

Малахов Денис Геннадьевич

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

5.3.2. Психофизиология (психологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата психологических наук

Работа выполнена в лаборатории прикладной и экспериментальной психофизиологии федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

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

Официальные оппоненты: **Курганский Андрей Васильевич**
доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математической нейробиологии обучения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук

Исайчев Сергей Александрович
кандидат психологических наук, доцент, доцент кафедры психофизиологии факультета психологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мозга человека им. Н.П. Бехтеревой Российской академии наук (ИМЧ РАН)

Защита состоится «5» декабря 2024 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета 24.1.110.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт психологии Российской академии наук (ИП РАН) по адресу: 129366, Москва, ул. Ярославская, д. 13, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИП РАН и на сайте <https://ipran.ru>.

Автореферат разослан « » октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.110.03,
кандидат психологических наук



Никитина Елена Альфредовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 опыта¹⁾ 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 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

¹ 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).

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 вариабельности 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.

Публикация и апробация результатов работы. 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.

Результаты 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).

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В главе 1 «Обзор литературы» приведены определения ключевых терминов, используемых в работе; дан обзор подходов, имеющих отношение к проблемным полям диссертационной работы. Рассмотрены: системно-эволюционный подход к исследованию памяти; исследования актуализации индивидуального опыта разного онтогенетического возраста и разной сложности, включая вопросы межполушарной асимметрии и полового диморфизма;

исследование памяти в криминалистике и нейрокриминалистике; актуальные проблемы проведения комплексного психофизиологического исследования с использованием полиграфа и фМРТ, включая регистрацию физиологических данных с помощью полиграфа и их обработку, регистрацию и обработку фМРТ-данных. Сформулированы актуальные научные проблемы, исходя из которых поставлены задачи диссертационной работы.

В **главе 2 «Материалы и методы»** описана процедура получения экспериментальных данных, инструментарий и 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».

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 (6х5). 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».

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 выбранной визитки (фамилию и место работы). 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 ...?».

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». 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. В этом случае можно говорить лишь о большей или меньшей значимости актуализируемой информации в текущей момент времени и в условиях, частично индуцированных инструкцией.

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.

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); 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).

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).

Одновременно регистрировались фМРТ-данные при помощи томографа 3T SIEMENS Magnetom Verio MR. 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.

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° , время инверсии = 900 мс, $FOV = 250$ мм x 218 мм², размер вокселя 1x1x1 мм³. Данные фМРТ были получены со следующими параметрами: 51 срез, $TR = 1110$ мс, $TE = 24$ мс, толщина среза = 2 мм, угол

поворота = 90° , $FOV = 192 \times 192$ мм², размер вокселя $2 \times 2 \times 2$ мм³. Применялись многосрезовые фМРТ-последовательности (Larkman et al., 2001).

Структурные МРТ и фМРТ-данные были предобработаны экспертом (В.А. Орлов) для устранения помех и искажений сигнала различной природы. В частности, использовался метод независимых компонент (ICA) (Орлов, 2021; Орлов и др., 2024; Griffanti et al., 2017).

В главе 3 «Объективный критерий для выбора и оптимизации параметров обработки данных психофизиологических исследований»

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 общем случае, прямая задача: установление наблюдаемых величин по заданным параметрам модели; обратная задача: выявление параметров модели по наблюдаемым величинам¹). 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. Примером обратной психофизиологической задачи может быть диагностика функциональных состояний, исследование структуры индивидуального опыта и др.

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 объективного численного критерия успешности выполнения обратной задачи (оптимизационной метрики) использован процент совпадений (ПС) стимулов, диагностированных как

¹ Указанные понятия напоминают два типа логического вывода — дедуктивный и индуктивный. 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), и потому предложенный в главе 3 подход может иметь биоподобную основу.

субъективно значимые, с априорно заданными по известным биографическим данным участников эксперимента.

Для вычисления ПС необходимо было выработать систему автоматической количественной оценки (АКО) записанных сигналов. В результате был разработан следующий алгоритм:

а) вычисление величин активаций для отдельных стимулов. Сигналы КГР и ФПГ для унификации анализировались одинаковым способом — по «длине линии» — 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, 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 «Материалы и методы», 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 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;

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.

С помощью описанного выше подхода далее выполнялся 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. Эти параметры в силу их небольшого числа были протестированы полным перебором с заданным шагом в определенном диапазоне

с получением трехмерного массива данных. Полученные распределения ПС были визуализированы с помощью цветовой кодировки («тепловых карт») (пример одной из таких карт показан на рисунке 1), по которым осуществлялся выбор оптимальных параметров обработки сигналов.

