

На правах рукописи

СТАРЧЕНКО

Мария Григорьевна

**МОЗГОВАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ВЕРБАЛЬНОГО ТВОРЧЕСКОГО
МЫШЛЕНИЯ**

Специальность: 03.03.01 – физиология

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

доктора биологических наук

Санкт-Петербург

2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт мозга человека им. Н.П. Бехтерева Российской академии наук.

Научный консультант:

Наталья Петровна Бехтерева, академик РАН

Официальные оппоненты:

Иваницкий Георгий Алексеевич, доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории высшей нервной деятельности человека Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии Российской академии наук

Черниговская Татьяна Владимировна, доктор биологических наук, доктор филологических наук, профессор, член-корреспондент РАО, заведующая кафедрой проблем конвергенции естественных и гуманитарных наук Санкт-Петербургского государственного университета, профессор кафедры общего языкознания Санкт-Петербургского государственного университета

Шеповальников Александр Николаевич, доктор медицинских наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории нейрофизиологии ребенка Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физиологии им. И.П. Павлова Российской академии наук.

Защита состоится «21» июня 2018 года в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.232.10 по защите докторских и кандидатских диссертаций на базе ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9, аудитория № 3011 (90).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке им. М. Горького ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет» по адресу: 199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб. 7/9 и на сайте Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: <https://disser.spbu.ru/files/disser2/disser/vZJY5nYZCg.pdf>

Автореферат разослан «____» _____ 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор биологических наук, профессор

Алексеев Н.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из важных научных проблем является изучение нейрофизиологической организации обеспечения высших видов психической деятельности человека. Актуальность подобного рода исследований обусловлена, в первую очередь, очевидной важностью изучения работы мозга человека, необходимостью фундаментального понимания того, как соотносится мозг и психика человека, какие принципы мозговой функциональной организации лежат в основе базовых характеристик высших видов психической деятельности, как рождается новое знание в человеческом мозге. Прогресс в понимании базовых механизмов работы мозга человека и его функциональной организации, помимо развития знаний о природе человека, необходим для трансляции полученных результатов фундаментальных исследований в клиническую практику, для разработки конкретных способов повышения эффективности методов диагностики и лечения и связан с целым рядом социально значимых областей деятельности. На современном этапе развития наших знаний о человеческом мозге имеется большое количество данных о локализации мозговых структур, обеспечивающих различные психические функции в мозге, и в некоторых случаях, данные об особенностях функционального взаимодействия между ними. Однако представления о механизмах и принципах работы мозга при реализации высших интегративных когнитивных видов деятельности значительно скромнее. Тем не менее, для большинства высших психических функций человека, таких как речь, внимание, эмоции и т.д. существуют непротиворечивые физиологические гипотезы реализации мозгом данных функций.

Иная ситуация складывается с изучением нейрофизиологических основ самого высокоорганизованного и самого «человеческого» вида деятельности - творческого мышления (или креативности). На данный момент существует большое количество различных определений термина «творчество», «творческое мышление», «креативность». На наш взгляд, наиболее четко передает смысл данного термина определение творчества как способности индивида порождать новые, необычные и полезные (применимые) идеи, отклоняться в мышлении от стереотипов и традиционных схем.

Сейчас изучение особенностей мозгового обеспечения творческого мышления является одним из важных направлений современной психофизиологии. Но несмотря на большое количество нейрофизиологических работ по исследованию мозговых коррелятов творчества, до сих пор не существует единой концепции мозговой организации творческой деятельности и ее нейрофизиологических механизмов. До последнего времени большинство исследователей пыталось изучать процесс творческого мышления без учета его временных и качественных особенностей, что привело к тому, что в настоящий момент большинство нейрофизиологических данных, полученных разными исследователями, пока не удается согласовать между собой и построить целостную картину мозгового обеспечения творческого процесса.

В такой ситуации ясно, что дальнейшее исследование мозгового обеспечения творчества в данном ключе бесперспективно и требует иного подхода, который позволил бы раскрыть именно механизмы работы мозговых систем при творчестве. Творческое мышление является наиболее сложным и высокоорганизованным видом деятельности, в наименьшей степени стереотипизированным и поддающимся алгоритмизации. Поэтому понимание принципов и механизмов организации мозгом этого самого сложного и самого человеческого вида деятельности может повлечь за собой прогресс не только в понимании базовых механизмов работы мозга человека и его функциональной организации, но и в целом ряде социально значимых технологий – развитие искусственного интеллекта (см., например, Атанов М.С., Иваницкий Г.А., Иваницкий А.М., 2016), новые когнитивные технологии в

сфере образования (Шеповальников, 2016), искусства (Черниговская, 2016), медицины, адаптации психики человека к быстро меняющимся условиям среды и т.д.

Таким образом, разработка подхода, учитывающего сложность, временные и качественные особенности творческого мышления, и формулирование на основе получаемых экспериментальных данных непротиворечивой концепции мозговой организации творческой деятельности является актуальной теоретической и практической задачей, что является новым шагом в понимании не только механизмов собственно творческой деятельности, но и фундаментальных принципов работы мозга человека в целом.

Степень разработанности темы исследования. В отечественной и зарубежной психологии высказывались самые различные взгляды на сущность (т.е. что лежит в основе творческого мышления), свойства и особенности творческого процесса, дискутировались вопросы об особенностях творческой личности, о возможности воспитания творческих способностей, о критериях креативного продукта, о связи творческой способности человека с интеллектом, воображением и другими психическими функциями (такими, как, например, внимание, память, наблюдательность, скорость реакции). Наиболее известные психологические теории творчества связаны с именами Гилфорда, Медника, Торренса, Амабайл, Стернберга, Любарта, Выготского, Брушлинского, Богоявленской, Пономарева, Шадрикова, Мелик-Пашаева и др. исследователей.

Несмотря на отсутствие единой концепции, психология творчества достаточно хорошо и подробно изучена для того, чтобы служить базисом для развития нейрофизиологических исследований мозговой организации креативности. Можно считать, что систематическое изучение нейрофизиологических основ творческой деятельности в мире началось в 70-х годах 20 века. К настоящему моменту, все полученные нейрофизиологические данные о творческом мышлении можно разделить на две большие группы: 1) нейрофизиологические данные, полученные на здоровых добровольцах, выполнявших задачи, включающие в себя различные компоненты творческого мышления и 2) клинические данные, полученные при анализе больных с различными мозговыми поражениями и психическими заболеваниями. При этом, как упоминалось выше, несмотря на большое количество нейрофизиологических работ по исследованию мозговых коррелят творчества, данные их являются в значительной степени противоречивыми, и исследователи находят мозговые корреляты выполняемых творческих заданий практически в любой области мозга (для обзора см., например, Dietrich&Kanso, 2010; Jung et al, 2013; Pidgeon et al, 2016), что не позволяет на данный момент интегрировать все полученные экспериментальные данные в какую-либо целостную (общую) и непротиворечивую концепцию для понимания мозговых механизмов обеспечения творческой деятельности. Поэтому очень важно проводить комплексные нейрофизиологические исследования, которые могли бы помочь созданию подобной концепции.

Методология и методы исследования. Методология нашего исследования в основном базируется на выдвинутых академиком Н.П. Бехтеревой теориях об основополагающих механизмах работы мозга, таких как теория организации любого вида деятельности мозговой системой звеньев различной степени жесткости (Бехтерева, 1974, 1985, 1988) и теория мозговой системы детекции ошибок (Bechtereva&Gretchin, 1968).

На основе этой методологии в первую очередь необходимо прояснить, какие области мозга являются наиболее вероятными кандидатами на роль «жестких» звеньев системы обеспечения определенных видов творческого мышления и как они взаимодействуют в процессе творчества с «гибкими» звеньями, зависящими от определенных факторов, таких как качественные и временные особенности самой творческой деятельности и личностные особенности индивидов. Выяснение данного вопроса позволит в значительной степени объяснить наличие многочисленных противоречивых и отрывочных экспериментальных

данных, описанных в литературе к сегодняшнему моменту. Во-вторых, поскольку творческая деятельность является принципиально нестереотипной деятельностью, то ее целесообразно рассматривать во взаимодействии с базовым мозговым механизмом детекции ошибок. Мышление и память человека создает базис для творческого поиска, и в то же время содержит матрицы устойчивых стереотипов, облегчающих существование индивида в привычной (ежедневной) среде. Рассогласование с релевантными матрицами вызывает активизацию мозгового механизма детекции ошибок. Исходя из представлений о функциональной роли механизма детекции ошибок, можно предположить, что механизм детекции ошибок в процессе творчества может как оптимизировать творческую деятельность, так и затруднять ее. Оптимизация творческой деятельности может быть связана с выбором наилучшего решения среди других возникающих вариантов. Затрудняющая роль – с трудностью или невозможностью принять нестандартные варианты решения задачи, поскольку детектор ошибок контролирует отклонение от стандартного, стереотипного плана, т.е. как бы находится в конфликте с творческим вариантом мыслительной деятельности.

Принимая во внимание наши экспериментальные данные и концепцию динамического системообразования мозговых систем, разработанную академиком РАН С.В. Медведевым (С.В. Медведев, С.В. Пахомов, 1987), следует ожидать, что мозговая система обеспечения творчества будет принципиально более динамична, по сравнению с другими видами деятельности, в том числе и для одного и того же вида творческого процесса, и может характеризоваться различной пространственно-временной организацией. Из этого предположения вытекает отличие нашего подхода от ранее использовавшихся парадигм при исследовании мозговой организации творчества.

Предлагаемый нами подход отличается одновременным учетом ряда особенностей. Во-первых, это учет индивидуальных, в том числе и личностных, особенностей индивидов. Если другие психические функции, такие как речь, например, обеспечиваются мозгом более-менее одинаково у всех людей, то творческое мышление, по сравнению с другими психическими процессами, может существенно зависеть от ряда личностных особенностей индивидов. Во-вторых, это учет временных особенностей творческой деятельности. Любая деятельность состоит из ряда последовательных временных этапов, однако творческая деятельность обладает большим разнообразием этапов, чем нетворческая деятельность. Поэтому использовавшееся ранее в большинстве подобных исследований определение (понимание) творчества, как достаточно однородного процесса, без учета особенностей его временных этапов, не является достаточно адекватным. С нашей точки зрения, адекватным является понимание творческого мышления как процесса, особым образом развивающегося на каждом временном этапе (в отличие от других психических процессов - внимания, восприятия и т.д.), что может зависеть от типа творческой задачи и индивидуальных особенностей (т.е. принципиальным отличием творческого мышления является отсутствие стереотипного пути его обеспечения). В-третьих, это учет качественных особенностей творческой деятельности (т.е. типа (вида) творчества). Представляется, что для каждого типа творческого процесса может существовать свой специфический баланс процессов обработки информации, получаемой из внешних (сенсорные каналы) и внутренних источников (память, механизм детекции ошибок, и т.п.), и каждый тип творческого процесса может характеризоваться различной направленностью внимания, работой памяти, мышления, восприятия и т.п. Мы полагаем, что подобный подход является в наибольшей степени соответствующим накопленным к настоящему моменту в психофизиологии творчества экспериментальным данным. В-четвертых, применение полиметодического подхода (Н.П. Бехтерева, 1974, 1985, 1988) позволяет взаимодополнить и взаимоподтвердить нейрофизиологические данные, получаемые с помощью разных методов, поскольку

творчество как самый сложный и высокоорганизованный вид когнитивной деятельности как ни один другой вид деятельности требует для понимания своих механизмов как сочетания комплекса различных методов (психологических и физиологических (ЭЭГ, ПЭТ, фМРТ)), так и их адекватной интерпретации. При этом исследования, комбинирующие нейровизуализационные и электрофизиологические исследования с использованием одних и тех же тестовых заданий, являются адекватным подходом для исследования творческого мышления, и любое расхождение в результатах, полученных разными методами, может быть даже более информативным, чем их совпадение из-за принципиальных различий в измеряемой активности (Bechtereva et al, 2007).

Использование вышеописанной методологии и данного подхода позволило сформировать на основе полученных нами экспериментальных данных непротиворечивую концепцию мозговой организации вербальной творческой деятельности, что является принципиально новым шагом в понимании механизмов собственно творческой деятельности, а отсюда и фундаментальных принципов работы мозга человека в целом.

Цель исследования. Формулирование непротиворечивой концепции мозгового обеспечения вербальной творческой деятельности и выявление ее базовых механизмов на основе использования предложенного нами подхода, учитывающего временные и качественные особенности собственно творческой деятельности, а также индивидуальные психологические особенности испытуемых, используя ЭЭГ, ПЭТ и фМРТ-методы.

Основные задачи исследования:

1. Разработать и апробировать наборы оригинальных тестовых заданий, учитывающих временные и качественные особенности вербальной творческой деятельности.

2. Провести нейрофизиологические (ЭЭГ, ПЭТ, фМРТ) исследования с использованием разработанных наборов задания у лиц с разным уровнем развития творческих способностей, в том числе у лиц, обладающих определенным типом творческих способностей (актеры).

3. Изучить влияние личностных (уровень развития творческих способностей) и профессиональных (актеры) особенностей индивида на мозговую специфику реализации творческой деятельности.

4. Выявить «жесткие» и «гибкие» звенья мозговой системы обеспечения вербальной творческой деятельности и определить характер функциональных взаимодействий между различными элементами мозговой системы обеспечения вербальной творческой деятельности.

6. Исследовать характер влияния мозгового механизма детекции ошибок на систему обеспечения вербальной творческой деятельности.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Показано, что при вербальном творческом мышлении происходит активация практически всех областей мозга.

2. Локализованы зоны мозга, находящиеся преимущественно в лобном и теменном отделах, являющиеся наиболее вероятными кандидатами на роль постоянных «жестких» звеньев мозговой системы обеспечения вербальной творческой деятельности.

3. Локализовано большое количество «гибких» звеньев мозговой системы обеспечения вербальной творческой деятельности и установлена их зависимость от различных факторов, таких как тип творческой задачи, этап творческого процесса, уровень развития творческих способностей индивида.

4. Раскрыт амбивалентный характер функциональных взаимодействий «жестких» звеньев обеспечения творческой деятельности: наблюдается как ослабление, так и усиление взаимодействий между теменной и префронтальной корой. При этом, ослабление функционального взаимодействия между лобными и теменными зонами в процессе

творчества рассматривается как уменьшение влияния системы детекции ошибок и когнитивного контроля, а усиление взаимодействий – как вовлечение всех когнитивных ресурсов, интенсификация мыслительных процессов для решения творческой задачи без явного стереотипа в своем условии.

4. Показана роль базового мозгового механизма детекции ошибок в процессах вербального творческого мышления. В случае, когда реализация вербальной творческой деятельности тесно связана с преодолением стереотипа детектор ошибок конфронтирует с творческим вариантом мыслительной деятельности, выступая как ограничитель, что отражается в ослаблении функциональных взаимодействий между передней поясной корой и лобными и теменными областями.

6. Определены различия мозговых паттернов обеспечения вербальной творческой деятельности у людей с разным уровнем развития творческих способностей, а также у лиц с определенным типом творческих способностей (актеры).

7. Показано, что тренировка, влияющая на успешность решения творческих задач, меняет характер вовлечения различных областей мозга при вербальной творческой деятельности.

Научная новизна. Сформулирована на основе полученных экспериментальных данных непротиворечивая концепция организации мозгом вербальной творческой деятельности, что является новым шагом в понимании нейрофизиологических основ собственно творческой деятельности, а отсюда и фундаментальных принципов работы мозга человека в целом. Предложен новый подход к исследованию творческой деятельности, учитывающий ее временные и качественные особенности, а также личностные особенности индивидов. Локализованы «жесткие» звенья мозговой системы, обеспечивающей реализацию вербальной творческой деятельности, и впервые раскрыт двойственный характер их функциональных взаимодействий в процессе творческой деятельности: наблюдается как ослабление, так и усиление взаимодействий между теменной и префронтальной корой. При этом, ослабление функционального взаимодействия между лобными и теменными зонами в процессе творчества рассматривается как уменьшение влияния системы детекции ошибок и когнитивного контроля, а усиление взаимодействий – как вовлечение всех когнитивных ресурсов, интенсификация мыслительных процессов для решения творческой задачи без явного стереотипа в своем условии. Определена локализация "гибких" звеньев данной системы, включающихся/не включающихся в работу в зависимости от личностных особенностей индивидов и различных ситуационных факторов, таких как тип творческой задачи, этап творческого процесса и др. Показана роль базового мозгового механизма детекции ошибок в процессах творческого мышления. Показано влияние уровня развития творческих способностей на мозговые корреляты выполнения творческих заданий. Полученные данные имеют важное значение не только для фундаментальных исследований мозговых механизмов творческого мышления, но и для физиологических исследований системной организации мозга в целом.

