая миндалина»
104	Accumbens_r	«Accumbens r» — «правое прилежащее ядро»
105	Accumbens_l	«Accumbens l» — «левое прилежащее ядро»
106	Brain_Stem	«Brain-Stem» — «ствол мозга»
107	Cereb1_l	«Cerebelum Crus1 Left» — «левая ножка мозжечка, область 1»
108	Cereb1_r	«Cerebelum Crus1 Right» — «правая ножка мозжечка, область 1»
109	Cereb2_l	«Cerebelum Crus2 Left» — «левая ножка мозжечка, область 2»
110	Cereb2_r	«Cerebelum Crus2 Right» — «правая ножка мозжечка, область 2»
111	Cereb3_l	«Cerebelum 3 Left» — «левый мозжечок, область 3»
112	Cereb3_r	«Cerebelum 3 Right» — «правый мозжечок, область 3»
113	Cereb45_l	«Cerebelum 4 5 Left» — «левый мозжечок, области 4 и 5»
114	Cereb45_r	«Cerebelum 4 5 Right» — «правый мозжечок, области 4 и 5»
115	Cereb6_l	«Cerebelum 6 Left» — «левый мозжечок, область 6»
116	Cereb6_r	«Cerebelum 6 Right» — «правый мозжечок, область 6»
117	Cereb7_l	«Cerebelum 7b Left» — «левый мозжечок, область 7b»
118	Cereb7_r	«Cerebelum 7b Right» — «правый мозжечок, область 7b»
119	Cereb8_l	«Cerebelum 8 Left» — «левый мозжечок, область 8»
120	Cereb8_r	«Cerebelum 8 Right» — «правый мозжечок, область 8»
121	Cereb9_l	«Cerebelum 9 Left» — «левый мозжечок, область 9»
122	Cereb9_r	«Cerebelum 9 Right» — «правый мозжечок, область 9»
123	Cereb10_l	«Cerebelum 10 Left» — «левый мозжечок, область 10»
124	Cereb10_r	«Cerebelum 10 Right» — «правый мозжечок, область 10»
125	Ver12	«Vermis 1 2» — «червь мозжечка, области 1 и 2»
126	Ver3	«Vermis 3» — «червь мозжечка, область 3»
127	Ver45	«Vermis 4 5» — «червь мозжечка, области 4 и 5»
128	Ver6	«Vermis 6» — «червь мозжечка, область 6»
129	Ver7	«Vermis 7» — «червь мозжечка, область 7»
130	Ver8	«Vermis 8» — «червь мозжечка, область 8»
131	Ver9	«Vermis 9» — «червь мозжечка, область 9»
132	Ver10	«Vermis 10» — «червь мозжечка, область 10»