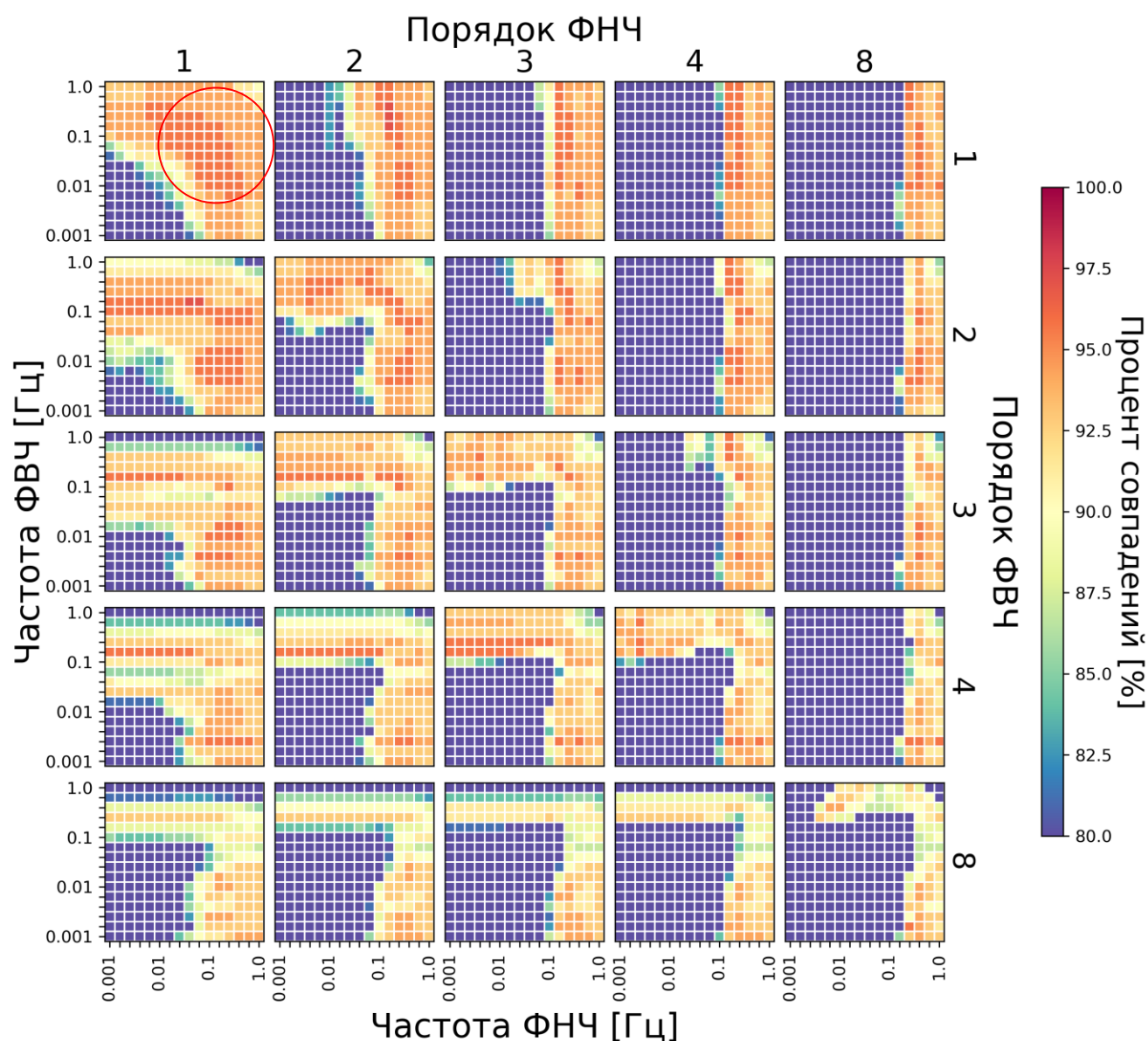


Рисунок 1 — Распределение ПС. Каждая точка на карте соответствует определенному набору параметров обработки сигнала КГР — диапазону частот фильтрации, а также порядку фильтров

С помощью описанного подхода были выбраны наилучшие (по метрике ПС) параметры обработки сигналов КГР и ФПГ. В таблице 1 приводятся контрольные и оптимизированные параметры (в качестве контрольных параметров использовались ранее вручную заданные экспертом-полиграфологом значения; они задавались визуально по форме полиграмм с целью удобства экспертной балльной оценки полиграмм).

Таблица 1 — Параметры обработки сигналов МРТ-совместимого 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.

С помощью метрики ПС было проведено сравнение нескольких методов оценки величин активаций, имеющих значение в контексте задач диссертационной работы, и выбраны наилучшие.

По результатам сравнения экспертной балльной оценки (выполненной вручную экспертом-полиграфологом) 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 использовался 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 (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 главе 4 «Сопоставление статистического параметрического и амплитудного подходов к анализу фМРТ-данных» были предложены и экспериментально обоснованы (с помощью апробированной в **главе 3** методики) амплитудные методы анализа фМРТ-сигнала (на основе АКО и ПС). Эти методы актуальны как для получения новой информации о психофизиологических закономерностях в целях развития фундаментальной науки, так и для решения

прикладных вопросов: создания более простых методов обработки данных для медицины, а также исключения из процедуры труднодоступного проприетарного программного обеспечения.

Вычисление АКО по фМРТ-сигналу выполнялось аналогично процедуре для сигналов КГР и ФПГ, описанной выше, с некоторой спецификой. Очищенные от инструментальных и физиологических артефактов фМРТ-данные, приведенные в пространство MNI-152, обрабатывались следующим образом:

а) повышение частоты дискретизации записи с 0,909 Гц ($TR = 1110$ мс) до 10 Гц (с антиальясингом для предотвращения появления гармоник больше исходной частоты Найквиста). Эта процедура не дает новой частотной информации о сигнале, но *необходима* для более точного совмещения сигналов с временными отметками подачи стимулов, то есть для предотвращения искажения фазовой компоненты сигнала, а также для более наглядной визуализации сигналов (обсуждение этого вопроса дано в тексте диссертационной работы);

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

в) нормирование значений массива на стандартное среднеквадратичное отклонение по объему (не по вокселю);

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). Графический анализ этих интервалов отдельно для различных структур мозга выполнен ниже;

д) вычисление среднего значения амплитуды сигнала в каждой эпохе (базовое значение при этом не вычиталось, так как было показано, что эта процедура ухудшает метрику ПС);

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

Далее была выполнена повоксельная визуализация с помощью нескольких способов обработки, включая стандартную обработку с помощью обобщенной линейной модели (GLM) в пакете FSL. На рисунке 2 показаны групповые карты активаций, полученных рядом способов: по альфа-коэффициентам GLM, по АКО, по t -значениям GLM, а также по t -значениям, вычисленным по АКО. Первые два способа являются вариантами 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. Здесь для визуализации 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 (эти визуализации не использовались для вывода по экспериментальным гипотезам). Подвыборки, показанные на рисунке 2, (8, 18 и 36 человек) формировались случайным образом из общей выборки 74 человека (ТСИ) и были уравнены по количеству мужчин и женщин.