Теоретическая и практическая значимость работы. Сформированная на основе полученных экспериментальных данных непротиворечивая концепция мозговой организации вербальной творческой деятельности является новым шагом в понимании механизмов собственно творческой деятельности, а отсюда и фундаментальных принципов работы мозга человека в целом. Предложенный новый подход к нейрофизиологическому исследованию творческого мышления, одновременно учитывающий как временные и качественные особенности самой творческой деятельности, так и личностные особенности индивидов, будет полезен для дальнейших целенаправленных теоретических и практических нейрофизиологических исследований творческой деятельности. Полученные данные позволяют наметить пути к созданию научно-обоснованного подхода к оптимизации

процессов творчества и путей развития творческого потенциала, а также интенсификации мыслительной деятельности у лиц с возрастными изменениями, что позволит продлить активное долголетие пожилого населения и увеличить сроки успешной профессиональной деятельности населения. Проведенные исследования мозговых механизмов творческой деятельности могут способствовать повышению резистентности и адаптационных возможностей человека к меняющимся условиям окружающего мира с учетом индивидуальных свойств личности, что позволит улучшить качество жизни, повысить адаптивные способности человека и его самореализацию в изменяющихся условиях жизни.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность и надёжность результатов обеспечена их анализом с опорой на фундаментальные теоретические и методологические положения нейрофизиологии и психологии; применением комплекса методов, адекватных цели и задачам исследования; репрезентативностью выборки; использованием корректных и современных методов качественного и статистического анализа данных. Материалы диссертационной работы докладывались в виде устных и стендовых докладов на международных и отечественных конференциях, в частности: 7th Annual Meeting Organization of Human Brain Mapping (Брайтон, Великобритания, 2001), 15th Annual Meeting Organization of Human Brain Mapping (Сан-Франциско, США, 2009), 16th Annual Meeting Organization of Human Brain Mapping (Барселона, Испания, 2010), 49th Annual Meeting Society for Psychophysiological Research (Берлин, Германия, 2009), 57th Annual Meeting Society for Psychophysiological Research (Вена, Австрия, 2017), 12 World Congress of Psychophysiology (Греция, Порто-Кавас, 2004), 15 World Congress of Psychophysiology (Будапешт, Венгрия, 2010), 16 World Congress of Psychophysiology (Пиза, Италия, 2012), 17 World Congress of Psychophysiology (Хиросима, Япония, 2014), 18 World Congress of Psychophysiology (Гавана, Куба, 2016), 7th FENS Forum (Амстердам, Нидерланды, 2010), 11th International Conference on Cognitive Neuroscience (Майорка, Испания, 2011), 1 Съезд физиологов СНГ (Сочи, Россия, 2005), 3 Съезд физиологов СНГ (Ялта, Украина, 2011), 5 Съезд физиологов СНГ (Сочи, Россия, 2016) и др. Большая часть исследований, проводившихся в рамках данной работы, осуществлялась при поддержке отечественных научных фондов: РФФИ №№ 98-04-48960, 00-04-48615а, 03-04-49394а, 06-04-48797а, 12-04-01739а, РГНФ № 12-04-01739а, РНФ № 16-18-00040.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 73 научные печатные работы, в том числе 2 главы в монографиях и 20 статей в реферируемых журналах, из них – 15 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, и 51 тезис международных и отечественных конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав (обзор литературы, методы исследования, результаты и их обсуждение), заключения, выводов и списка литературы, включающего 525 источников. Работа изложена на 336 страницах и содержит 8 таблиц и 24 рисунка.

Личный вклад автора в проведенное исследование. Работа является результатом многолетних (с 1998 г. по 2017 г.) исследований автора по указанной теме, которая была предложена для изучения академиком РАН Н.П. Бехтеревой в 1998 г. Все результаты, представленные на защиту, получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор предложил основную идею, цель и задачи исследования, разработал и апробировал оригинальные наборы психологических тестовых заданий, осуществил организацию и проведение исследований, принимал непосредственное личное участие в регистрации, обработке и анализе ЭЭГ, ПЭТ и фМРТ – данных, их интерпретации и оформлении результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1 Объект и методы исследования. Все исследования были одобрены Комитетом по Этике Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института мозга человека им. Н.П. Бехтеревой Российской академии наук. Во всех психофизиологических исследованиях приняли участие практически здоровые испытуемые, давшие информированное согласие на участие, с образованием не ниже среднего, все праворукие, согласно Единбургскому опроснику (Oldfield, 1971), для всех родным был русский язык. Перед проведением ЭЭГ, ПЭТ и фМРТ исследований испытуемые выполняли тренировочные задания - идентичные по типу задач с теми, которые затем использовались в основных исследованиях. Общее количество добровольцев, принявших участие во всех ЭЭГ, ПЭТ и фМРТ-исследованиях, составило 652 человека в возрасте от 18 до 32 лет.

1.1 Метод позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ). ПЭТ-исследования проводились с использованием ПЭТ-камеры PC 2048-15B Scanditronix (Швеция), позволяющей получать 15 последовательных горизонтальных «срезов» («слайсов») мозга, толщиной 6.5 мм каждый, с пространственным разрешением 5-6 мм в трех плоскостях (Holte, 1989). Обработка данных проводилась с использованием Statistical Parametric Mapping (SPM99 и SPM5), позволяющего проводить межсубъектное усреднение и статистическое оценивание достоверности изменения локального мозгового кровотока (лМК) по группе испытуемых. Обработка данных включала: 1) устранение артефактов, связанных с изменениями положения головы испытуемых между сканированиями; 2) пространственную стандартизацию ПЭТ-изображений, полученных от разных испытуемых и трансформацию их в эталонное изображение 3) пространственную фильтрацию для улучшения отношения сигнал/шум и коррекции на остаточную межсубъектную анатомическую вариабельность мозга (гауссовский фильтр 20 мм); 4) вычисление локальных различий (контрастов) в уровне активации между тестовыми состояниями по показателю относительных изменений скорости лМК 5) статистическое оценивание достоверности изменения лМК по группе испытуемых. Для всех контрастов был использован порог $p < 0.05$, corrected (корректированный на множественность сравнений). Для определения анатомической локализации областей мозга с увеличенным уровнем лМК использовалась программа пересчета координат и визуализации кластеров («Talairach Space Utility») в пространстве стандартного стереотаксического атласа (Talairach J., Tournoux P., 1988), разработанная к.физ.-мат. н. Пахомовым С.В Для анализа корреляционной связи между активацией структур мозга и количественными показателями креативности (беглость, гибкость) в SPM был использован анализ ковариат (ANCOVA). Показатель оригинальности был подсчитан как контраст (оригинальные ответы сравнивались с неоригинальными). При оценке статистической достоверности в анализе ковариат использовался порог $p < 0.05$, corrected.

1.2 Метод функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). фМРТ-исследования проводилось на магнитном томографе Philips Achieva, с напряженностью поля 3 Тесла. Перед проведением группового статистического анализа осуществлялась предварительная обработка и преобразование индивидуальных данных, включавшая: пространственное выравнивание к первому «динамическому скану» («realignment»), коррекция отличий во времени регистрации данных в разных срезах («slice time correction»), совместная регистрация функциональных изображений со структурными изображениями («coregistration»), нормализация изображений к стандартному анатомическому пространству, сегментация индивидуальных анатомических изображений на паттерны серого и белого вещества головного мозга, а также пространственное сглаживание функцией Гаусса размером $8 \times 8 \times 8$ мм (Friston, 2006). Для фМРТ-исследований предварительная обработка данных и построение статистических параметрических карт модели BOLD-сигнала проводились в программном пакете Statistical Parametric Mapping – SPM12

(<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm>), работающем в среде MATLAB (Mathworks Inc., Natick, MA, USA). На первом этапе статистического анализа рассчитывали параметры множественной регрессии с использованием t-контрастов для каждого сравнений и получали статистические параметрические карты параметров регрессии, которые использовались в качестве переменных на втором этапе анализа. Второй этап статистического анализа проводился с использованием многофакторной модели для повторных измерений (F-контрасты, Fullfactorial (SPM12)). Анализировались главные эффекты факторов и их взаимодействие. Для того чтобы избежать ложно положительных результатов, повоксельное построение статистических карт осуществлялось с порогом $p < 0.05$, с коррекцией на множественность сравнений по методу FDR (false discovery rate, (Genovese et al., 2002)). Для определения анатомической локализации выявленных кластеров использовался программный пакет Xjview (<http://www.alivelearn.net/xjview8/>). Оценка изменений функциональных взаимодействий для фМРТ-исследований осуществлялась с помощью анализа психофизиологических взаимодействий (PPI, psychophysiological interactions, Gitelman et al., 2003; McLaren et al., 2012). Для этих целей использовался программный пакет gPPI (generalized PPI toolbox (<http://www.nitrc.org/projects/gppi>)). Для каждого добровольца рассчитывались t-контрасты для анализируемых эффектов, связанных с «психофизиологическими взаимодействиями», а затем данные t-контрасты сравнивались на групповом уровне с учетом межсубъектной вариабельности. Повоксельное сравнение осуществлялось с порогом $p < 0.05$, скорректированным на множественность сравнений по методу FDR («False Discovery Rate», метод контроля доли ложных отклонений гипотез).

1.3 Метод электроэнцефалографии (ЭЭГ). ЭЭГ регистрировалась монополярно от 19 хлорсеребряных электродов (Fp1, Fp2, F7, F3, Fz, F4, F8, T3, C3, Cz, C4, T4, T5, P3, Pz, P4, T6, O1, O2), расположенных на поверхности головы по международной системе 10-20 в полосе пропускания 0-70 Гц посредством компьютерного электроэнцефалографа «Мицар-ЭЭГ» с частотой дискретизации 500 Гц. В качестве референтного использовался объединенный ушной электрод. Заземляющий электрод располагался на запястье левой руки. Визуализация, обработка и расчет количественных характеристик ЭЭГ проводились с использованием специализированного программного обеспечения WinEEG. При обработке записей использовался режекторный фильтр, настроенный на частоту 45-55 Гц, с полосой подавления 0,1 Гц. Вычислялись оценки абсолютной мощности спектральных составляющих ЭЭГ, усреднённых в следующих диапазонах: дельта (1,5-4 Гц), тета (4-7 Гц), альфа1 (7-10 Гц), альфа2 (10-13 Гц), бета1 (13-18 Гц), бета2 (18-30 Гц), гамма (30-40 Гц). Массивы полученных оценок, усредненных для каждого испытуемого в состоянии выполнения каждого из заданий, подвергались нормализации посредством стандартного логарифмического преобразования $Y = \log X$. При анализе средних значений параметров ЭЭГ по отведениям использовался дисперсионный анализ ANOVA с взаимодействиями $D \times S \times Z$, где D - фактор частотного диапазона, S - фактор состояния, Z - фактор зоны (отведения). Достоверность эффектов указанных факторов и их взаимодействия оценивалась с эпсилон-коррекцией Гринхауза-Гайссера (Greenhouse-Geisser correction). Различия мощности в отдельных зонах выявлялись при помощи post-hoc анализа с использованием LSD критерия Фишера. Статистически достоверными признавались различия с пороговой вероятностью ошибки 0,05.

1.4 Тестовые задания. Для успешного исследования такого сложного и высокоорганизованного вида человеческой деятельности, как творчество, необходимо использование адекватных экспериментальных моделей исследуемого процесса. Однако использование уже готовых, разработанных в психологии тестов в физиологических исследованиях является достаточно проблематичным по ряду причин (см., например, Абрахам, 2013), что диктует необходимость конструирования таких психологических тестов для психофизиологических исследований, которые бы отвечали бы как целям исследования,

т.е. адекватно моделировали бы творческий процесс, так и необходимым условиям корректного психологического теста, а также особенностям и ограничениям используемых физиологических методов. В первую очередь, важнейшим условием здесь остается валидность тестового задания, т.е. адекватность его содержания той деятельности, мозговая организация которой изучается. В наших исследованиях мы использовали следующие 2 типа валидности: критериальную и конструктивную. Критериальная валидность отражает связь результатов выполнения теста с независимо наблюдаемым критерием (им может быть и другой психологический тест, валидность которого известна и достаточно высока). Конструктивная валидность отражает степень представленности исследуемого свойства психики в результатах теста (т.е. насколько теоретические взгляды исследователя на природу изучаемого феномена могут быть представлены в виде некоего конструкта и быть использованными для объяснения получаемых в тесте результатов). Помимо этого, конструктивная валидность позволяет выбрать адекватные критерии оценки психологических результатов выполнения теста. Кроме вопроса о валидности основного тестового задания, важным является и вопрос о конструировании контрольных заданий, в которых бы изучаемая деятельность не присутствовала или присутствовала бы в заведомо меньшей степени. Эти условия необходимы при использовании анализа данных психофизиологических исследований по принципу "основное задание минус контрольное задание" (Petersen, 1988). В-третьих, целесообразно конструировать тестовые задания и оценивать результаты их выполнения испытуемыми более экологически валидным способом – в частности, на примере реальных профессиональных или жизненных ситуаций – в процессе сочинения историй, создания художественных образов и т. д. В-четвертых, важно, на наш взгляд, использовать метод контрастных групп – в частности, привлечение к исследованию лиц с изначально различным уровнем развития творческих способностей (высоко- и низкокreativeивные индивидуумы), а также привлечение испытуемых творческих профессий (например, студенты-актеры, осуществляющие систематическую сознательную тренировку творческих способностей). В-пятых, необходимо учитывать временные и качественные особенности любой творческой деятельности. Естественно, что любая деятельность состоит из ряда последовательных временных этапов, однако в данном русле творческая деятельность обладает гораздо большей специфичностью, чем нетворческая деятельность. Та же ситуация складывается и для типа творческой деятельности – представляется, что для каждого типа творческого процесса должен существовать свой специфический баланс процессов обработки информации, получаемой из внешних (сенсорные каналы) и внутренних источников (память, механизм детекции ошибок, и т.п.), и разные типы творческой деятельности могут характеризоваться различной направленностью внимания, работой памяти, мышления, восприятия и т.п. Таким образом, была разработана батарея взаимосогласованных тестовых заданий, которая освещала проблему творческого мышления, по возможности, со всех сторон (т.е. учитывала бы ее временную и качественную специфичность), и результаты выполнения которых можно было сравнивать между собой и была адекватна используемым нейрофизиологическим методам (их особенностями и ограничениям).

1.4.1 Задание "Рассказ". Тест состоял из основного задания, представленного в двух различных вариантах, и трех контрольных заданий, каждое из которых также было представлено в двух вариантах, и моделировал ситуацию процесса художественного творчества, в частности, сочинения (придумывания) рассказа. Стимульным материалом служили наборы из 16 слов (8 инфинитивов и 8 существительных единственного числа именительного падежа). В качестве основного тестового задания на креативность (задание D) было выбрано составление рассказа в уме на основе предъявления набора слов из разных семантических полей (сложный творческое задание). Первое из контрольных заданий

представляло собой также составление рассказа в уме (задание E), но из набора слов, принадлежащих одному семантическому полю, (простое творческое задание). В основном и первом контрольном заданиях требовалось составить рассказ, используя как можно больше слов из предъявленного списка, при этом разрешалось использовать свои слова и менять грамматические формы заданных слов. Второе контрольное задание (R) состояло в восстановлении связного текста из слов без изменения порядка их следования, но при изменении словоформ и добавлении служебных слов. Третье контрольное задание (W) - "механическое" запоминание набора слов, начинающихся сначала на одну, а затем на другую буквы. Задание «Рассказ» использовалось для психофизиологических исследований с помощью ПЭТ и ЭЭГ методов.

1.4.2 Задание "Цепь". Тест состоял из основного задания, представленного в двух различных вариантах, и двух контрольных заданий, каждое из которых также было представлено в двух вариантах и моделировал процесс (этап) инсайта. Стимульным материалом служили наборы из 12 слов существительных единственного числа именительного падежа. В творческом («инсайтном») задании (D1) при предъявлении слов из разных семантических полей требовалось посредством подбора собственных ассоциаций (существительных) переходить по цепочке от одного заданного слова к другому. Во первом контрольном задании (E1) при предъявлении слов, представляющих собой общие категории, требовалось к каждому предъявленному слову из цепочки подобрать 5 слов, относящихся к данной категории. Во втором контрольном задании (R1) требовалось читать предъявленную цепочку слов несколько раз. Задание «Цепь» использовалось для психофизиологических исследований с помощью ПЭТ и ЭЭГ методов. В ЭЭГ-исследовании использовались только задания D1 и E1.

1.4.3 Задания «Беглость», «Гибкость», «Оригинальность». Моделируют отдельные параметры творческого процесса, которые обычно в тестовых заданиях на измерение креативности не разделены, т.е. задание, выполняемое испытуемым, включает все эти показатели, которые потом могут быть подсчитаны по специальному алгоритму. Для исследования нейрофизиологических коррелят параметров вербальной креативности – беглости, гибкости и оригинальности - были разработаны и апробированы 4 вида заданий – 3 творческих (на беглость, гибкость и оригинальность) и 1 контрольное, каждое из них – в двух вариантах. Стимулами во всех заданиях служили 11 пар слов-существительных, сбалансированные по длине, частоте встречаемости в русском языке и степени конкретности-абстрактности. На экране компьютера слова появлялись парами, последовательно, каждая пара висела на экране 11 секунд. Второе слово из каждой предыдущей пары служило первым словом в последующей паре. В задании на беглость волонтеру нужно было связать появляющиеся на экране пары слов из одного семантического поля в как можно большее количество предложений, ориентируясь на вопрос «что могло бы произойти», при этом все слова в парах и пары между собой должны были быть связаны между собой по смыслу. В задании на гибкость волонтеру нужно было связать появляющиеся на экране пары слов из разных семантических полей в предложения, ориентируясь на вопрос «что могло бы произойти», при этом все слова в парах и пары между собой должны были быть связаны между собой по смыслу. В задании на оригинальность волонтеру нужно было связать появляющиеся на экране пары слов из одного семантического поля в предложения, ориентируясь на вопрос «что могло произойти необычного», при этом все пары должны были быть связаны между собой по смыслу, а придуманный рассказ обязательно должен был иметь необычный, оригинальный сюжет. В контрольном задании волонтеру также предъявлялись последовательно пары слов, одно из которых представляло собой общую категорию, а второе – конкретный предмет из этой общей категории и требовалось дать развернутое определение конкретного предмета,

используя общую категорию. Задание «Беглость» использовалось для психофизиологического исследования с помощью метода ЭЭГ, задания «Гибкость», «Оригинальность» использовались для психофизиологических исследований с использованием методов ЭЭГ и фМРТ, для фМРТ исследования данные задания были модифицированы в связи с особенностями метода. В задании «Гибкость» испытуемому на экране компьютера последовательно предъявлялись 35 пар слов из разных семантических полей и требовалось вслух составлять развернутое предложение. В задании «Оригинальность» испытуемому на экране компьютера последовательно предъявлялись 35 пар слов из одного семантического поля и требовалось вслух составить развернутое предложение с необычным/нестандартным «сюжетом». В контрольном (к заданию «Гибкость», К1) задании испытуемому на экране компьютера последовательно предъявлялись 35 пар слов из одного семантического и требовалось вслух составить развернутое предложение. Во втором контрольном (к заданию «Оригинальность», К2) задании требовалось составить развернутое предложение, причем слово, обозначающее конкретный предмет, должно было стоять в конце предложения.

1.4.4 Задание «Образы». Данный набор тестовых заданий был разработан и апробирован А.Р. Родионовым (Родионов, 2013) и моделировал процессы творческого воображения и стадию инспирации творческого процесса (этап генерации идей). В качестве стимулов использовались 10 репродукций жанровой живописи, переведенных в черно-белую форму, которые не содержали изображений известных исторических событий или личностей, в высокой степени эмоционально окрашенных сцен, а также мелких трудноразличимых деталей. Испытуемые выполняли три типа заданий, каждое из которых длилось 180 секунд. В творческом задании испытуемых просили составить связный рассказ на основе предъявленных последовательно 10 картин. В контрольном (не творческом) задании испытуемым необходимо было перечислить изображенные на картинах детали.

Следующие два задания, «Пословицы» и «Выбор» были направлены на проверку гипотез о возможной функциональной роли мозгового механизма детекции ошибок в обеспечении творческой деятельности - играет ли механизм детекции ошибок оптимизирующую или затрудняющую роль в творческом процессе. Оптимизация творческой деятельности может быть связана с выбором наилучшего решения среди других возникающих вариантов. Затрудняющая роль – с невозможностью/повышенной трудностью принять хоть какие-то варианты решения задачи.

1.4.5 Задание «Пословицы» (разработано совместно с к.б.н. Н.В. Шемякиной). В данном типе заданий моделировалась возможность затрудняющей роли механизма детекции ошибок в ситуации взаимодействия творческой деятельности и механизма детекции ошибок, причем в нескольких вариантах. Первый вариант – т.н. осознанная детекция, когда в предъявляемой испытуемому фразе была сделана грамматическая ошибка, и т.н. неосознанная детекция, смысл которой состоял в том, что предъявление хорошо известной пословицы или поговорки активизирует в сознании испытуемого стереотип (ее стандартное окончание), что вступает в противоречие в заданием придумать свой, оригинальный творческий вариант окончания пословицы. Тест состоял из 4 заданий, в каждом задании испытуемому предъявлялись на 400 мс общеизвестные пословицы и поговорки, которые сменялись появлением на экране точки, а потом разрешающего ответ стимула (знак вопроса). Пословицы предъявлялись последовательно - всего 20-21 шт в одном задании со случайными интервалами между их предъявлениями. В первом задании ТвД (творчество + осознанная и неосознанная детекция ошибок) испытуемым предъявлялись общеизвестные пословицы или поговорки, написанные с орфографическими ошибками и одним пропущенным словом и требовалось предложить вместо пропущенного слова свое оригинальное слово или словосочетание, по возможности меняющее смысл пословицы и назвать количество

допущенных во фразе ошибок. Во втором задании Тв (творчество + неосознанная детекция ошибок) испытуемым предъявлялись общеизвестные пословицы или поговорки с одним пропущенным словом и требовалось свое оригинальное слово или словосочетание, по возможности меняющее смысл пословицы на какой-то другой. В контрольном задании КД (контроль+ детекция ошибок) испытуемым предъявлялись общеизвестные пословицы или поговорки, написанные с орфографическими ошибками и одним пропущенным словом и требовалось назвать недостающее в общеизвестной пословице или поговорке слово и определить количество ошибок во фразе. Во втором контрольном К (контроль, нетворческое) задании испытуемым предъявлялись общеизвестные пословицы или поговорки, написанные с одним пропущенным словом и требовалось назвать пропущенное слово, которое присутствует в оригинале пословицы.

1.4.6 Задания «Выбор» и «Импровизация». Моделировалась ситуация возможной оптимизирующей роли детектора ошибок в творчестве, которая может быть связана с выбором «наилучшего» решения среди других возникающих/предложенных вариантов. Тестовый набор заданий, включал два творческих задания («импровизация» и «выбор») и, соответственно, два контрольных к ним. Основу разработанных творческих тестовых заданий составляли отобранные или сконструированные нами амбивалентные фразы-афоризмы с элементами юмора, которые могут быть истолкованы неоднозначно в зависимости от личностных особенностей, и в первую очередь, от уровня развития творческих способностей индивида. Ключевое слово или словосочетание, которое определяет семантическую неоднозначность, во фразах пропущено. В каждом задании было по 35 фраз. В творческом задании «импровизация» (CreImp) испытуемый должен придумать (подобрать) пропущенное слово или словосочетание в тестовой фразе. В творческом задании «выбор» (CreCh) под фразой с пропущенным словом/словосочетанием испытуемому предлагаются три варианта слов на выбор, при этом выбор одного из этих трех слов убирает семантическую амбивалентность из предложенной фразы, а два других – сохраняют ее. Испытуемому предлагается выбрать тот вариант слова, который ему больше нравится, при этом критерии выбора не задаются. В контрольных заданиях (ContImp и ContCh) фразы не подразумевают никакой семантической неоднозначности и в качестве вариантов выбора предлагаются либо слова-синонимы, либо слова, несущие одинаковую семантическую нагрузку

2 Результаты исследований и их обсуждение.

2.1 Результаты выполнения задания «Рассказ» и их обсуждение. В задании «Рассказ» моделировался процесс художественного творчества на модели придумывания связного рассказа. Основываясь на особенностях сконструированных нами заданий, можно сказать, что преимущественное внимание было уделено следующим способностям, проявляющимся в творческом процессе: способности к сближению понятий (легкость ассоциирования (связывания) отдаленных понятий – слов из разных семантических полей) или гибкости мышления, и оригинальности мышления. Гибкость и оригинальность мышления наиболее показательна при выполнении трудного задания на составление рассказа из набора слов из разных семантических полей (задание D), а оригинальность мышления, кроме трудного задания, присутствует еще и в задании на составление рассказа из набора слов из одного семантического поля (задание E). Задания D и E отличаются друг от друга всего лишь одной составляющей креативности, а именно способностью к отдаленному ассоциированию понятий, которая необходима при выполнении задания D со словами из разных семантических полей. Таким образом, если задания D и E задействуют собственно процессы креативности, но в разной степени, то задания R и W задействуют механизмы обычного, нетворческого мышления. Поэтому, если в контрастах D-R, D-W, E-R, E-W мы видим отличие творческой мыслительной деятельности в целом от нетворческой

мыслительной деятельности, то в контрасте D-E мы прежде всего видим отличие более сложной творческой деятельности от более простой. Таким образом, в ЭЭГ и ПЭТ-исследовании предполагалось выявить: 1) зоны мозга, связанные с осуществлением более сложного типа творческого мышления в сравнении с более простым (контраст D-E); 2) зоны мозга, связанные с осуществлением творческого типа мышления в сравнении с нетворческим (контрасты D-R, D-W, E-R, E-W); 3) зоны мозга, активность в которых коррелировала с психологическими показателями (гибкостью, беглостью, оригинальностью) – только для ПЭТ-исследования.

2.1.1 ПЭТ-результаты выполнения задания «Рассказ». Статистически достоверные локальные различия (контрасты) в уровне активации между тестовыми состояниями (D-E, D-R, E-W и т.д.) получены в следующих областях (рисунок 1А). В контрасте D-E (сложное творческое задание vs простое творческое задание) отмечены активации в левой средневисочной извилине (ПБ 39). В контрасте D-R (сложное творческое задание vs восстановление связного текста) отмечены активации в левом полушарии в средневисочной (ПБ 39), угловой (ПБ 39), верхнезатылочной (ПБ 19), среднелобной (ПБ 8, 6), нижнелобной (ПБ 46) извилинах и предклинье (ПБ 7). В контрасте D-W (сложное творческое задание vs запоминание слов) отмечены активации в левом полушарии в нижнелобной (ПБ 44,45,47), среднелобной (ПБ 6, 8, 11, 46), верхневисочной (ПБ 38, 22), средневисочной (ПБ 21), угловой (ПБ 39) извилинах и в правом полушарии в нижнелобной (ПБ 45, 47) и среднелобной (ПБ 8) извилинах. В контрасте E-R (простое творческое задание vs восстановление связного текста) отмечены активации в левом полушарии в среднелобной (ПБ 8), средневисочной (ПБ 39) и верхневисочной (ПБ 22) извилинах. В контрасте E-W (простое творческое задание vs запоминание слов) отмечены активации в левом полушарии в верхнелобной (ПБ 10), среднелобной (ПБ 8,9), нижнелобной (ПБ 44, 45, 47), прецентральной (ПБ 6), верхневисочной (ПБ 38, 42), средневисочной (ПБ 21, 39), надкраевой (ПБ 40) извилинах и в правом полушарии в верхнелобной (ПБ 10), среднелобной (ПБ 8,9) и веретенообразной (ПБ 18) извилинах.

В контрасте D-E отмечена активация левополушарной средневисочной извилины (ПБ 39). Задания D и E отличаются друг от друга всего лишь одной составляющей креативности, а именно гибкостью мышления, которая необходима при выполнении задания D со словами из разных семантических полей. Литературные данные указывают на важную роль левой теменно-височной области в процессах творчества.

Существует целый ряд работ, выполненных в нейровизуализационной парадигме, описывающих связь теменных (Chavez-Eakle et al, 2007; Fink et al, 2009; Hansen et al, 2008; Jung et al, 2009a; Sieborger et al, 2007) и височных (Chavez-Eakle et al, 2007; Fink et al, 2009; Hansen et al, 2008; Jung et al, 2010) областей мозга с процессами дивергентного мышления. В нейровизуализационных исследованиях процессов художественного творчества также получено доказательство большего вовлечения теменно-затылочных регионов мозга по сравнению с контрольными заданиями - с пиком в правой среднезатылочной извилине (Ellamil et al, 2012; Huang et al, 2013; Park et al, 2015), левой среднезатылочной извилине (Ellamil et al, 2012), билатерально в нижневисочной извилине (Park et al, 2015) и левой латеральной затылочной коре (Aziz-Zadeh et al, 2013; Saggat et al, 2015), а также найдены значимые изменения мозговой активности, связанные с художественной и визуальной креативностью, в височно-теменных областях (Bengtsson et al, 2007; Brown et al, 2006; Limb & Braun, 2008; Kowatary et al, 2009) веретенообразной извилине (Bengtsson et al, 2007; Limb & Braun, 2008), зрительных областях коры (Bengtsson et al, 2007; Limb & Braun, 2008; Kowatary et al, 2009).

ПБ 39, по литературным данным, также может принимать участие в процессах, связанных с вербальной рабочей памятью (Collette et al, 2001; Zurowski et al, 2002), в

процессах переключения от одной задачи к другой (что также является одним из показателей гибкости мышления и необходимо для творческого процесса) (Sohn et al, 2000). Также средневисочная извилина (ПБ 39), по некоторым данным (Blackwood et al, 2000), может являться звеном системы, которая участвует в формировании параноидных галлюцинаций. Эти данные могут указывать на определенную роль средневисочной извилины в процессах, связанных с воображением и фантазией, что является необходимым элементом при творчестве и должно было быть вовлечено при выполнении наших заданий.

Есть данные, что ПБ 39, согласно своей мультимодальной интегративной роли и обеспечения процессов семантической памяти (Binder et al, 2009), может быть вовлечена в интеграцию различных типов семантической информации (Price, 2010), в процесс антиципации результатов собственных действий (Hassabis&Maguire, 2007; Nyberg et al, 2010), в генерацию новых идей (Benedek et al, 2013), в рекомбинацию сохраненной информации в памяти в новые ментальные конструкции и представления (Cabeza et al, 2008; Schacter et al, 2007, 2012). Средневисочная извилина вовлечена в семантические процессы (Friederichi et al, 2003; Kuperberg et al, 2003), извлечение автобиографических воспоминаний из памяти (Graham et al, 2003), а также может играть ключевую роль в таких семантических процессах, как понимание и генерации метафор (Cardillo et al, 2012; Goel&Dolan, 2001; Turken&Dronkers, 2011), семантические представления и контроль (Badre et al, 2005; Whitney et al, 2011) и концептуальная интеграция и понимание (Hickok&Poeppel, 2004; Turken&Dronkers, 2011), а также и в процессах инсайта (Luo&Knoblich, 2007).

Однако, по нашему мнению, активация данной областей не сводится только к обеспечению упомянутых процессов, а непосредственно связана с созданием нового качества, т.е. отражает именно процесс творчества. Таким образом, наиболее вероятной ролью левой средневисочной извилины в процессе творческого мышления представляется обеспечение необходимой гибкости мышления (процесс переключения от одной операции к другой), а также обеспечение подключения фантазии и воображения, необходимых для адекватного выполнения творческой задачи.

В контрасте D-R отмечены активации зон, связанных не только с селективным вниманием, его переключением и семантическими процессами (ПБ 8, 46), задействованными при творчестве. В связи с тем, что задание D требует для своего выполнения внутренней артикуляции (Price, 1994), наблюдается активация в дополнительной моторной зоне (ПБ 6). Активация зон, расположенных в области клина и предклинья (ПБ 7, 19), по-видимому, отражает большее вовлечение внутренней генерации зрительных образов в задании D по сравнению с заданием R. Отметим, что эти активации (ПБ 7, 19) не проявляются ни в контрастах E-R, E-W, ни в контрасте D-E. Поскольку и трудное и простое творческое задание связано с подключением продуктивного воображения, то в контрасте D-E мы не наблюдаем активации зон клина и предклинья, которые связаны с процессом зрительного воображения (Naxby, 1991; Kosslyn, 1993; Roland, 1995; Baker, 1996).

Поскольку задания D и E сильно отличаются по характеру присутствующей в них деятельности от задания W, то в соответствующих контрастах (D-W, E-W) помимо уже вышеуказанных семантических процессов и процессов, связанных с памятью и вниманием (ПБ 8, 44, 45, 47, 21, 22), выявляются и процессы, связанные с необходимостью формировать грамматические структуры (синтаксис), в том числе и просодические элементы (ПБ 38), которые могут произвольно вовлекаться при проговаривании текста (рассказа) про себя (Mazoyer, 1993).

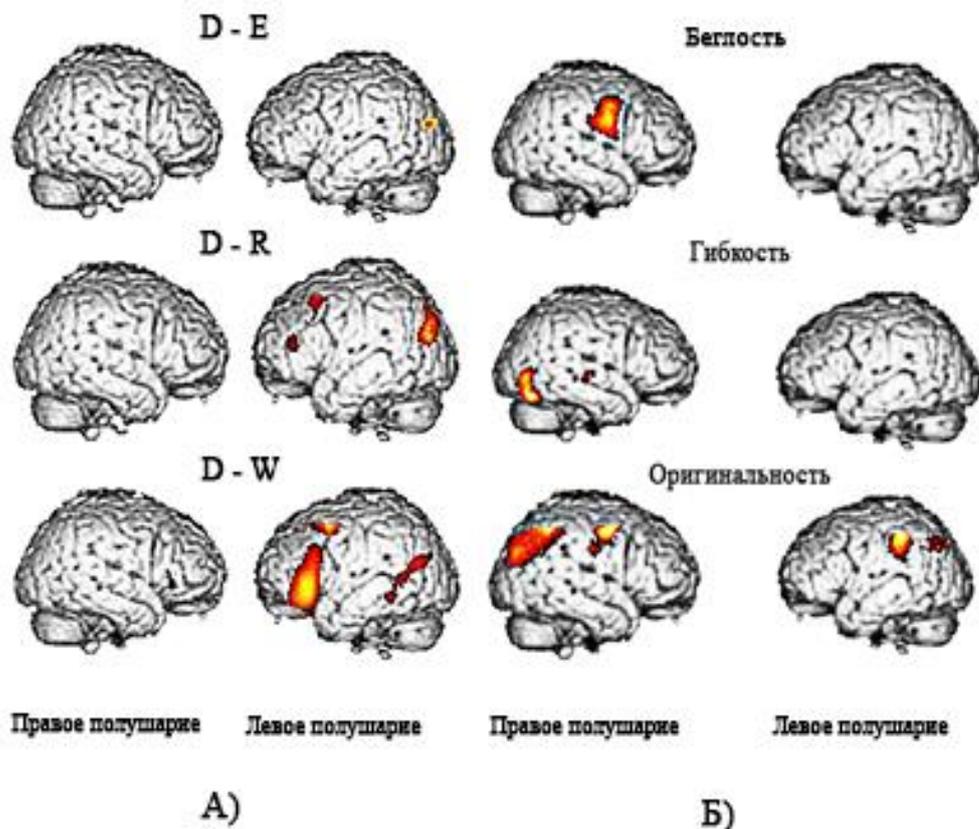


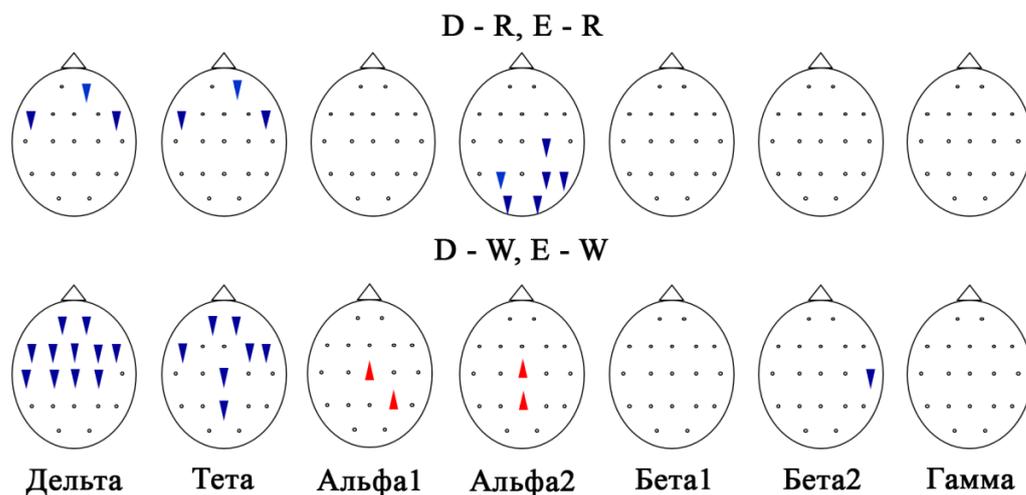
Рисунок 1 – Области увеличения локального мозгового кровотока при выполнении задания «Рассказ» А) в контрастах сложного творческого задания (D) с простым творческим (E), восстановлением текста (R) и запоминанием (W) Б) коррелирующие с беглостью, гибкостью, оригинальностью.