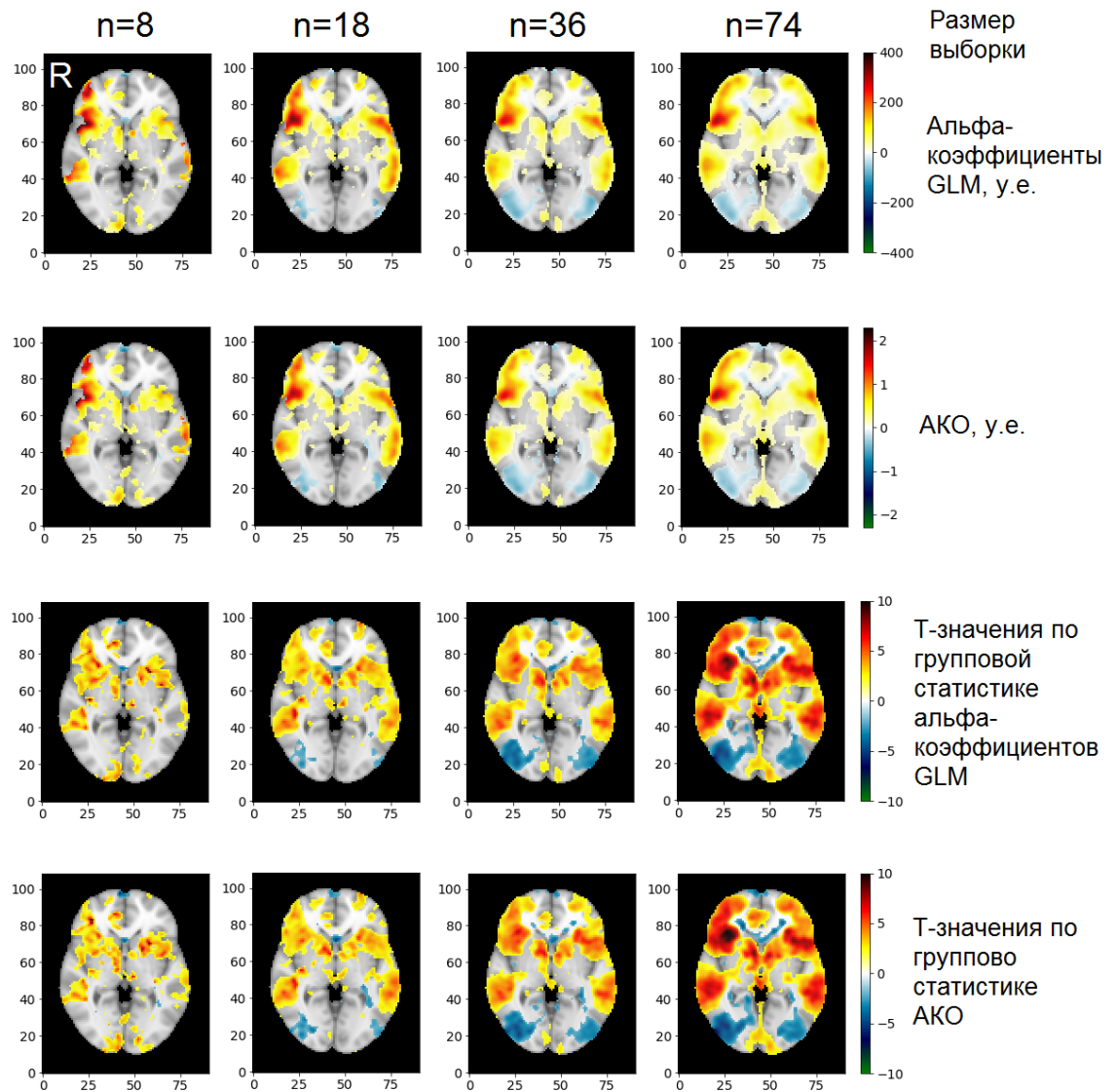


Рисунок 2 — Пример фМРТ-картирования на основе различных подходов. Показан срез №36 в пространстве MNI-152, групповой анализ, порог $p \leq 0,05$, контраст — значимые минус незначимые стимулы. Нестандартизированные величины приведены в условных единицах (y.e.)

Визуальный анализ показал, что обработка с помощью GLM в пакете FSL и с помощью АКО дает сходные результаты. Это говорит о том, что анализ на основе АКО в целом выполнен корректно и может использоваться при дальнейшей обработке данных.

Сопоставление амплитудного анализа и t -значений (полученных как по АКО, так и по GLM) показывает более заметные различия: представляется, что амплитудный анализ более устойчив к изменению размера выборки; 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.

Далее была выполнена визуализация фМРТ-сигнала с усреднением вокселей по структурам мозга (рисунок 3).