В качестве общих зон активации для контрастов D-R, E-R, D-W, E-W (отличающих творческую деятельность от нетворческой) можно указать в первую очередь, на зону средневисочной извилины (ПБ 39), которая присутствует во всех контрастах, а также на зону среднелобной (ПБ 8) извилины; для контрастов D-R, E-R на зоны средневисочной (ПБ 39) и среднелобной (ПБ 8) извилин, для контрастов D-W, E-W на зоны средневисочной (ПБ 39), верхнелобной (ПБ 8), нижнелобной (ПБ 4, 45, 47), средневисочной (ПБ 21, 22) и верхневисочной извилины (ПБ 38). Наши данные об активации лобно-височно-теменно-затылочных областей мозга при творческом мышлении в сравнении с нетворческим типом мышления также согласуются с литературными данными. Таким образом, мы можем предполагать, что именно более интенсивное задействование семантических и когнитивных процессов (селективного внимания, переключение внимания, воображения, памяти, эмоциональных аспектов), отраженных в рассматриваемых контрастах при творчестве отличает креативную деятельность от просто мыслительной.

Также был проведен корреляционный анализ связи показателей креативности (беглости, гибкости и оригинальности), подсчитанный на основе самоотчетов испытуемых при выполнении задания D (рисунок 1Б). Показатель беглости коррелирует с активностью в дополнительной моторной и прецентральной областях отрицательно (т.е. чем ниже показатель беглости, тем выше кровотоки в данных областях). Показатель гибкости мышления коррелирует с активностью в теменно-височных отделах положительно (т.е. чем выше гибкость мышления – одна из важных составляющих творческого мышления – тем выше кровотоки в этой области). В сравнении оригинальных ответов со стереотипными отмечена область активации, охватывающая ПБ 39 и 40 билатерально, а также ПБ 4 и 6 справа. Наши данные, демонстрирующие отрицательную корреляционную связь вербальной

беглости с прецентральной (ПБ 4) и дополнительной моторной областью (ПБ 6), хорошо согласуются с нейровизуализационными данными, где выполнение заданий на вербальную беглость активировало прецентральные области (Allen&Fong, 2008) и дополнительную моторную кору (Ravnkilde et al, 2002; Bunge et al, 2002; Durston et al, 2002). Изменения в данных структурах могут быть связаны с выбором релевантной реакции при выполнении задания, в том числе, и с реакцией подавления нерелевантных ответов. Отрицательная корреляционная связь показателя беглости с активностью прецентральной и дополнительной моторной области (чем выше показатель беглости, тем ниже кровотоки в данных областях) также хорошо согласуется с концепцией transient hypofrontality, т.е. временного снижения активности префронтальной коры и как следствие, когнитивного контроля (Dietrich, 2006), т.е. как бы «растормаживания», для успешного выполнения творческой задачи. Положительная связь показателя гибкости с активностью в теменно-височных отделах хорошо согласуется с нашими данными анализа контрастов, демонстрирующих особую важность теменных и височных регионов для творчества. В сравнении оригинальных ответов со стереотипными отмечена область активации, охватывающая ПБ 39 и 40 билатерально, а также ПБ 4 и 6 справа. То, что данные области проявились не только в соответствующих контрастах, в частности, ПБ 39 в контрасте D-E, (а также ПБ 40 в контрасте D1-E1, см. раздел 2.2.1), но и при сравнении оригинальных ответов со стереотипными, подтверждает не только факт адекватного выбора и конструирования моделей заданий для исследования процессов вербального творческого мышления, но еще и свидетельствует об особой важности данных областей в творческом процессе. Таким образом, теменные области являются самыми вероятными кандидатами на роль областей, постоянно участвующих в обеспечении процессов вербального творческого мышления любого типа.

2.1.2 ЭЭГ-результаты выполнения задания «Рассказ». В объединенной группе испытуемых при выполнении задания «Рассказ» статистически достоверные различия между тестовыми заданиями были получены дельта, тета, альфа_{1,2} и бета_{1,2} диапазонах в контрастах DR, DW, ER, EW (рисунок 2).



Красный треугольник, направленный вверх, обозначает увеличение мощности, синий треугольник, направленный вниз – снижение мощности

Рисунок 2 – Различия мощности ЭЭГ при выполнении задания «Рассказ»

В первую очередь, следует отметить, что отмеченное нами снижение мощности ЭЭГ в дельта, тета и альфа –диапазонах при сравнении творческих и нетворческих заданий хорошо согласуется с данными ряда исследований визуальной (образной) креативности (Jausovec&Jausovec, 2000; Petsche et al, 1997; Вольф и Тарасова, 2010, 2013; Jaarsveld et al, 2015). Наиболее вероятное физиологическое значение наблюдаемого нами снижения

мощности ЭЭГ в дельта и тета диапазонах в творческих заданиях связано с тем, что для успешного выполнения нашей творческой задачи, в первую очередь, требовалось усиленное вовлечение когнитивных процессов, таких как воображение и концентрация внимания при манипулировании внутренними образами, которые вызывались стимулами. По самоотчетам испытуемых, выполнение творческих заданий (D и E) вызывало у них положительную эмоциональную реакцию, что также может быть связано с указанными изменениями мощности тета диапазона. Вольф и Тарасова, 2013 нашли, что в условиях вознаграждения за генерацию оригинальных творческих решений снижается мощность тета-ритма, что в совокупности с данными самоотчетов испытуемых о том, что им нравилось выполнять творческие задания («хотелось порадовать Вас (экспериментатора) интересным необычным рассказом»), может свидетельствовать косвенно о том, что процессы творческого мышления сопровождаются «самовознаграждением», стимулируя дальнейшую творческую деятельность. Обнаруженное нами снижение мощности в альфа-диапазоне в теменно-затылочной области также согласуется с литературными данными. Так, показано снижение мощности альфа ритма в височной и теменно-затылочной областях коры в стадии подготовки ответа к творческому заданию (Jausovec, 1997), что трактуется как усиление умственной активности; снижение мощности альфа диапазона в лобной и затылочной коре показано во время выполнения творческих заданий, на альтернативное использование объектов и ассоциации (Jauk et al, 2012). Показано снижение синхронизации в альфа – диапазоне в височных и теменных областях (Jausovec&Jausovec, 2000б; Razumnikova, 2007; Разумникова и др, 2009; Шемякина, Данько, 2007) в процессе творческого мышления. Среди исследований визуальной (образной) креативности также есть результаты, отмечающие снижение мощности альфа ритма в задних областях коры во время ментального воображения (Petsche et al, 1997; Bhattacharya&Petsche, 2002). Десинхронизация ЭЭГ в альфа-диапазоне наблюдалась в условиях сниженной концентрации внутреннего внимания, в особенности, в теменно-затылочных областях коры (Benedek et al, 2011), что может отражать активную обработку образов (образной информации). Наблюдаемое нами снижение мощности в альфа 2 диапазоне в теменно-затылочной области в сравнении творческого и нетворческого заданий (на восстановление текста) и единичное увеличение мощности в альфа1 диапазоне в центрально-теменной области в сравнении творческого задания и нетворческого (на запоминание) хорошо согласуется также с ролью внимания и семантических процессов в креативности. Творческое задание по сравнению с заданием на запоминание требовало для своего выполнения большего вовлечения информационных процессов, (в том числе и торможения нерелевантных задач действий), и ресурсов внимания, что и отразилось в усилении мощности в альфа1-диапазоне. Таким образом, для выполнения творческой задачи - придумывания рассказа - требуется интеграция различных когнитивных процессов. Теменно-затылочные отделы обеспечивают селекцию информации с целью генерации творческих решений и поддерживают необходимый уровень концентрации внимания, а лобные отделы обеспечивают мотивацию для выполнения творческой деятельности, проверку качества сгенерированных идей и принятия решения о прекращении или продолжении поиска.

2.1.3 Сопоставление ЭЭГ и ПЭТ результатов выполнения теста «Рассказ».

Поскольку использованные методы обладают определенными ограничениями, то сопоставление ПЭТ и ЭЭГ данных позволяет существенно взаимоподтвердить и взаимодополнить полученные результаты. При ПЭТ анализе различий лМК в контрасте D-E была обнаружена область активации в левой средневисочной извилине (ПБ 39). ЭЭГ исследование не выявило статистически значимых изменений в коре в данном контрасте. Можно предположить, что здесь как раз та ситуация, когда разрешающая пространственная способность стандартной ЭЭГ и ее чувствительность к процессам, протекающим в глубине

мозга, оказались недостаточны для адекватного выделения зоны преимущественной активации. В данном случае, данные ПЭТ взаимодополняют данные ЭЭГ, как в топографическом плане, так и в плане мозговой организации творческого мышления. Тем не менее, учитывая, что на ПЭТ в данном контрасте также был обнаружен только один кластер активации, т.е. то обстоятельство, что различия в данном ПЭТ-контрасте также не обнаруживаются в подавляющем большинстве отделов мозга, в определенном смысле взаимоподтверждает результаты и адекватность обеих методик (ПЭТ и ЭЭГ). В контрасте D R обнаружены активации на ПЭТ в левом полушарии лобной и теменно-затылочной области. На ЭЭГ отмечены снижение мощности ЭЭГ в дельта и тета диапазонах в лобной области и в альфа2 диапазоне в теменно-затылочной области билатерально. Десинхронизация ЭЭГ в данных частотных диапазонах служит дополнительным показателем корковой активации, продемонстрированной на ПЭТ в тех же областях коры, т.е. топографически взаимоподтверждает данные ПЭТ. В контрасте D-W области активации на ПЭТ схожи с областями, активированными в контрасте D-R, здесь также отмечены активации в левом полушарии в лобной, височной и теменной коре и в правом полушарии в лобной области. ЭЭГ данные демонстрируют снижение мощности в дельта-диапазоне в лобно-центральной области билатерально, в тета диапазоне в основном в лобной области и единично в центрально-теменной и единичное увеличение мощности в альфа1 диапазоне в центрально-теменной области. Здесь данные ЭЭГ и ПЭТ имеют как взаимоподтверждающий, так и взаимодополняющий характер. Взаимоподтверждение ПЭТ и ЭЭГ-данных касается, в первую очередь, частично топографии отмеченных различий – активация лобных и теменных отделов отмечено как на ЭЭГ, так и на ПЭТ. Взаимодополнение данных связано с тем, что ЭЭГ демонстрирует двойственный характер – с одной стороны, в дельта и тета диапазонах отмечено снижение мощности, что трактуется как дополнительный знак кортикальной активации, показанной на ПЭТ; с другой стороны, в альфа диапазоне отмечено увеличение мощности в центрально-теменной области, что также можно трактовать как показатель кортикальной активации, усиления мыслительной деятельности. Однако такой двойственный характер ЭЭГ данных дополняет ПЭТ данные раскрытием элементов физиологической сущности изменений, происходящих в данных зонах, может указывать на то, что процессы, протекающие в лобной и теменной областях, могут иметь неоднозначную трактовку, более сложный характер, чем нам демонстрируют ПЭТ данные.

2.2 Результаты выполнения задания «Цепь» и их обсуждение. Данное задание моделировало процесс (этап) инсайта с использованием принципа отдаленных ассоциаций. В данном задании стимулы (слова из отдаленных семантических полей) побуждают испытуемых использовать только инсайтную стратегию, поскольку другая (например, последовательные ассоциации) не могут привести его к успешному выполнению задания. Слова-стимулы подобраны таким образом, чтобы банальные ассоциации не могли привести испытуемого к решению, таким образом побуждают его формировать «отдаленные» уникальные ассоциации. А чем дальше друг от друга будут по смыслу ассоциативные элементы, тем креативнее будет процесс, и, как следствие, продукт этого процесса. В контрасте D1-E1 предполагалось выявить как раз мозговой субстрат инсайтного нахождения решения на примере построения цепочки отдаленных ассоциаций, и в контрасте D1-R1 – его же, но в меньшей степени.

2.2.1 ПЭТ-результаты выполнения задания «Цепь» и их обсуждение. Статистически достоверные локальные различия (контрасты) в уровне активации между тестовыми состояниями (D1-E1, D1-R1, E1-R1) получены в следующих областях (рисунок 3). В контрасте D1-E1 (ассоциативная цепочка vs перечисление) отмечены активации в левом полушарии в надкраевой (ПБ 40) и среднелобной (ПБ 6,8) извилинах. В контрасте D1-R1 (ассоциативная цепочка vs чтение) отмечены активации в левом полушарии в среднелобной

(ПБ 6,8,9,11), нижнелобной (44,45,46,47), верхнезатылочной (ПБ 19) и поясной (ПБ 32) извилинах. В контрасте E1-R1 (перечисление vs чтение) отмечена активация в левой поясной извилине (ПБ 32).

В контрасте D1-E1 отмечены активации в левом полушарии в надкраевой (ПБ 40) и среднелобной (ПБ 6,8) извилинах. Активация в среднелобной извилине (ПБ 6, 8) может отражать усиленное вовлечение памяти и обеспечивать ассоциирование отдельных семантических концептов (Montaldi et al, 2002), которое может требоваться для выполнения задания D1. Есть данные, что левые средние и нижнелобные извилины более активны, когда генерируется оригинальный ответ в сравнении со стандартным (Huang et al, 2013). Левая среднелобная кора может быть также ответственна за подготовку к инсайту через усиление top-down контроля в таких операциях, как подавление посторонних мыслей, выбора доминантной стратегии и переключения внимания (Kounios et al, 2006; Tian et al, 2011).

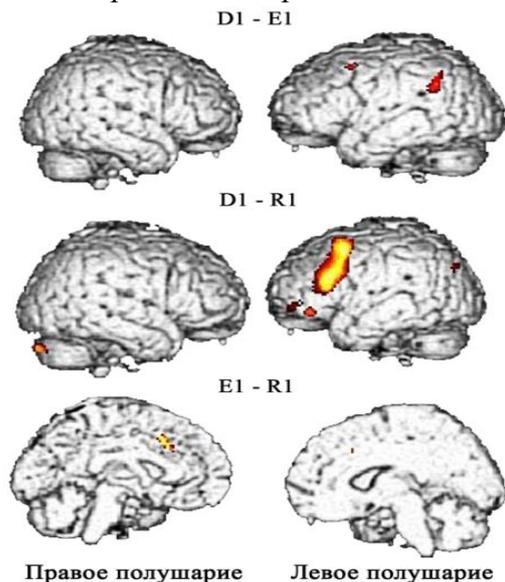


Рисунок 3 - Области увеличения локального мозгового кровотока при выполнении задания «Цепь»

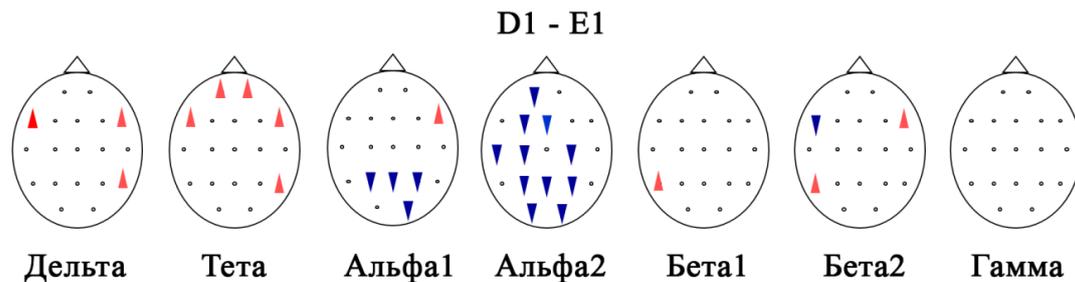
По литературным данным, надкраевая извилина (ПБ 40) задействуется при выполнении кроссмодальных задач (Booth et al, 2002). Исследователи отмечают роль ПБ 40 в процессах переключения от одной задачи к другой (что, как указывалось выше, является одним из показателей гибкости мышления и необходимо для творческого процесса), (Sohn et al, 2000), в процессах воображения (Knauff et al, 2000, 2002), в процессах планирования при решении задач (Fincham et al, 2002). Надкраевая извилина и среднелобная извилина анатомически связаны (Catani&Thiebat de Schotten, 2012) и вовлечение части этой теменно-лобной сети в генерацию идей может связано с ее вовлечением в процессы рабочей памяти, мониторинга, внимания. Эта сеть также вовлечена в процессы свободной и/или случайной генерации действий (Frith et al, 1991; Rowe et al, 2008), которые требуют свободы выбора собственных реакций, также как и их селекции и мониторинга, что напрямую связано с процессами творческого мышления. Генерация новых идей также связана с активацией левой теменной коры (ПБ 40), включая части надкраевой извилины (Benedek et al, 2014a). Теменная кора отражает направленное внимание к внутренним стимулам (информации) и обеспечивает разделение новой и знакомой информации во время извлечения из памяти (Kahn et al, 2004; Shannon&Buckner, 2004). Она постоянно вовлечена также в извлечение из эпизодической памяти, которая отражает прошлый индивидуальный опыт, который используется для воображения и антиципации (Schacter et al, 2007, 2012). Когнитивная гибкость постоянно ассоциирована с задней теменной областями (Derrffus et al, 2005; Kim et al, 2011). Кроме того, Chavez et al, 2004 при выполнении творческих заданий (субтесты

Торренса) выявил активации, в том числе, и в ПБ 40. Наши данные, описанные выше (см. раздел 2.1.1, сравнение оригинальных ответов со стереотипными в задании «Рассказ») указывают на важную роль ПБ 40 в обеспечении оригинальности ответа (в нашем случае, «отдаленности» ассоциации для успешного нахождения инсайт-решения). Как было отмечено выше, тот факт, что теменные области проявились не только в соответствующих контрастах, в частности, ПБ 39 в контрасте D-E, и ПБ 40 в контрасте D1-E1, но и при сравнении оригинальных ответов со стереотипными (где не было четкого разделения на условия), подтверждает не только факт адекватного выбора и конструирования моделей заданий для исследования процессов вербального творческого мышления, но еще и свидетельствует об особой важности данных областей в творческом процессе. Теменные области являются самыми вероятными кандидатами на роль областей, постоянно участвующих в обеспечении процессов вербального творческого мышления любого типа. В целом, можно заключить, что наиболее вероятная роль надкраевой извилины (ПБ 40) в творческом процессе состоит в обеспечении необходимой гибкости мышления (что связано с ее участием в планировании и переключении) для запуска инсайт-процесса решения поставленной задачи, а также в обеспечении подключения воображения, необходимого для успешного протекания творческого процесса.

Активация поясной извилины связана в первую очередь, с самим процессом инсайт-нахождения решения. По литературным данным, передняя поясная извилина играет значимую роль в процессах инсайта (Aziz-Zadeh et al, 2009; Luo et al, 2004; Kounios et al, 2006), поскольку эта область важна для мониторинга когнитивного конфликта и инициации процессов, ведущих к слому стереотипов, мешающих нахождению решения. Многочисленные исследования показали, что передняя поясная извилина - это структура взаимодействия между мезокортикально-лимбическими путями и что ее активность можно считать внутренним сигналом о наличии феномена инсайта (Asari et al, 2008; Aziz-Zadeh et al, 2009; Luo et al, 2004; Kounios et al, 2006; см. обзор Fields, 2011). Реципрокные взаимодействия между передней поясной извилиной и дорсолатеральной префронтальной корой осуществляют контроль внимания (Carter&van Veen, 2007; Ridderinkhof et al, 2004), а реципрокные взаимодействия между передней поясной извилиной и орбитофронтальной корой – переоценку целей в зависимости от контекста ситуации (Rolls&Grabenhorst, 2008; Rushworth et al, 2007). Мониторирующая функция передней поясной извилины модулирует интенсивность фокуса внимания и совместно с орбитофронтальной корой обеспечивает ожидание успеха, переживаемое как концентрация, трудность задания, мотивация к продолжению или напряжение (Voksem&Tops, 2008; Grace et al, 2007; Sarter et al, 2006). Т.е. передняя поясная извилина измеряет прогресс в достижении цели или его отсутствие. Принимая во внимание предположение о том, что в случае задачи, предполагающей инсайт-тип решения проблемы, степень достижения/не достижения цели переживается более сильно (интенсивно), чем при решении неинсайт-типов творческих задач, мы можем предполагать, что активация передней поясной извилины в нашем задании отражает именно более интенсивное переживание достигнутой (или не достигнутой) прогресса выполнения задания, что безусловно должно вовлекать эмоциональную составляющую (хотя эмоции всегда присутствуют в любом творческом процессе). Также активность ПБ 32 может свидетельствовать об усиленном вовлечении процессов внутренней селекции (которая требуется для успешного выполнения творческой задачи) в задании D1 по сравнению с заданием R1 – так как передняя часть поясной извилины – ключевая структура в системе селективного внимания и отбора информации (Petersen et al, 1988; Pardo et al, 1991; Taylor et al, 1994).

2.2.2 ЭЭГ-результаты выполнения задания «Цепь» и их обсуждение. В объединенной группе испытуемых при выполнении задания «Цепь» статистически

достоверные различия в контрасте D1-E1 были получены дельта, тета, альфа1,2 и бета 1,2 диапазонах (рисунок 4).



Красный треугольник, направленный вверх, обозначает увеличение мощности, синий треугольник, направленный вниз – снижение мощности

Рисунок 4 - Различия мощности ЭЭГ при выполнении задания «Цепь»

При анализе полученной картины изменений динамики мощности ЭЭГ в различных диапазонах можно говорить о выявленных коррелятах сложного многозвеньевого механизма, обеспечивающего разницу в выполнении тестового и контрольного заданий. Так, например, снижение мощности альфа диапазона в теменной коре сопровождается повышением мощности в низкочастотных диапазонах в передних отведениях. Увеличение мощности тета-диапазона в лобных отделах может свидетельствовать об увеличении концентрации внимания, необходимого для переработки информации и выполнения сложного задания (Gevins et al, 1997; Kiroy et al, 1996; Wilson et al, 1999). Также есть данные, что увеличение мощности в тета диапазоне в лобной области связано с обработкой в памяти информации о семантических компонентах слов-стимулов (Razoumnikova, 2007). Таким образом, испытуемые могли концентрироваться на семантических составляющих стимулов с тем, чтобы найти отдаленные ассоциативные связи для успешного решения творческого задания. Увеличение синхронизации в дельта диапазоне может отражать также вовлечение процессов воображения (для облегчения выполнения творческого задания) и обширные top-down процессы (Bhattacharaya&Petsche, 2002, 2005). Упоминание о подобной дельта-синхронизации, связанной с процессами воображения, есть в работе Карповой, 2016. Найденое нами снижение мощности в альфа1,2-диапазонах мы интерпретируем как отражение усиления кортикальной активации, поскольку без интенсивного вовлечения всех когнитивных процессов вряд ли возможно успешное решение нестандартных задач, требующих для своего решения вовлечения инсайтных процессов. Несмотря на использование различных тестовых и контрольных заданий при исследовании процессов инсайта, наши результаты хорошо согласуются с литературными данными, где описывается постоянный паттерн снижения мощности альфа-ритма в лобной (Kounious et al, 2006, 2008; Sandkuhler&Bhattacharaya, 2008), теменной (Jung-Beeman et al, 2004) и височной (Kounious et al, 2006, 2008) областях, особенно в течение фазы реструктуризации (Sandkuhler&Bhattacharaya, 2008). Вероятно, это свидетельствует о том, что процессы, связанные с инсайтным нахождением решения, не столь вариабельны, как другие типы творческого процесса, и видимо, даже при использовании разных типов тестовых и контрольных заданий, а также разных групп испытуемых имеют общие воспроизводимые мозговые механизмы. Наиболее вероятный кандидат на роль такого механизма – это снижение мощности альфа-ритма, что нами рассматривается как отражение усиления кортикальной активации и формирование «усиленной рабочей доминанты» для успешного решения инсайтных задач.

2.2.3. Сопоставление ЭЭГ и ПЭТ результатов выполнения задания «Цепь».

Результаты данного сопоставления также являются как взаимоподтверждающими, так и взаимодополняющими. В контрасте D1-E1 на ПЭТ отмечены активации в левом полушарии в

надкраевой (ПБ 40) и среднелобной (ПБ 6,8) извилинах. ЭЭГ- данные демонстрируют повышение мощности в низкочастотных диапазонах в лобной и височной областях, снижение мощности в альфа 1 диапазоне в теменно-затылочной области, практически генерализованное снижение мощности в альфа2 диапазоне и единичные повышения мощности бета1, 2-диапазона в височной и лобной областях. Взаимоподтверждение ПЭТ и ЭЭГ-данных касается, в первую очередь, частично топографии отмеченных различий – активация лобных и теменных отделов отмечено как на ЭЭГ, так и на ПЭТ. Взаимодополнение данных связано, во-первых, с тем, что ЭЭГ демонстрирует, по сравнению с областями ПЭТ-активаций, практически генерализованный характер изменений мощности – большие области мозга объединяются видимым образом в творческой работе для реализации задачи D1. Отсутствие в ПЭТ-контрасте таких масштабных изменений, по-видимому, может быть связано с особенностями метода - возможно, здесь как раз метод ПЭТ оказался нечувствительным для выявления данного типа активации – десинхронизации в альфа диапазоне. Во-вторых, взаимодополнение данных связано с тем, что ЭЭГ демонстрирует сложный характер изменений мощности – наблюдаются одновременно как снижение, так и повышение мощности как в разных, так и в одном частотном диапазоне, что свидетельствует о более сложном характере протекаемых процессов, чем те, которые нам демонстрируют ПЭТ данные. Здесь также полиметодический подход продемонстрировал свою важность при исследовании сложных психических процессов

2.3 Результаты выполнения заданий «Беглость», «Гибкость» и «Оригинальность» и их обсуждение. Данные задания моделировали такие параметры креативности (дивергентного мышления), как беглость, гибкость и оригинальность. Под беглостью понимается количество идей, продуцируемых испытуемым в единицу времени, под гибкостью - количество разных категорий, к которым можно отнести предложенные идеи, под оригинальностью - количество нестандартных, необычных идей (ответов), показатель оригинальности всегда смотрится в отношении всей группы испытуемых. Параметры креативности являются важной характеристикой того, насколько успешно протекает или может протекать творческий процесс.

2.3.1 фМРТ-результаты выполнения заданий «Гибкость» и «Оригинальность». В результате проведенного исследования удалось локализовать набор кластеров, в которых наблюдалось значимое влияние фактора «Творчество» (основной эффект «Гибкость + Оригинальность»), который связан с большими значениями BOLD-сигнала в творческих условиях по сравнению с контрольными (рисунок 5). Выполнение творческих заданий характеризовалось изменением функциональной активности относительно контрольных заданий в следующих областях: в мозжечке, в таламусе, гиппокампе, в теменно-затылочной области (парагиппокампальной, угловой извилинах), в теменной коре, в височной области (в верхневисочной, средневисочной извилинах) и в лобной области (нижнелобной и среднелобной извилинах).

При анализе полученных фМРТ результатов, характеризующих творческое мышление, в первую очередь, следует отметить активацию значительного количества зон мозга – лобные, височные, теменные и затылочные зоны (также, как и в результатах наших ПЭТ-исследований). Как уже упоминалось выше, в том числе и при обсуждении ПЭТ-результатов, полученные в фМРТ зоны активации хорошо согласуются с данными литературы о важности лобных, височных и теменных отделов мозга в реализации разных типов творческого мышления.

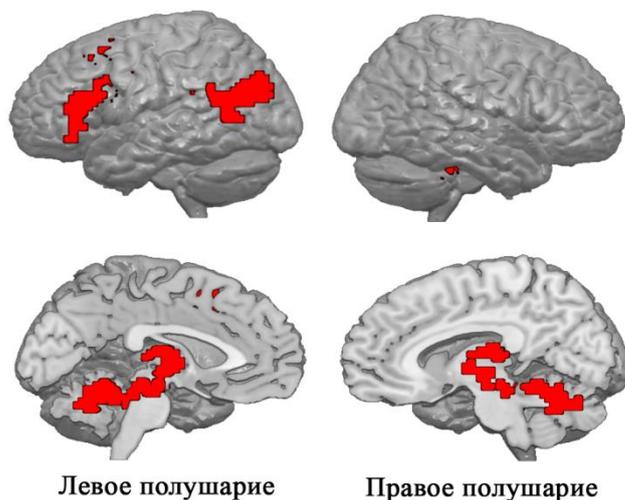
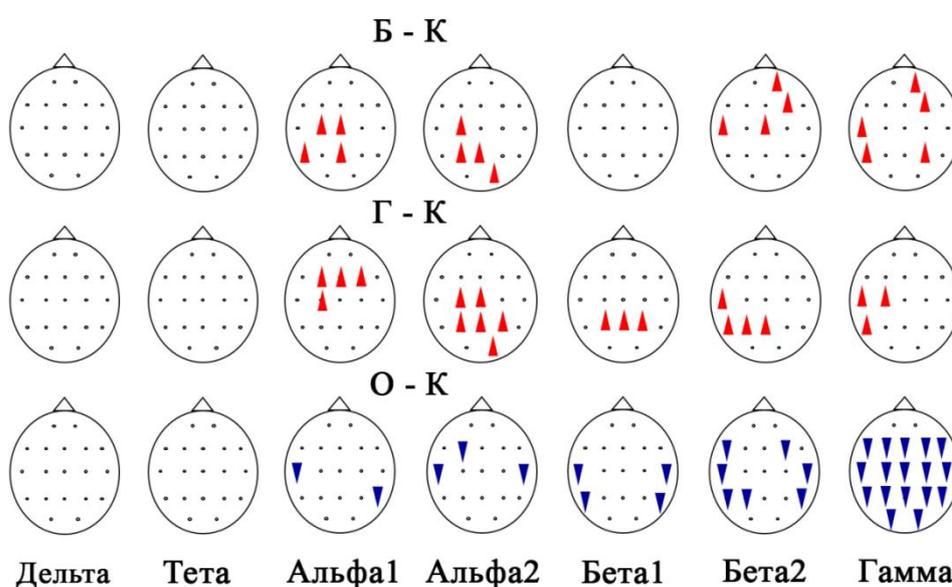


Рисунок 5 – Области увеличения BOLD-сигнала при выполнении заданий «Гибкость» и «Оригинальность» (основной эффект фактора «Творчество»)

В целом, стоит отметить, что полученное в нашем фМРТ исследовании значительное количество мозговых зон, обеспечивающих творчество, вполне ожидаемо, учитывая, что творческая деятельность является принципиально нестереотипной деятельностью по своей сути, для выполнения которой не существует заданных алгоритмов и требуется активация практически всех когнитивных ресурсов. Также обращает на себя внимание хорошее топографическое совпадение и воспроизводимость результатов наших ПЭТ и фМРТ исследований, в первую очередь, в отношении стабильности лобно-теменных активаций в процессе решения вербальных творческих заданий. Возможное функциональное значение данных областей в процессах творческого мышления также было достаточно подробно рассмотрено при обсуждении ПЭТ-результатов (см. разделы 2.1.1 и 2.2.1).

2.3.2 ЭЭГ-результаты выполнения заданий «Беглость», «Гибкость» и «Оригинальность». Статистически достоверные различия в объединенной группе между заданиями на вербальную беглость, гибкость, оригинальность и контрольными заданиями были получены в альфа1,2, бета1,2 и гамма диапазонах (рисунок 6).