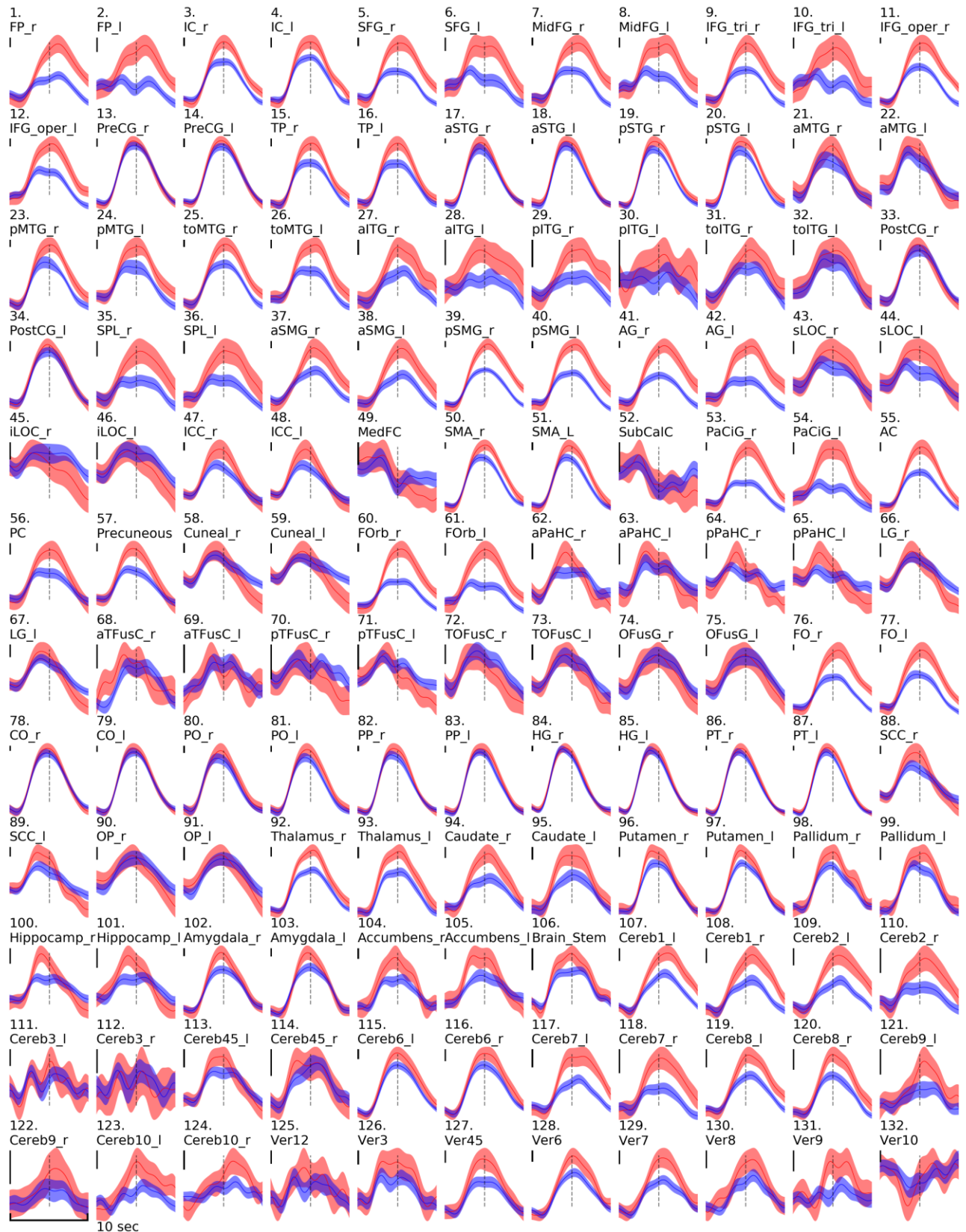


Рисунок 3 — фМРТ-сигналы от структур мозга, разделенные на эпохи по 10 с от отметки предъявления стимула, $n=74$. Доверительные интервалы по уровню две стандартных ошибки ($p \leq 0,05$). Красным цветом обозначены активации, связанные с актуализацией субъективно значимой информации, синим цветом — незначимой. Расшифровка сокращений и перевод названий структур мозга приведены в **приложении А** диссертации

Было отмечено, что форма фМРТ-сигнала в некоторых структурах мозга существенно отличается от стандартной формы гемодинамического ответа, и вычисление АКО может иметь преимущество. Были выделены ранние и поздние компоненты (низколатентные и высоколатентные). Первые имеют пик около 3,3 с, а вторые — 6,6 с. Подробнее рисунок 3 анализируется далее в [главе 5](#).

Чтобы выполнить объективное сопоставление методов по метрике ПС, эта метрика была вычислена для каждого вокселя и каждой структуры мозга несколькими способами: по АКО, по альфа-коэффициентам GLM и по t -значениям GLM. На рисунке 4 приведены результаты анализа ПС по структурам. Структуры отсортированы по возрастанию (для наглядности на графике показана только верхняя часть распределения, то есть структуры, имеющие максимальное значение ПС). Метрика ПС, полученная по АКО (розовая кривая), показывает наилучшие результаты.

Далее была выполнена кроссвалидационная проверка устойчивости выделения «информативных» структур мозга. Для этого выборка итерационно делилась на две равные части случайным образом. Сначала в «обучающей» подвыборке определялись наиболее информативные структуры мозга по метрике ПС (уровень отсечки ПС являлся объектом оптимизации). Затем на «тестовой» подвыборке АКО для выбранных на предыдущем шаге структур усреднялись, и вычислялся тестовый ПС. Результаты кроссвалидации показаны на рисунке 5. Наилучшие результаты здесь также показывает способ вычисления ПС по АКО.

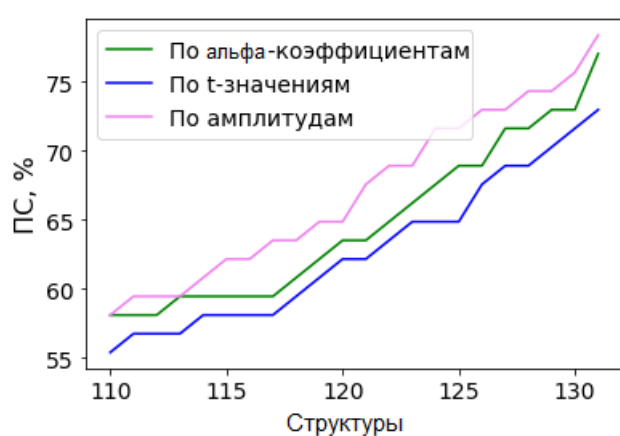


Рисунок 4 — Метрика ПС, полученная с помощью различных способов обработки фМРТ-сигнала, для структур мозга. Структуры отсортированы по возрастанию ПС, приведены только наиболее информативные структуры

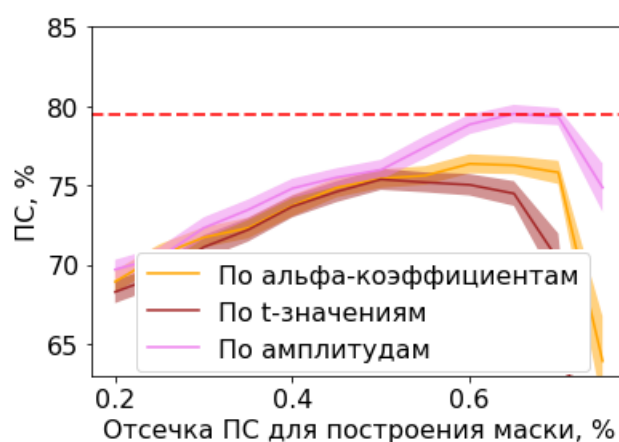


Рисунок 5 — Кроссвалидационная оценка ПС (число итераций 300 для каждой точки), показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок ($p \leq 0,05$)

Для выявления наиболее информативных интервалов (эпох) анализа были построены распределения ПС в зависимости от времени начала и длительности эпохи. Полученные распределения для ТСИ ($n=76$) приведены на рисунке 6 (расшифровка сокращений и перевод названий структур см. в [приложении А](#) диссертации).

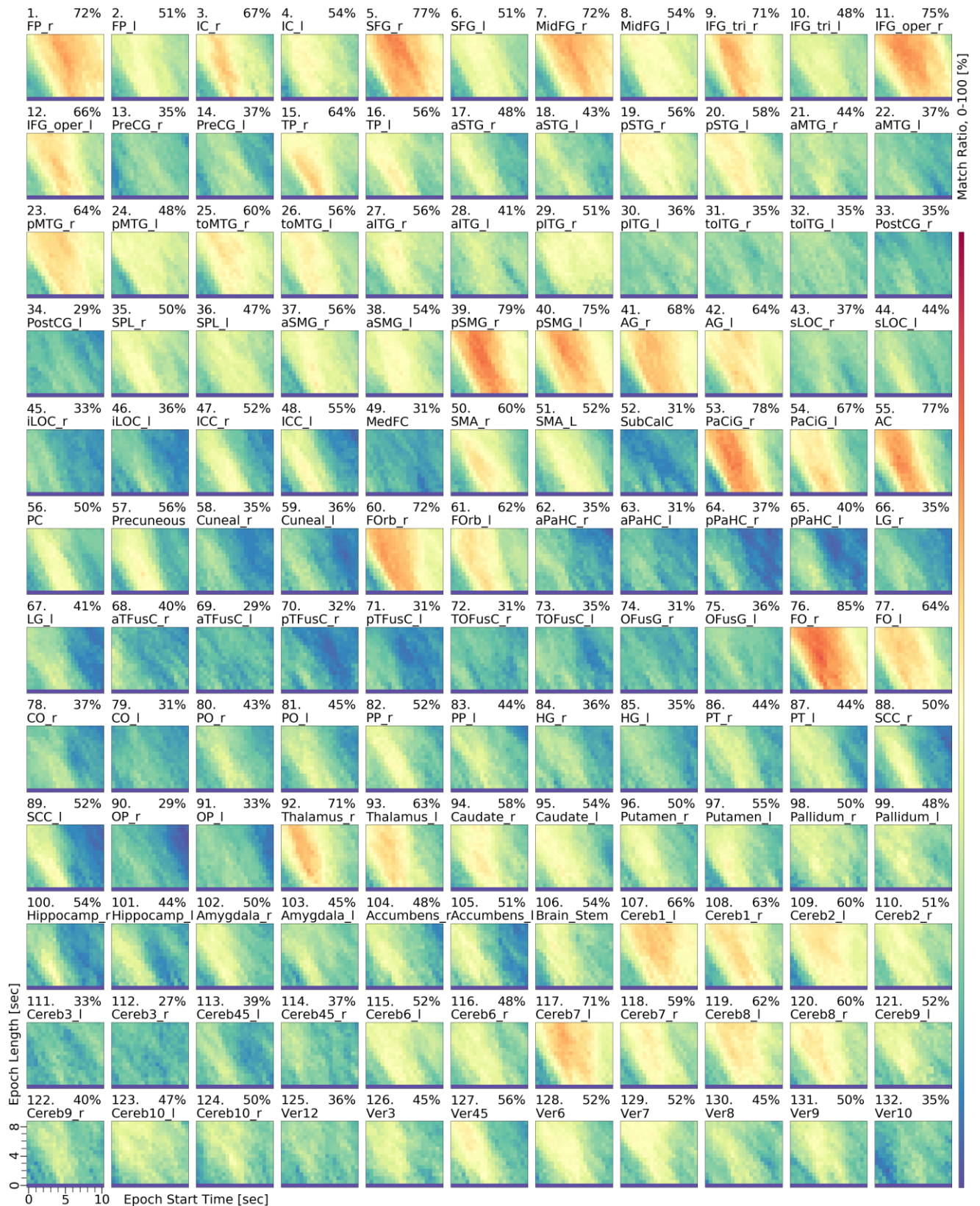


Рисунок 6 — Распределение ПС (кодируется цветом) при варьировании начала и длительности эпохи усреднения фМРТ-сигнала в структурах мозга. Тест ТСИ, $n=74$. По горизонтали отложено время начала эпохи усреднения от отметки предъявления стимула (макс. 10 с), по вертикали — длительность эпохи усреднения (макс. 8 с). Числами указан максимальный ПС для каждой структуры

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 по шкале времени по сравнению с лобными областями коры больших полушарий.

По рисунку 6 можно выделить наиболее информативные структуры: *лобная оперкулярная кора* (номера на рисунке — 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 (по метрике ПС). Среди подкорковых структур следует отметить *таламус* (92, 93), *каудальное ядро* (94, 95) и ряд структур *мозжечка*.

По результатам, изложенным в **главе 4**, можно сделать вывод о том, что предложенный способ анализа фМРТ-данных с помощью АКО, не претендуя на универсальность, в рассмотренной задаче имеет сопоставимые с GLM характеристики, и потому может использоваться для дальнейшего анализа данных, проведенного в **главе 5**. 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.

В **главе 5 «Результаты МРТсП-фМРТ-исследования процессов актуализации памяти человека»** 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 фактора субъективной значимости актуализируемой информации.

Вначале были построены графики усредненных сигналов КГР и инвертированной огибающей (по методу Гильберта) ФПГ (ИО ФПГ) (рисунок 7). Аналогичные кривые были построены для мужской и женской выборок отдельно (см. в основном тексте диссертации). Для общей выборки ($n=46$) данные нормировались на общее для ТСИ и ТЗВ стандартное отклонение (для каждого участника эксперимента отдельно), полученное путем усреднения стандартных отклонений в ТСИ и ТЗВ. Нормировка на общий нормировочный коэффициент позволяет избежать искажения соотношений амплитуд сигнала между двумя сеансами записи и сравнить тесты между собой. Для вычисления $d_{\text{Козна}}$, напротив, стандартное отклонение S_d считалось не по участнику эксперимента, а по выборке, но при этом также объединялось между тестами (Cohen, 1988).