Красный треугольник, направленный вверх, обозначает увеличение мощности, синий треугольник, направленный вниз – снижение мощности

Рисунок 6 - Различия мощности ЭЭГ при выполнении заданий «Беглость» (Б), «Гибкость» (Г) и «Оригинальность» (О)

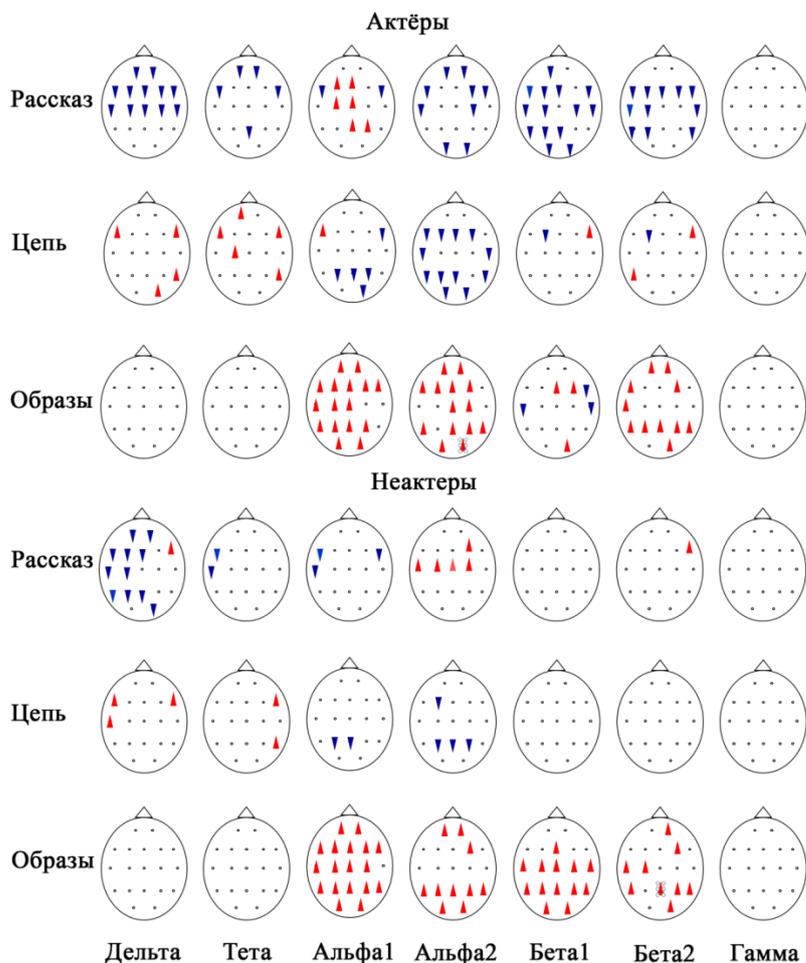
В первую очередь, необходимо отметить определенное сходство результаты выполнения заданий "Беглость" и "Гибкость" – они характеризуются увеличением мощности во всех частотных диапазонах, причем для альфа2-диапазона наблюдается определенное топографическое сходство выявленных изменений (теменная область). Поскольку параметры беглости, гибкости и оригинальности традиционно считаются характеристиками дивергентного мышления, то целесообразно рассмотреть в первую очередь литературные данные по этому вопросу. Ряд исследователей связывает дивергентное мышление с усилением синхронизации в альфа-диапазоне, причем как в лобных областях (Fink et al, 2009; Grabner et al, 2007; Razumnikova, 2004; Lustenberger et al, 2015; Базанова, Афтанас, 2007; Krug et al, 2003), так и в височных и теменных областях (Fink&Neubauer, 2006a; Fink et al, 2009). Как уже упоминалось, синхронизация ЭЭГ в альфа диапазоне может отражать top-down процессы, тормозящие активность, напрямую не связанную с выполняемым когнитивным заданием (см. обзор Klimesch et al, 2007). Существуют данные о синхронизации альфа ритма в процессе воображения (Fink et al, 2009), в том числе художники в процессе воображения демонстрируют сравнительно большую мощность альфа-ритма (Martindale et al, 1984; Fink et al, 2009). Можно предполагать, что усиление мощности, наблюдаемое нами в альфа1-диапазоне, связано с состоянием внутренне-ориентированного внимания, облегчающего когнитивные процессы, такие как память, воображение, ассоциативный поиск, необходимые для успешного решения задач на гибкость и беглость. Изменения в альфа2-диапазоне также могут отражать семантические процессы, которые необходимо вовлекаются при решении задач на гибкость и беглость. Что касается высокочастотных ритмов, то есть наблюдения как о генерализованном снижении мощности в бета-диапазоне (Шемякина, Данько, 2007; Krug et al, 2003, так и наблюдения о повышении мощности бета-ритма (Molle et al, 1999; Razumnikova, 2005, 2007) во время выполнения заданий на дивергентное мышление. Анализируя отмеченные отмеченные разнонаправленные изменения в альфа, бета и гамма диапазонах, упомянутые в литературе, следует отметить, что они могут быть следствием как использования разных контрольных заданий или состояния покоя при сравнении, так и преобладания в использованных авторами тестовых заданиях преимущественно разных параметров творческого мышления. Повышение мощности ЭЭГ в бета диапазоне может отражать внутренние процессы нахождения решения творческой задачи, что сопровождается активизацией всех ресурсов мозга, таких как как концентрация и перераспределение внимания, вовлечение ассоциативного мышления и памяти, активизацию продуктивного воображения, переключения между семантически разными категориями, что необходимо для успешного решения поставленной творческой задачи, что можно трактовать как отражение сознательного контроля творческой активности. Таким образом, в целом мы связываем обнаруженное нами повышение мощности ЭЭГ в альфа, бета и гамма диапазонах во время решения задач на гибкость и беглость с вовлечением когнитивных ресурсов, таких как ассоциативное мышление и память, продуктивное воображение, а также концентрации внимания на возникающих ассоциациях, необходимых для успешного решения поставленных творческих заданий. При анализе результатов выполнения задания на оригинальность обращает на себя внимание снижение мощности в височных отделах билатерально в альфа1,2 и бета1,2-диапазонах, а также генерализованное снижение мощности в гамма диапазоне. Особенностью данного задания было то, что для его выполнения испытуемому нужно было найти всего лишь один уникальный ответ, при этом все остальные - легко возникающие стандартные ответы - должны были им подавляться. Это было связано с тем, что слова в задании на оригинальность были подобраны таким образом, чтобы навязывать испытуемому определенный шаблон рассказа, который он и должен был преодолевать, придумав оригинальный сюжет, отказываясь от стандартных ассоциаций (подавляя их). В этом плане мы можем говорить о возникновении особого состояния,

сходного с инсайтным, что отражается в снижении мощности во всех частотных диапазонах. Наше предположение подтверждается литературными данными, где снижение мощности в альфа диапазоне рассматривается как признак инсайта рядом авторов (Jung-Beeman et al, 2004; Kounios et al, 2006, 2008; Sandkuhler&Bhattacharaya, 2008). Также генерализованное снижение в гамма диапазоне в задании на оригинальность (которое, как уже упоминалось, для своего выполнения требует отказаться от стереотипных реакций) можно рассматривать как проявление работы механизма детекции ошибок (см. раздел 2.5). В целом, обнаруженные нами разнонаправленные изменения электрической активности мозга при выполнении заданий на беглость, гибкость и оригинальность могут характеризовать отличия в функциональном состоянии коры мозга, которое благоприятствует обеспечению отдельных показателей дивергентного мышления при реализации творческой деятельности.

2.3.3 Сопоставление фМРТ и ЭЭГ данных при выполнении заданий "Гибкость" и "Оригинальность". При сопоставлении фМРТ и ЭЭГ- данных следует учитывать, что данные о соотношении BOLD – сигнала и мощности ЭЭГ в отдельных частотных диапазонах неоднозначны. фМРТ данные продемонстрировали изменение функциональной активности в творческих заданиях в теменной, височной и лобной коре, а ЭЭГ-данные продемонстрировали разнонаправленный паттерн изменений мощности ЭЭГ, а именно – увеличение мощности в альфа, бета и гамма диапазонах для гибкости и снижение мощности в этих же диапазонах для оригинальности. Учитывая литературные данные о связи BOLD – сигнала и мощности ЭЭГ, можно сказать, что фМРТ и ЭЭГ данные продемонстрировали свой взаимоподтверждающий характер в отношении альфа, бета и гамма ритмов в обоих заданиях.

2.4 Результаты выполнения заданий «Рассказ», «Цепь», «Образы», «Беглость», «Гибкость», «Оригинальность» у испытуемых с разным уровнем развития креативности. Результаты выполнения тестов «Рассказ», «Цепь», «Образы» в подгруппах актеров и не актеров представлены на рисунке 7.

В первую очередь, следует отметить (исключая задание «Образы») несхожесть паттернов мощности ЭЭГ, продемонстрированных актерами и не актерами. У актеров, в независимости от типа задания, наблюдается более обширное вовлечение зон коры и в большем количестве частотных диапазонов, в отличие от не актеров, где продемонстрированные изменения гораздо более локальны. Более того, у актеров мы можем наблюдать разнонаправленные изменения мощности во всех типах заданий, тогда как не актеры практически не демонстрируют подобных разнонаправленных изменений. На наш взгляд, такой сложный паттерн изменений мощности ЭЭГ у актеров во всех типах задания, может свидетельствовать о том, что мозговое обеспечение творческой деятельности у них осуществляется, по-видимому, более динамично, «избыточно», с подключением большого количества зон («гибкие звенья»), что, возможно, и обеспечивает более легкое и успешное решение ими творческих заданий, за счет, вероятно, более интенсивной и сложной работы воображения и меньшего количества мыслительных операций, предшествующих решению творческой задачи. Такая «сверхактивность» коры при творчестве у актеров также имеет возможное объяснение и с позиций теории доминанты (Ухтомский, 1954). Обращаясь к основному свойству доминанты - суммации разнообразных раздражений, отметим, что в процессе ее формирования (в творческой деятельности) возбуждение коры при восприятии внешних стимулов может суммироваться с возбуждением, получаемым при работе воображения, приводя в итоге к увеличению мощности ЭЭГ. На наш взгляд, различия в мозговом обеспечении творческого мышления у актеров и не актеров проявляются наиболее ярко в изменениях мощности ЭЭГ в альфа и бета диапазонах.



Красный треугольник, направленный вверх, обозначает увеличение мощности, синий треугольник, направленный вниз – снижение мощности

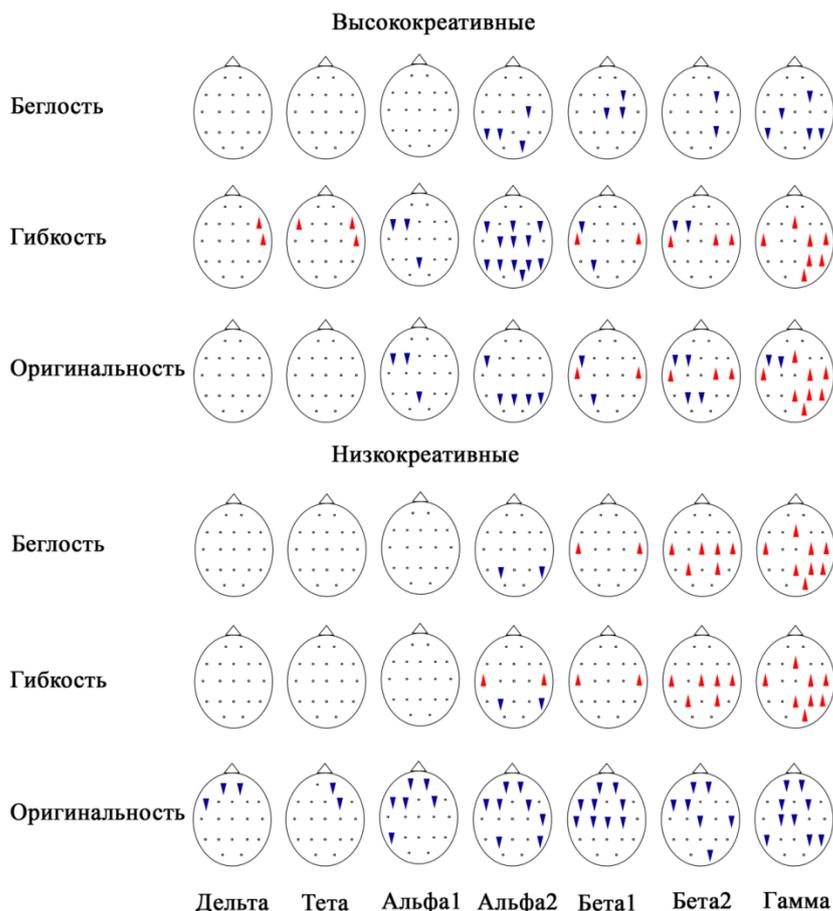
Рисунок 7 - Различия мощности ЭЭГ при выполнении разных типов творческих заданий в группах актеров и не актеров

Есть данные, что в динамике альфа диапазона отражаются процессы модуляции информационных потоков, поступающих в кору - механизм функционирования этой сети заключается в относительном высвобождении теменных зон из взаимодействия с более низкими уровнями обработки информации, поступающей по зрительному каналу (Vanni et al, 1997). Торможение зрительной информации происходит в состоянии т.н. внутренне-ориентированного внимания (Ray&Cole, 1985; Cooper et al, 2003; Klimesch et al, 2007), обеспечивающем готовность к обработке, преимущественно, внутренней информации, например, создания образов в результате работы воображения. Имеются данные об отражении указанного состояния в изменениях альфа1 диапазона ЭЭГ и связи альфа2 диапазона с процессами семантической памяти (для обзора см. Klimesch et al, 2007). Можно предположить, что актеры и не актеры различались не только регулированием поступления зрительной информации, но и обработкой ее смыслового значения. Наличие изменений мощности ЭЭГ в бета диапазоне, отмеченные у актеров и отсутствующие у не актеров (за исключением задания «Образы»), могут свидетельствовать о том, что работа воображения в данном случае сопровождается интенсификацией процессов обработки информации в коре, и данная особенность, по-видимому, может быть усилена (например, специализированным обучением). Существуют многочисленные данные, указывающие на тесную взаимосвязь систем зрительного восприятия и воображения, которая, очевидно, будет играть существенную роль при творческой деятельности. Известно, что в процессы восприятия и

воображения могут вовлекаться одни и те же зоны коры (для обзора см. Kosslyn et al, 2006). Таким образом, наиболее вероятным объяснением полученных изменений оказывается механизм конкуренции воображения и восприятия, как процессов, основанных на внутренних, функционирующих по принципу top-down, и внешних, функционирующих по принципу bottom-up, источниках информации. При творчестве баланс, по-видимому, смещается в сторону обработки информации, получаемой от внутренних источников. Указанный механизм может служить основой возникновения новых необычных образов помимо целенаправленного изменения вектора внимания. Последовательно подтверждают гипотезу о конкуренции источников информации факты о преимущественно внутрикорковом происхождении потенциалов ЭЭГ осциллирующих на частотах бета2 диапазона (Roopun et al, 2006), и их относительной независимости от модуляции сенсорными воздействиями (Pulvermüller et al, 1997), в отличие, например, от частот гамма (свыше 30 Гц) диапазона, а также связи бета2 диапазона с процессами непроизвольной генерации внутренних образов (MacKay&Mendonça, 1995). Создается представление, что внутренние образы осуществляет своего рода прорыв в сознание. Продукты воображения затем подвергаются сознательному анализу и могут быть переведены в формы, позволяющие передать их другим субъектам, например, в виде связного рассказа. Это, в свою очередь, вновь возвращает нас к идее о переключении между различными психическими процессами, получающем особое значение при творческой деятельности и, вероятно, проявляющимся и во взаимодействии восприятия и воображения. Наличие изменений динамики мощности бета2 диапазона ЭЭГ при выполнении творческих задач у актеров представляется функционально комплементарным предложенным механизмам и может рассматриваться в качестве отражающего их нейрофизиологического маркера.

Выполнение заданий «Беглость», «Гибкость» и «Оригинальность» также характеризовалось различными паттернами в группах высоко- и низкокреативных испытуемых, причем паттерны, обнаруженные у высококреативных испытуемых, отличались от паттернов, продемонстрированных актерами (рисунок 8). В первую очередь, следует отметить также различия в паттернах ЭЭГ у высоко и низкокреативных испытуемых при выполнении разных типов творческих заданий. Можно отметить, что каждый параметр креативности (беглость, гибкость и оригинальность) у высококреативных испытуемых характеризуется своей специфической динамикой мощности ЭЭГ, тогда как низкокреативные демонстрируют схожий паттерн мозговой активности в заданиях «Беглость» и «Гибкость». Кроме того, у высококреативных испытуемых мы также наблюдаем разнонаправленные изменения мощности в заданиях (подобно группе актеров), тогда как низкокреативные испытуемые практически не демонстрируют подобных разнонаправленных изменений. В литературе присутствуют достаточно противоречивые взгляды на мозговые корреляты выполнения творческих заданий высоко и низкокреативными испытуемыми. Так, разными исследователями было отмечено у лиц с высокой креативностью как снижение мощности альфа ритма (Petsche et al, 1997) так и повышение (Jausoves, 2000; Свидерская и др, 2007). Molle et al, 1999 нашел, что повышение мощности бета ритма характерно именно для низкокреативных испытуемых, что противоречит данным Sviderskaya et al, 2006 о повышении мощности бета-ритма у высококреативных испытуемых. Разумникова и др, 2009, отмечает увеличение мощности альфа1 ритма у высококреативных испытуемых, а снижение мощности в альфа2 – у низкокреативных. Стоит отметить, что полученные нами данные лучше согласуются с данными Petsche et al, 1997 и Molle et al, 1999. Тем не менее, можно отметить, что наиболее четкая разница между высоко- и низкокреативными испытуемыми проявляется в различиях мощности в бета1,2 и гамма диапазонах. Можно предполагать, что такая разница связана с тем, что успешное выполнение творческих заданий у высококреативных испытуемых связано, в первую

очередь, с увеличением количества возникающих ассоциаций и усилением дифференцированного внимания к ним для отбора релевантных ассоциаций, могущих привести к успешному решению творческой задачи. Снижение мощности в альфа диапазоне у обеих групп испытуемых свидетельствует об общем увеличении уровня активации коры, необходимом для выполнения мыслительных, в том числе и творческих, заданий. При этом, снижение у низкокреативных испытуемых, в частности, во всех диапазонах в задании «Оригинальность» может говорить о том, что для них выполнение этого задания сопряжено с трудностями в концентрации внимания при решении сложной для них творческой задачи и возможном возникновении отрицательных эмоций во время выполнения заданий, что также подтверждается самоотчетами.



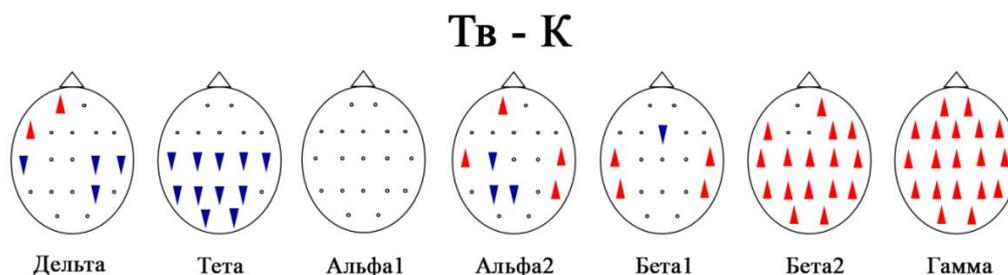
Красный треугольник, направленный вверх, обозначает увеличение мощности, синий треугольник, направленный вниз – снижение мощности

Рисунок 8 - Различия мощности ЭЭГ при выполнении разных типов творческих заданий в группах высоко- и низкокреативных испытуемых

В целом, следует отметить, что мозговое обеспечение актеров и не актеров, а также высоко- и низкокреативных испытуемых оказалось различно. При этом, если актеры осуществляют более легкое и успешное решение творческих заданий, за счет более интенсивной и сложной работы воображения и меньшего количества мыслительных операций, предшествующих решению творческой задачи (изменения мощности в альфа-диапазоне), то высококреативные не актеры – за счет ресурсов внимания, в первую очередь, т.е. увеличения количества возникающих ассоциаций и усиления дифференцированного внимания к ним для отбора релевантных ассоциаций, могущих привести к успешному решению творческой задачи (изменения мощности в высокочастотных диапазонах).