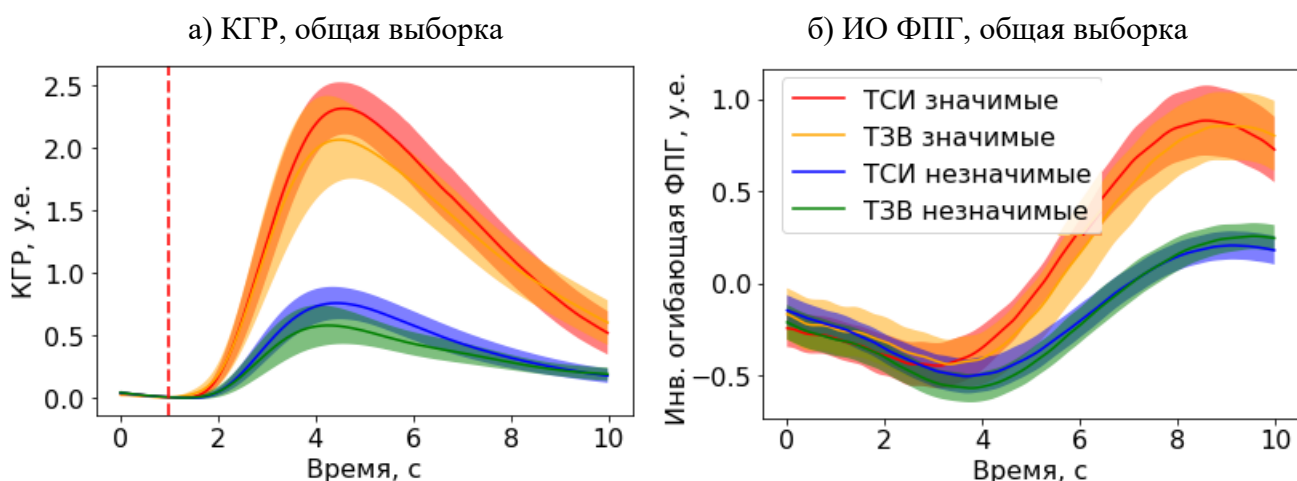


Рисунок 7 — Графики усредненных ненормированных сигналов КГР (а) и ИО ФПГ (б) для общей выборки ($n=46$), нормированные на общее стандартное отклонение сигналов, усредненное по тестам ТСИ и ТЗВ. Заливкой показаны доверительные интервалы на уровне двух стандартных ошибок ($p \leq 0,05$). Пунктирной линией показана точка приведения сигналов КГР к базовому значению. Сигналы ИО ФПГ показаны без приведения к базовому значению

Далее вычислялись АКО амплитуды сигнала и сравнивались по фактору субъективной значимости актуализируемой информации (таблица 2).

Таблица 2 — Сравнение актуализации значимой и незначимой информации

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

Далее АКО сопоставлялись по фактору времени приобретения актуализируемой информации — сравнение ТСИ и ТЗВ (таблица 3).

Таблица 3 — Сравнение ТСИ и ТЗВ

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

По результатам было выявлено, что с субъективной значимостью актуализируемой информации связано существенное повышение амплитуды активаций по сигналам КГР и ФПГ. Различия являются статистически значимыми ($p \leq 0,001$). Размер эффекта субъективной значимости актуализируемой информации 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 значимой и незначимой информации на выборке.

Сравнение тестов ТСИ и ТЗВ (рисунок 7 и таблица 3) не показало статистически значимых различий по амплитуде сигналов КГР и ФПГ. Средний размер эффекта по Коэну составляет примерно 0,07, что много меньше эффекта субъективной значимости информации (1,45). Это значит, что указанные сигналы малочувствительны к времени приобретения материала памяти по сравнению с субъективной значимостью актуализируемой информации. Такие результаты могут объяснять, почему в работе М.Г. Колбеновой не была выявлена связь между возрастом формирования систем и сигналом КГР (Колбенева М.Г., 2013). Полученные результаты также говорят о том, что эффект привыкания между сессиями ТСИ и ТЗВ был несущественным в контексте данной работы.

Кроссвалидационная проверка на отдельных выборках (мужской и женской) показала воспроизводимость указанных закономерностей. При этом было показано, что амплитуда активаций по КГР и ФПГ у мужчин выше, чем у женщин (средний размер эффекта составил 0,9).

Анализ фМРТ-данных проводился стандартным способом с помощью GLM в пакете FSL и при помощи разработанных автором методов оценки и визуализации сигнала: АКО амплитуды фМРТ-сигнала; метрике ПС, показывающей возможность различения значимой и незначимой информации по физиологическому сигналу и, соответственно, выявляющей информативность этого сигнала в отношении субъективной значимости.

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.

На рисунке 3 выше приведены результаты визуализации фМРТ-сигналов, усредненных по структурам мозга, для субъективно значимой (красный цвет) и незначимой (синий цвет) информации. Приведены данные по ТСИ и общей выборке $n=74$. 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);

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 3). 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 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 3) можно выделить несколько составляющих сигнала. Ранняя компонента (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 при актуализации значимой и незначимой информации. Затем, однако, в затылочной коре (включая *латеральную затылочную кору* и *клиновидную кору* — номера 45-46 и 58-59 по рисунку 3) наступает резкий спад сигнала. Характерно, что этот спад связан только с субъективно значимыми стимулами, а для нейтральных стимулов 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). 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).

Кроссвалидационное сопоставление мужской и женской подвыборок в целом подтверждает описанные выше выводы, при этом были замечены небольшие различия между выборками. Было показано, что у женской выборки фМРТ-сигнал в целом меньше по амплитуде и менее дифференцирован 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). Данные по более крупным единицам — объединению левосторонних и правосторонних частей наиболее информативных областей коры и объединению левосторонних и правосторонних частей подкорковых структур — не показали статистически значимых различий. Соотношение активности между правосторонними и левосторонними структурами, а также соотношение между корой и подкорковыми структурами у мужской и женской выборки не достигают статистически значимого уровня.

Далее было выполнено сопоставление активаций в тестах ТСИ и ТЗВ, моделирующих актуализацию информации, различающейся по времени приобретения. При анализе фМРТ-данных обнаружилась несколько большая амплитуда сигнала в ТСИ (т.е. при актуализации информации, приобретенной в более ранние периоды жизни — при актуализации более старого индивидуального опыта) в некоторых 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 ядре*. Эти различия достигают статистической значимости только при актуализации субъективно незначимой информации. Можно предположить, что фактор субъективной значимости маскируют более тонкие эффекты, связанные с временем приобретения памяти, например, в результате насыщения сигнала.