2.5 Результаты выполнения задания «Пословицы» и их обсуждение (данное исследование проведено совместно с к.б.н. Н.В. Шемякиной). В данном задании моделировалась ситуация взаимодействия творческой деятельности и механизма детекции ошибок в нескольких вариантах. Первый вариант – так называемая осознанная детекция, когда в предъявляемой испытуемому фразе была сделана грамматическая ошибка, и так называемая неосознанная детекция, смысл которой состоял в том, что предъявление хорошо известной пословицы или поговорки неизбежно активирует в сознании испытуемого стереотип (ее стандартное окончание), что вступает в противоречие в заданием придумать свой, оригинальный творческий вариант окончания пословицы.

При выполнении задания задания «Пословицы» были получены статистически значимые результаты в дельта, тета, альфа1, бета1, бета 2 и гамма диапазонах в разных контрастах (рисунки 9, 10).

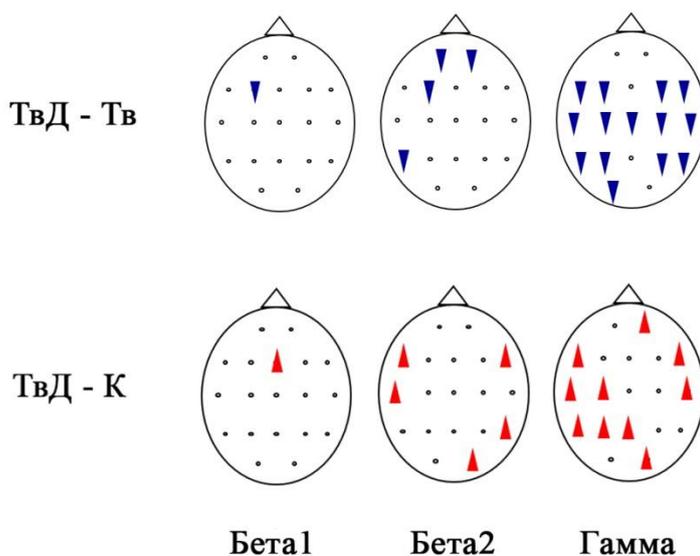


Красный треугольник, направленный вверх, обозначает увеличение мощности, синий треугольник, направленный вниз – снижение мощности

Рисунок 9 - Различия мощности ЭЭГ, полученные в сравнении Тв vs К

Особенностью творческого задания в сравнении с нетворческим (контраст Тв vs К) была необходимость преодоления ранее сформированного стереотипа и поиске (придумывании) в соответствии с заданием, нового, оригинального окончания пословицы и поговорки, существенно меняющего ее смысл. Хорошо известно, что пословицы и поговорки являются закрепленными в матрице памяти стереотипами, а рассогласование с матрицами памяти стереотипа вызывает активизацию мозгового механизма детекции ошибок. Увеличение мощности гамма-ритма неизменно рассматривается как показатель активации мозга и связывается с различными аспектами мыслительной деятельности (см. обзор Сорокина и др, 2006). Высказывалась и точка зрения, что увеличение активности в гамма диапазоне следует рассматривать вне конкретных психических процессов, а как проявление процесса организации и поддержания работы распределенных в пространстве сетевых систем мозга (см, например, Kaiser, Lutzenberger, 2003). В литературе данные о связи высокочастотных диапазонов с творческим мышлением неоднозначны. Есть упоминание как о повышении (Razumnikova, 2005, 2007; Bhattacharya&Petsche, 2002, 2005; Petsche et al, 1997; Sviderskaya et al, 2006; Sandkuhler&Bhattacharaya, 2008; Kounios et al, 2008), так и о снижении (Шемякина и Данько, 2007; Krug et al, 2003) мощности ЭЭГ в бета диапазоне во время процессов творческого мышления. Это касается и гамма-ритма – ряд исследователей наблюдал увеличение его мощности при творчестве (Bhattacharya&Petsche, 2002, 2005; Petsche et al, 1997; Sandkuhler&Bhattacharaya, 2008; Kounios et al, 2008; Jung-Beeman et al, 2004), хотя были и противоположные наблюдения (Kounios et al, 2008). Что касается тета-ритма, то интересно отметить, что его динамика в терминах пространственного распределения во многом схожа с динамикой мощности ЭЭГ в гамма диапазоне в центральных и задних областях коры. Возможно, это отражает явление тесной связи гамма-колебаний с фазой тета колебаний (Bartos et al, 2007) и нельзя исключить возможности, что проявления такой связи могут иметь отношение в искомым коррелятам творческого фактора

в исследуемой деятельности. Уменьшение мощности тета-ритма скорее всего отражает развитие способствующей творчеству эмоциональной реакции, создающей необходимые условия (базис) для реализации творческого процесса. Можно предположить, что увеличение мощности высокочастотных ритмов ЭЭГ при выполнении творческой задачи на генерацию оригинальных окончаний к общеизвестным пословицам и поговоркам было связано с рядом когнитивных процессов, таких как: осознание первоначального смысла пословицы, преодоление ранее сформированного стереотипа, т.е. в успешном варианте решения задачи удавалась «ломка» или отклонение от стереотипа (необходимый компонент творческой деятельности), возможно через поиск неожиданных ассоциаций. Поиск ассоциаций, в свою очередь мог сопровождаться, как минимум двумя процессами, способными отразиться в динамике мощности и высокочастотного бета ритма ЭЭГ – это рассеивание/концентрация внимания, важное для успешного поиска неожиданных ассоциаций и/или возникновение спонтанных эмоциональных реакций. На основании результатов, проиллюстрированных рисунками 9 и 10 было сделано предположение о том, что нейрофизиологические корреляты выполнения задачи на осознанную и неосознанную детекцию ошибок оказались схожими (увеличение мощности в высокочастотных диапазонах). Таким образом, увеличение мощности, наблюдавшееся в высокочастотных диапазонах ЭЭГ при выполнении творческой задачи (рисунки 9 и 10) мы прежде всего связываем с вовлечением испытуемых в процесс творческого поиска, и возможно с возникновением спонтанных эмоциональных состояний, неотделимых от творчества.



Красный треугольник, направленный вверх, обозначает увеличение мощности, синий треугольник, направленный вниз – снижение мощности

Рисунок 10 - Различия мощности ЭЭГ, полученные в сравнениях ТвД vs Тв и ТвД vs К

В контрасте ТвД vs Тв (рисунок 10) показано отражение механизма детекции ошибок в уменьшении мощности гамма-активности. По-видимому, в динамика мощности гамма ритма, связанная с активацией детектора ошибок, вследствие необходимости преодоления стереотипа, маскируется существенным усилением той же гамма активности, связываемой нами с собственно творческим процессом. Таким образом, генерализованное увеличение мощности в гамма и бета2 диапазонах ЭЭГ, по-видимому, связаны с собственно творческими процессами и в том числе с возникновением неотделимых от творческого процесса спонтанных эмоциональных состояний.

2.6 фМРТ результаты выполнения заданий «Выбор» и «Импровизация» и их обсуждение. Данное задание также было направлено на проверку гипотезы о возможной функциональной роли мозгового механизма детекции ошибок в обеспечении творческой деятельности - играет ли механизм детекции ошибок оптимизирующую или затрудняющую роль в творческом процессе. Моделировалась ситуация возможной оптимизирующей роли детектора ошибок в творчестве, которая может быть связана с выбором «наилучшего» решения среди других возникающих/предложенных вариантов. В этом плане роль механизма детектора ошибок сводится к оцениванию нескольких творческих решений и выбору из них одного «правильного» и отбрасывания остальных решений как «неправильных». Такой взгляд на вклад механизма детекции ошибок в процессы выбора творческого «решения», связан с известной ролью этого механизма в процессах выбора действия, когда детектор ошибок срабатывает при попытке реализовать некорректный вариант действия. Следовательно, реализация творческой деятельности в условиях выбора из предлагаемых вариантов «решения» будет сопровождаться вовлечением структур мозга, связанных с обеспечением работы мозговой системы детекции ошибок (передняя поясная кора). С другой стороны, учитывая наши экспериментальные данные (ПЭТ –данные заданий «Рассказ», «Цепь» и фМРТ-данные заданий «Гибкость» и «Оригинальность») в ситуациях, когда творческое решение предполагает не выбор из нескольких внешних предлагаемых вариантов, но «генерацию» своего варианта творческого решения, хотя и возможно с выбором из нескольких внутренних вариантов, можно ожидать относительно меньшее вовлечение структур, обеспечивающих работу мозгового механизма детекции ошибок. Предполагается, что таким образом проявляется, наиболее правдоподобная на наш взгляд, ограничительная роль механизма детекции ошибок, вовлечение которого ограничивает возможности человека в принятии нестандартных решений.

В результате проведенного исследования удалось локализовать набор кластеров, в которых наблюдалось значимое влияние фактора «Творчество» («Выбор + Импровизация»), который связан с большими значениями BOLD-сигнала в творческих условиях по сравнению с контрольными (Выбор+Импровизация) (рисунок 11А) и основной эффект типа задания (творческая Импровизация+контрольная Импровизация) и (творческий Выбор+контрольный Выбор) (рисунок 11Б).

Выполнение творческих заданий (фактор «Творчество») характеризовалось изменением функциональной активности (больший уровень BOLD сигнала) относительно контрольных заданий в следующих областях: левая нижнелобная извилина (поле Бродмана (ПБ) 45/47), среднелобная извилина (ПБ 44), правая нижнелобная извилина, левая угловая извилина, левая надкраевая извилина и средняя височная извилина (ПБ 21/22), полюс височной коры (ПБ 21/38) и средняя височная кора.

В соответствии со значимым действием основного эффекта «Тип задания» большие значения BOLD сигнала в условиях генерации своего варианта пропущенного слова/словосочетания, т.е. импровизации, по сравнению с условиями выбора, были выявлены в передней поясной коре (ПБ 24/32) билатерально, дополнительной моторной коре (ПБ 6), левой нижней лобной извилине и островке (44/45/47, 13). Также в соответствии со значимым действием основного эффекта «Тип задания» большие значения BOLD-сигнала для условий, подразумевающих выбор, по сравнению с условиями с импровизацией, были выявлены в первичной и ассоциативной зрительной коре, клине, предклинье, угловой извилине (ПБ 40), нижней теменной дольке, парагиппокампальной извилине.

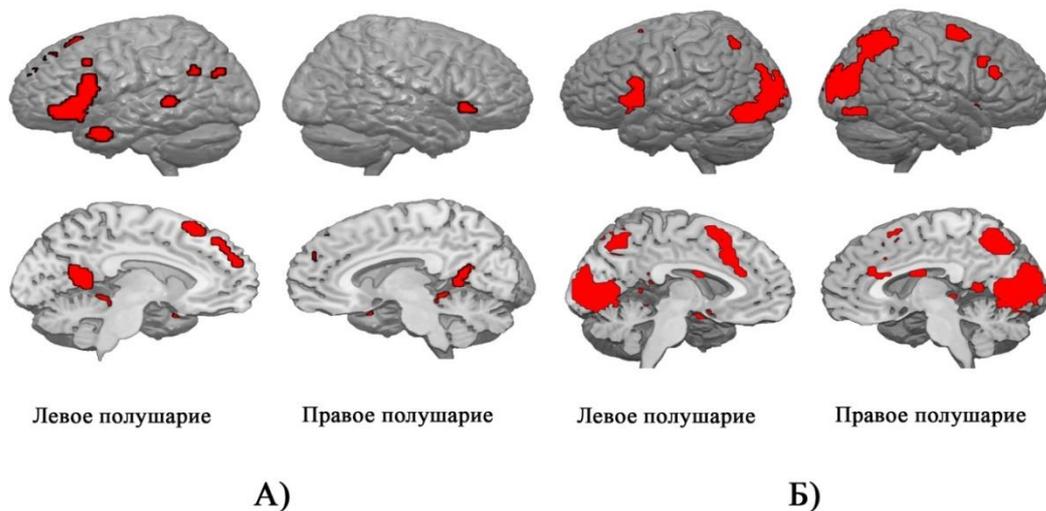


Рисунок 11 - Области увеличения BOLD-сигнала при выполнении заданий «Выбор» и «Импровизация» А) основной эффект фактора «Творчество» Б) основной эффект фактора «Тип задания»

В условии "Импровизация" показана большая активность передней поясной и нижнелобной извилин по сравнению с условием "Выбор", что может свидетельствовать о том, что механизм детекции ошибок в большей степени вовлекается в обеспечение процессов выбора из индивидуальных вариантов решения, а не из предложенных извне. Данный эффект наблюдается вне зависимости от типа деятельности – творческой или нетворческой импровизации. В свою очередь, это может говорить в пользу гипотезы об оптимизирующей, а не ограничивающей роли мозгового механизма детекции ошибок в процессах творческой деятельности. Учитывая данные о том, что поясная кора, помимо процессов инсайта, где она осуществляет мониторинг когнитивного конфликта и инициирует процессы, ведущие к слову стереотипов, мешающих нахождению решения (Aziz-Zadeh et al, 2009; Luo et al, 2004; Kounios et al, 2006), также вовлечена и в процессы внимания (Small et al, 2003) и в процессы когнитивного контроля в лобной коре (Bush et al, 2000; Botvinick et al, 2004; Kerns et al, 2004), то можно предположить, что здесь ее роль заключается в облегчении доступа к отдаленным семантическим ассоциациям, позволяя испытуемым выбрать наиболее подходящее слово/словосочетание, отбрасывая ненужные интерпретации (Subramaniam et al, 2013). Левая нижнелобная извилина ответственна за семантические процессы, включая извлечение и выбор семантических концептов (Badre&Wagner, 2007; Badre et al, 2005; Blumenfeld& Ranganath, 2007). Эти процессы, включая интеграцию сохраненной информации, могут играть важную роль в творческом мышлении, которое требует извлечения и выбора отдаленных ассоциаций, интеграция слабо связанных семантических концептов и разработку идей. Активация в левой нижнелобной извилине также выше, когда требуется большее вовлечение исполнительных функций (Whitney et al, 2011). Таким образом, генерация творческих ответов в задании «Импровизация» может опираться на эффективное подавление доминирующих, но нетворческих реакций, чтобы избежать интерференции и получить доступ к более отдаленным ассоциациям.

В условии «Выбор» показана большая активность в теменно-затылочной области, включая веретенообразную, язычковую и угловую (ПБ 40) извилины в сравнении с условием «Импровизация». Вероятно, что в условиях внешнепредложенного выбора, детектор ошибок не играет или играет гораздо меньшую роль, чем в процессах выбора из внутренних индивидуальных процессов решения. Напомним, что в задании на творческий выбор предлагались амбивалентные фразы-афоризмы с семантической неоднозначностью, причем

выбор одного из вариантов убирал данную неоднозначность, а другие – сохраняли ее. Поэтому для успешного выполнения задания необходимо было вначале определить наличие данной неоднозначности, и затем уже сделать выбор. Учитывая, что угловая извилина вовлечена в семантические процессы (Binder et al, 2009), в первую очередь, в процесс понимания и генерации метафор (т.е. в определенном смысле неоднозначных значений) (Rapp et al, 2012) и играет ключевую роль в стратегическом извлечении и комплексной интеграции информации (Benedek et al, 2014), это может объяснить ее усиленное вовлечение в процесс выбора, в частности, творческого. Также есть данные, что языковая извилина обеспечивают уникальность (оригинальность) ответов (Benedek et al, 2014), а парагиппокампальная извилина включена в систему декларативной памяти (Squire et al, 2004). В целом, вместе эти структуры обеспечивают процессы выбора подходящего варианта, по мнению испытуемого, через процесс понимания неоднозначности вариантов, через активацию и связывание семантически отдаленных понятий. Активация теменно-затылочных областей также характерна для процессов, связанных с образной составляющей любого творческого процесса (Ellamil et al, 2012; Gonen-Yaacovi et al, 2013; Huang et al, 2013; Aziz-Zadeh et al, 2013; Park et al, 2015; Saggar et al, 2015; Voccia et al, 2015). Вероятно, усиленное вовлечение процессов воображения в условия «Выбор» облегчало выбор одного из вариантов, особенно в условиях нетворческого выбора, что подтверждается самоотчетами испытуемых. В условиях нетворческого выбора (с равнозначными вариантами, не подразумевающими семантической неоднозначности), большинство волонтеров представляло себе картины (образы), в которых присутствовал один из вариантов ответа. Также не исключено, что большая активность теменно-затылочных областей связана с концентрацией фокуса внимания на внешних стимулах – вариантах ответа, в отличие от условия «Импровизация», где для успешного выполнения задания необходимо было перераспределить фокус внимания во внутрь.