Для более детального анализа формы сигнала далее выполнена визуализация в более крупном масштабе с усреднением сигнала по группам структур мозга. На рисунке 8 показаны сигналы для выявленных ранее «информативных» областей коры, вторичных слуховых областей и первичной слуховой коры (*извилины Гешля*).

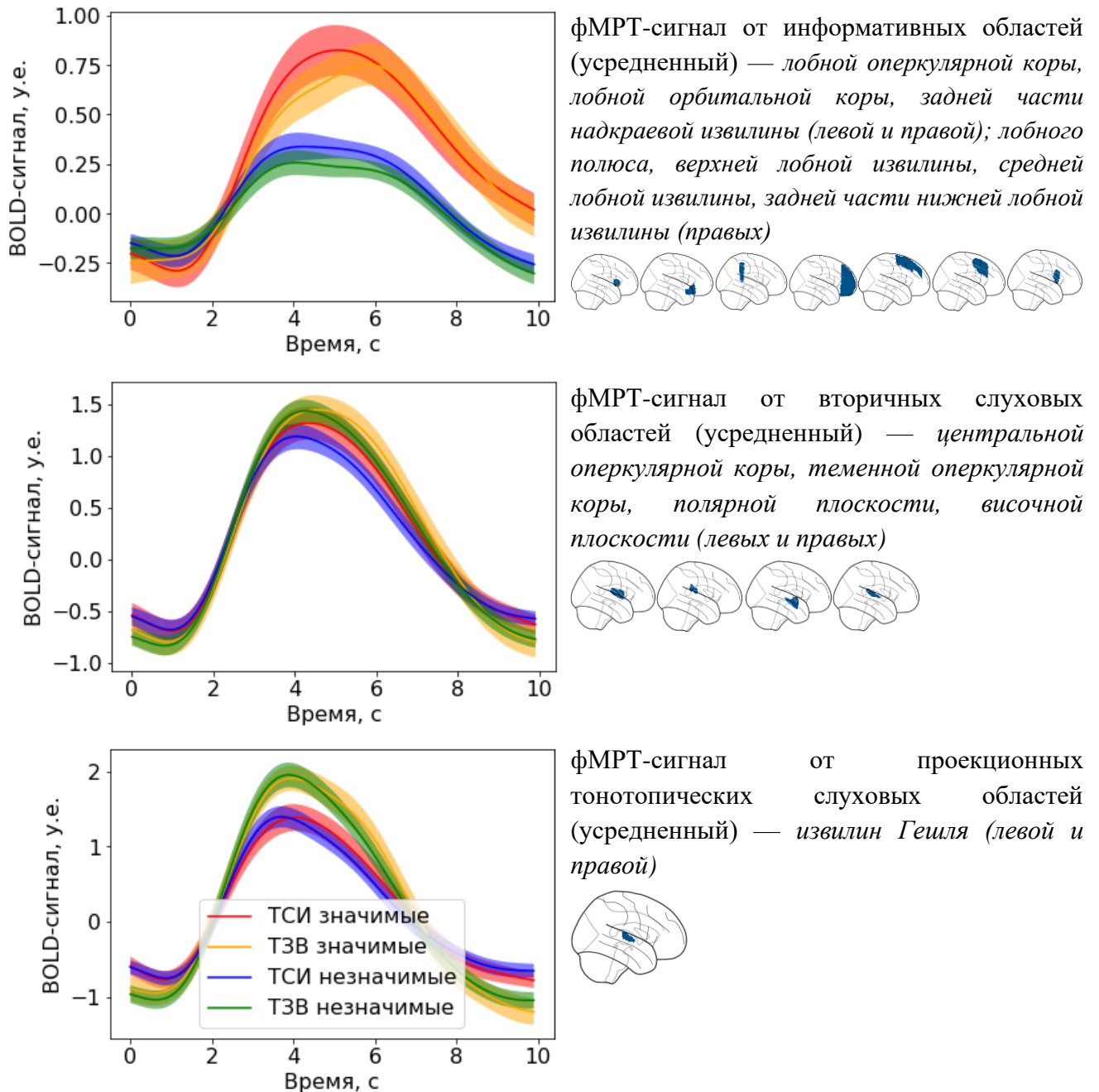


Рисунок 8 — фМРТ-сигналы, усредненные по группам областей коры больших полушарий мозга (сопоставление названий см. в приложении А), $n=46$, заливкой показаны доверительные интервалы по уровню двух стандартных ошибок ($p \leq 0,05$)

По рисунку 8 (верхнее изображение) было замечено, что в информативных ассоциативных областях коры сигнал разделяется по фактору субъективной значимости, но практически совпадает по фактору времени приобретения материала памяти человеком (ТСИ-ТЗВ). Это значит, что различия по времени приобретения материала памяти носят более тонкий характер (ниже проанализированы различия межполушарной асимметрии по этому фактору).

В извилине Гешля (рисунок 8, нижнее изображение), напротив, разделение происходит, вероятно, по акустическим свойствам сигнала (длительность,

громкость и т.д.) в ТСИ и ТЗВ, при этом во вторичных областях (среднее изображение) различия сглаживаются. Рассмотренное выше (см. пункт «в») некоторое повышение амплитуды сигнала при актуализации значимой информации в некоторых первичных и вторичных областях слуховой коры проявляется при рассмотрении каждой области отдельно (по рисунку 3 выше).

При группировке структур было обнаружено, что суммарная активность 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.

Анализ фМРТ-данных по метрике ПС. В [главе 3](#) выше метрика ПС использовалась в качестве оптимизационного критерия при сравнении способов обработки данных (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 (в данном случае — субъективной значимости этой информации). 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; а также нормировка не влияет на результат в единицах ПС, если она была проведена.

Один из наиболее интересных результатов был получен при использовании метрики ПС для сравнения ТСИ и ТЗВ. Вначале было выполнено воксельное сравнение. Результаты приведены на рисунке 9. 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.

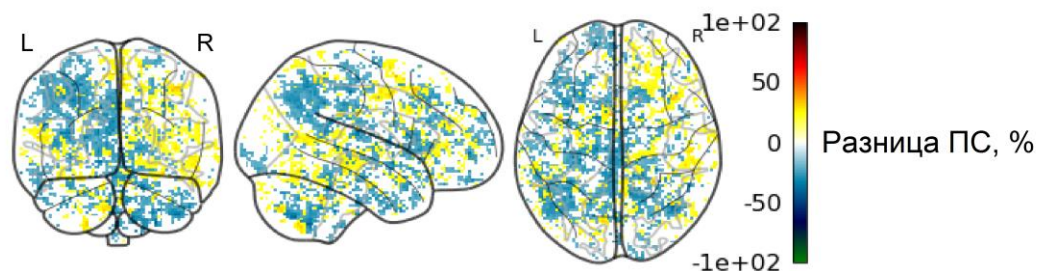


Рисунок 9 — Сравнение ТСИ и ТЗВ по метрике ПС (контраст: «ТСИ минус ТЗВ», пороги по z -статистике долей на уровне $p \leq 0,05$). Отрицательные значения ПС соответствуют большим значениям ПС в ТЗВ

Была замечена тенденция, что в тесте ТЗВ (моделирует актуализацию новой информации) происходит большая дифференциация актуализируемой

информации по уровню субъективной значимости в структурах левого полушария мозга, 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. Активность контрлатерального полушария мозжечка (см. рисунок 9 слева) также соответствует этому выводу.

Этот результат согласуется с представлениями ряда авторов (отмеченными в обзоре литературы) о том, что левое полушарие коры головного мозга связано с запоминанием новой информации (особенно семантической), а правое отвечает за более онтогенетически старую память. 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).

Чтобы проверить приведенные выше утверждения прямым статистическим сравнением, требовалось выполнить анализ одновременно по нескольким измерениям: а) сопоставление левосторонних и правосторонних структур; б) сопоставление корковых и подкорковых структур; в) сравнение ТСИ и ТЗВ. Эта задача была решена путем понижения размерности с помощью объединения данных — вначале размеры эффекта объединялись по одному из измерений, а затем производилось статистическое сравнение полученных оценок. Исходные размеры эффекта могут вычисляться как в исходных единицах измерения, так и в относительных единицах разброса данных (по Коэну или другими способами). Далее приводится анализ по размеру эффекта в исходных единицах измерения (ПС), которые не зависят от теста или физиологического параметра.

Чтобы выполнить понижение размерности, вычислялась разница между метриками ПС для правосторонних и левосторонних структур по формуле

$$D_{\text{ПЛ}} = \text{ПС}_{\text{П}} - \text{ПС}_{\text{Л}} \quad (1)$$

где $\text{ПС}_{\text{П}}$ — значение метрики ПС в правосторонней структуре;
 $\text{ПС}_{\text{Л}}$ — значение метрики ПС в левосторонней структуре.

Значение $D_{Пл}$ вычислялось отдельно для тестов ТСИ и ТЗВ, а также вычислялся размер эффекта по разнице между полученными для ТСИ и ТЗВ индексами (см. таблицу 4).

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. В этой таблице сортировка выполнена по p -значению, и данные отобраны по уровню $p \leq 0,05$.

Таблица 4 — Сравнение ТСИ и ТЗВ по разнице между правосторонними и левосторонними структурами мозга по метрике ПС

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 (верхняя часть латеральной затылочной коры)	2	-4	6	0,004
76. FO_r — 77. FO_l (лобная оперкулярная кора)	16	4	12	0,006
5. SFG_r — 6. SFG_l (верхняя лобная извилина)	12	6	6	0,016
1. FP_r — 2. FP_l (лобный полюс)	6	1	5	0,033
47. ICC_r — 48. ICC_l (внутренняя шпорная кора)	4	-3	7	0,035
7. MidFG_r — 8. MidFG_l (средняя лобная извилина)	9	2	7	0,038
39. pSMG_r — 40. pSMG_l (задняя часть надкраевой извилины)	4	-4	8	0,043
120. Cereb8_r — 119. Cereb8_l (мозжечок, область 8)	-3	4	-7	0,009
110. Cereb2_r — 109. Cereb2_l (мозжечок, область 2)	-10	-3	-7	0,016
118. Cereb7_r — 117. Cereb7_l (мозжечок, область 7)	-5	3	-8	0,018

Результаты в таблице 4 показали, 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 ожидаемо противоположное направление различий по сравнению с корой больших полушарий, что объясняется отсутствием контрлатеральности у мозжечка — проводящие пути мозжечка либо не скрещиваются, либо скрещиваются дважды, в отличие от неокортекса, из-за чего правое полушарие мозжечка связано преимущественно с левым полушарием неокортекса.

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. 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.

Выводы по результатам работы:

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 ставит под сомнение корректность анализа таких сигналов с помощью стандартного гемодинамического ответа. 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 уровню ее субъективной значимости структурами левого полушария мозга (и 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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах перечня ВАК РФ по специальности 5.3.2 психофизиология (психологические науки)

1. 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.

2. 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.

3. Малахов Д.Г. Сопоставление статистического параметрического и амплитудного подходов к картированию фМРТ-данных при помощи объективного критерия // Вестник психофизиологии. — 2024. — № 1. — С. 48-56.

4. 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.

Публикации в изданиях, включенных в базы данных Scopus и WoS

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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*. — 2021b. — V. 1310. — P. 149-155.

9. 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.

Результаты интеллектуальной деятельности

10. 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.

11. 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.

12. 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.

Статьи в других рецензируемых изданиях

13. 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. — № 12. — С. 50-60.

14. Холодный Ю.И., Карташов С.И., Малахов Д.Г., Орлов В.А. Нейрокогнитивные механизмы криминалистической диагностики у человека скрываемой им информации. Первый Национальный конгресс по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике // Девятая международная конференция по когнитивной науке. Сборник научных трудов. В двух частях. — Москва, 2021. — С. 825-828.

ПЕРЕЧЕНЬ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

GLM	General Linear Model (обобщенная линейная модель)
ICA	Independent Component Analysis (метод независимых компонент)
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