Таким образом, учитывая области активации, полученные в данном сравнении, можно предположить, что в процессах внешнепредложенного выбора большую роль играют процессы, связанные, в первую очередь, с воображением и распознаванием семантической неоднозначности предложенных вариантов, что облегчает выбор подходящего или наиболее оригинального, по мнению испытуемого, варианта, а не процессы, напрямую связанные с механизмом детекции ошибок. В целом, следует отметить, что при анализе основного эффекта фактора «Творчество», вне зависимости от типа задания (импровизация или выбор), снова показано устойчивое вовлечение лобно-теменной системы в обеспечение творческой деятельности, что согласуется с нашими ПЭТ-данными (задания «Рассказ» и «Цепь») и фМРТ-данными (задания «Гибкость» и «Оригинальность»). Важно отметить, что наблюдаемое нами в наших тестовых заданиях устойчиво-воспроизводимое вовлечение лобно-теменных областей (также подтверждаемое литературными данными) наблюдается независимо от используемого метода регистрации данных (ПЭТ или фМРТ), при выполнении разных типов творческих заданий (т.е. независимо от временных и качественных особенностей вербальной творческой деятельности) и без учета индивидуальных особенностей испытуемых, принявших участие в наших нейрофизиологических исследованиях. Учитывая вышесказанное, мы можем сделать предположение о том, что данные зоны являются наиболее вероятными кандидатами на роль «жестких» звеньев системы, обеспечивающей вербальную творческую деятельность в независимости от временных и качественных особенностей самой творческой деятельности и индивидуальных особенностей испытуемых.

2.7 Анализ функциональных взаимодействий в фМРТ-исследованиях. Поскольку увеличение активности в какой-либо структуре мозга может сопровождаться как увеличением, так и ослаблением ее функциональных взаимодействий с другими структурами

мозга (Киреев, 2017), для полноценного описания вовлечения звена в работу системы используется анализ функциональных взаимодействий.

В первом фМРТ исследовании (с использованием заданий «Гибкость» и «Оригинальность» для анализа функциональных взаимодействий были выбраны следующие области интереса (ОИ): 1) левая нижнетеменная кора (ПБ 39); 2) левая верхнелобная извилина; 3) левая нижнелобная извилина.

1) ПБ 39 (нижнетеменная кора) демонстрирует ослабление функциональных взаимодействий с верхнелобной и среднелобной извилинами (ПБ 9, 10), с передней поясной извилиной и задней поясной корой (ПБ 32, 31) и областью клина и предклинья при сравнении всех творческих заданий с контрольными (основной эффект «Творчество») (рисунок 12А). Данный эффект не совпадает с тем, что обнаруживается при анализе изменений уровней функциональной активности – при творческих заданиях в данной ОИ (ПБ 39) наблюдается увеличение BOLD-сигнала.

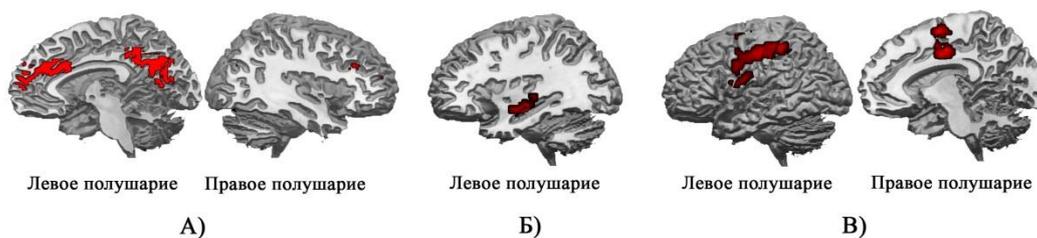


Рисунок 12 - Области изменения функциональных взаимодействий для А) нижнетеменной коры (основной фактор «Творчество») Б) левой верхнелобной извилины (основной эффект фактора «Сложность») В) левой нижнелобной извилины (смешанный эффект)

В литературе ПБ 9, 10 (верхне- и среднелобные извилины) описываются как области, связанные с процессами когнитивного контроля, обеспечивая и оптимизируя процессы, выполняемые задней корой и подкорковыми регионами (Smith&Jonides, 1999; Fuster, 2001; Miller&Cohen, 2001; Wood&Crafman, 2003), а также с процессами генерации действий (Frith et al, 1991; Rowe et al, 2008), которые требуют свободы выбора собственных реакций, также как и их селекции и мониторинга. Таким образом, мы рассматриваем ослабление функциональных взаимодействий между лобной и теменной корой как ослабление когнитивного контроля в процессах творческого мышления, что обеспечивает свободную генерацию новых оригинальных идей в теменной коре, необходимую для успешного решения творческих задач. Данное ослабление функциональных взаимодействий в лобно-теменной системе обеспечения творческого мышления согласуется концепцией transient hypofrontality, т.е. временного снижения активности префронтальной коры и как следствие когнитивного контроля (Dietrich, 2006), необходимого для творческого процесса. Ослабление функциональных взаимодействий между лобной и теменной областями также может быть связано с спонтанным подавлением посторонних мыслей для формирования новых ассоциаций во время решения творческих задач (Tian et al, 2011).

Таким образом, для успешного выполнения творческих задач, по-крайней мере, аналогичных нашим задачам на «Гибкость» и «Оригинальность», необходимо ослабление когнитивного контроля для того, чтобы обеспечить переориентацию внимания на внутренние процессы, стимулирующие творческий поиск, такие как, например, воображение и генерация новых идей без критического контроля лобной коры. Поскольку передняя поясная извилина известна как ключевая структура механизма детекции ошибок, то ослабление функциональных взаимодействий между ней и нижнетеменной корой также рассматривается как меньшее вовлечение механизма детекции ошибок в процессы творческого мышления. Поскольку мы рассматриваем основной эффект фактора

«Творчество» безотносительно типа задания (на «Гибкость» и «Оригинальность»), а они активируют разные типы творческого мышления, то здесь можно сделать двойное предположение о роли детектора ошибок. В задании на «Гибкость» нет сформированного заранее стереотипа, а в задании на «Оригинальность» некая степень такого стереотипа присутствует. Поэтому данное ослабление функциональных взаимодействий может отражать как «невовлечение» механизма детекции ошибок (поскольку стереотипа нет, то не с чем сравнивать творческое «отклонение»), так и то, что механизм детекции ошибок вовлекается (задание «Оригинальность» предполагает наличие некой степени стереотипа), но для успешного выполнения задания его требуется «отключить», что и отражается в ослаблении функциональных взаимодействий. Таким образом, в целом можно рассматривать ослабление функциональных взаимодействий нижнетеменной коры (как структуры, обеспечивающей творчество) с префронтальной и поясной корой как доказательство меньшего вовлечения механизмов когнитивного контроля и детекции ошибок в процессы творческого мышления.

2) Левая верхнелобная извилина демонстрирует усиление функциональных взаимодействий с парагиппокампальной извилиной, скорлупой и чичевицеобразным ядром при сравнении всех сложных (сложное творческое+сложное контрольное) заданий с простыми (простое творческое+простое контрольное) (основной эффект фактора «Сложность») (рисунок 12Б). Верхнелобная извилина вовлечена в процессы рабочей памяти и внимания, а парагиппокампальная извилина включена в систему декларативной памяти (Square et al, 2004). Таким образом, усиление взаимодействий между структурами памяти и внимания, связанные с усложнением деятельности, вполне ожидаемы, и могут рассматриваться, как усиление когнитивного контроля с усложнением выполняемой деятельности

3) Левая нижнелобная извилина демонстрирует смешанный эффект, т.е. взаимодействие факторов «Творчество» и «Сложность», который проявляется как усиление функциональных взаимодействий при простых творческих заданиях (по сравнению с контрольными), и ослабление взаимодействий при сложных творческих заданиях (по сравнению с контрольными) со структурами теменной коры (ПБ 40), правой средней поясной коры (ПБ 24) и областями дополнительной моторной коры (ПБ 6) и пре- и постцентральными извилинами (рисунок 12В). При простых творческих заданиях изменения BOLD сигнала относительно контрольных, совпадают с направлением изменений функциональных взаимодействий – увеличиваются при творческих тестовых заданиях. Однако, при усложнении деятельности, наблюдается рассогласование между двумя показателями: если уровень функциональной активности при творческих заданиях всегда больше, чем при контрольных (вне зависимости от сложности), то при усложнении деятельности наблюдается ослабление функциональных взаимодействий при выполнении творческих тестовых заданий относительно контрольных.

Левая нижнелобная извилина связана с обеспечением исполнительных функций (Whitney et al, 2011), таких как оценка и выбор релевантного ответа и подавление нерелевантного (Glucksberg et al, 2001; Badre&Wagner, 2007; Rapp et al, 2012), а также с процессами понимания метафор и их генерацией (Rapp et al, 2004; Eviatar&Just, 2006; Mashal et al, 2007; Binder et al, 2009; Bambini et al, 2011). При анализе функциональных взаимодействий левой нижнелобной извилиной с теменной и поясной областями видно, что более простые творческие задания демонстрируют процесс усиления функциональных взаимодействий между областями, ответственными за когнитивный контроль, детекцию ошибок и творчество, т.е. происходит своего рода интенсификация когнитивных процессов, что вполне укладывается в понимание творческого мышления как характеризующегося не спецификой, а интенсивностью задействованных когнитивных процессов. Мы видим, что более простая творческая деятельность хорошо сочетается с процессами когнитивного

контроля, по-видимому, потому, что в ней не присутствует стереотип в явной степени, она не регламентирована им, а значит, в определенном смысле этого слова, творческая деятельность без явного стереотипа поддается общим механизмам регуляции мышления – чем сложнее задание, тем больше активация структур, и тем сильнее взаимодействие.

Однако, при увеличении степени сложности творческой деятельности, ее «нестереотипности», механизмы регуляции мышления из «помогающих» становятся «мешающими», не позволяющими достигнуть результата (творческого решения), и для обеспечения достижения результата требуется ослаблять процессы когнитивного контроля и действие механизма детекции ошибок, что и проявляется в ослаблении функциональных взаимодействий, наблюдаемых нами.

Таким образом, впервые показано, что структура функциональных взаимодействий областей, вовлекаемых в обеспечение творческой деятельности, носит амбивалентный характер. При стандартном анализе фМРТ данных, изменения уровня функциональной активности однонаправленные – во всех выявленных кластерах функциональная активность областей мозга выше при творческих заданиях (по сравнению с контрольными). Однако, при этом, сама структура функциональных взаимодействий этих же областей носит, по сути, разнонаправленный характер: с одной стороны, наблюдается как ослабление, так и усиление взаимодействий между теменной и префронтальной и поясной корой.

Усиление взаимодействий рассматривается как усиленное вовлечение всех когнитивных ресурсов, интенсификация мыслительных процессов для решения творческой задачи без явного стереотипа в своем условии. Ослабление функционального взаимодействия между лобными и теменными зонами в процессе творчества рассматривается как уменьшение влияния системы детекции ошибок и когнитивного контроля. Таким образом, проведение анализа функциональных взаимодействий раскрывает физиологический смысл выявленного вовлечения отдельных областей лобно-теменной мозговой системы обеспечения творческой деятельности.

Во втором фМРТ исследовании (с использованием заданий «Выбор» и «Импровизация») для анализа функциональных взаимодействий была выбрана область интереса в передней поясной коре (как ключевая структура механизма детекции ошибок). В данном случае логичными выглядят два предположения:

1) Если вывод об оптимизирующей роли механизма детекции ошибок – верен, то при анализе функциональных взаимодействий при творческой деятельности будет наблюдаться усиление функциональных взаимодействий поясной коры, со структурами префронтальной и/или теменной коры, связанными с обеспечением процессов выбора, принятия решения и планирования действий (т.е. с исполнительными функциями) 2) Если верна гипотеза об ограничивающей роли механизма детекции ошибок при творческой деятельности, то наоборот, должно наблюдаться ослабление взаимодействий вышеупомянутыми структурами, как это наблюдалось в первом фМРТ исследовании.

В результате проведенного РРІ анализа для области интереса, локализующейся в правой передней поясной коре был выявлен только основной эффект фактора «Творчество» в соответствии с которым наблюдался смешанный эффект: 1) передняя поясная кора демонстрировала ослабление функциональных взаимодействий с дополнительной моторной корой (билатерально), правой нижнелобной извилиной, а также с теменной корой (угловая извилина) (рисунок 13А) 2) передняя поясная кора демонстрировала усиление функциональных взаимодействий с зонами среднелобной извилины рострального положения (полюс лобной доли) (ПБ 10) билатерально и средневисочной извилиной (рисунок 13Б).

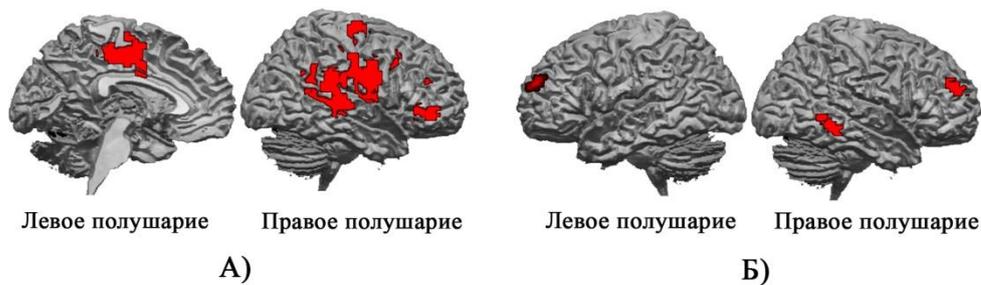


Рисунок 13 - Изменения функциональных взаимодействий с передней поясной корой
 А) области ослабления Б) области усиления

Факт ослабления функциональных взаимодействий между структурами поясной коры и префронтальной и теменной областями совпадает с найденным нами ослаблением функциональных взаимодействий в первом фМРТ исследовании. Как уже упоминалось выше, мы рассматриваем данное ослабление функциональных взаимодействий как уменьшение влияния когнитивного контроля и механизма детекции ошибок в процессах творческого мышления. Таким образом, с учетом воспроизводимого ослабления лобно-теменных взаимодействий при выполнении разных типов творческих заданий, мы можем говорить об ограничивающей роли механизма детекции ошибок в творческом процессе.

Медиальная ростральная префронтальная кора (ПБ 10) является критически важным регионом для генерации необычных идей и связана с оригинальностью реакций/ответов (Shamay-Tsoory et al, 2011; Gonen-Yaacovi et al, 2013). Есть данные, что эта область вовлечена в кодирование семантической дистанции между понятиями (Green et al, 2012), в фантазировании о возможных альтернативах уже произошедших событий (Gomez Beldarrain et al, 2005; Van Hoesck et al, 2013), в проспективную память (т.е. в память о запланированных событиях на будущее) и размышления о будущем (Hassabis et al, 2007; Schacter et al, 2007; Abraham et al, 2008; Addis et al, 2009; Szpunar et al, 2009; Burgess et al, 2011; Volle et al, 2011), в процессы эмпатии (Frith&Frith, 2006; Andrews-Hanna et al, 2010; Gilbert et al, 2010) и грезы (мечты) (Christoff et al, 2009; Mason et al, 2007). Все эти когнитивные функции могут быть вовлечены в процессы поиска альтернативных решений в процессе генерации идей. Кроме этого, как уже упоминалось выше, ПБ 10 играет ключевую роль в процессах обеспечения рабочей памяти, а именно - удержания в памяти целей деятельности, а также абстрактных правил ее выполнения. Также есть данные, что активность в ПБ 10 выше, чем чем более не регламентирована выполняемая деятельность, т.е. чем ниже уровень ее автоматизма (Jeon&Friederici, 2015). Это хорошо согласуется с тем, что активация в ПБ 10 отражает именно творческую деятельность, которая априори имеет низкий уровень автоматизма при ее выполнении и практически не регламентирована. С этой стороны, учитывая усиление функциональных взаимодействий поясной извилины с ПБ 10, мы можем говорить об оптимизирующей роли детектора ошибок в творчестве.

Таким образом, показан неоднозначный характер функциональных взаимодействий системы, обеспечивающей вербальную творческую деятельность, с механизмом детекции ошибок. С одной стороны, полученные данные можно трактовать как оптимизирующую роль детектора ошибок, особенно в процессах выбора индивидуального варианта решения при творческой деятельности, и, не связанной, при этом, напрямую с преодолением стереотипов. С другой стороны, когда реализация творческой деятельности тесно связана с преодолением стереотипа, детектор ошибок конфронтует с творческим вариантом мыслительной деятельности, выступая как ограничитель, что отражается в ослаблении функциональных взаимодействий между лобными и теменными областями. По нашему мнению, последний вывод кажется нам наиболее правдоподобным. Применение комплексного подхода по

оценке локальной активности и функциональных взаимодействий, позволило раскрыть сложную организацию функциональных отношений между различными звеньями мозговой системы организации вербального творчества. Обнаружены не только новые, не видимые в активационном исследовании звенья, но и показан сложный характер их вовлечения в деятельность.

2.8 Тренировка творчества (данное исследование проведено совместно с А.Р. Родионовым). В качестве основы для тренировки была использована классическая структура групповых актерских тренингов и сформировано два блока упражнений, названных внешне-ориентированный и внутренне-ориентированный тренинг. В первый блок (внешне-ориентированный тренинг, Ext) вошли упражнения, предполагающие направленность внимания и его концентрацию в условиях отвлекающих воздействий, на информацию, поступающую из внешней среды, быстрое реагирование на внешние стимулы, различные объекты, звуки и слова, различные по сложности варианты запоминания и воспроизведения информации из эпизодической памяти. Упражнения состояли из задания, которое давал исследователь, его непосредственного выполнения испытуемым в течение 10-20 секунд и проверки результатов. Во второй блок (внутренне-ориентированный тренинг, Int) вошли упражнения, предполагающие отсроченное во времени реагирование, замедленный, по сравнению с блоком 1, темп выполнения. Продолжительность непосредственного выполнения каждого задания варьировала от 30 секунд до нескольких минут. Упражнения предполагали использование информации, извлеченной из долговременной памяти и активное использование процессов воображения, создание и удержание образов, переключения между образами, трансформация вербальной информации в зрительные образы, создание сложных сюжетных образов и т.д. Оба блока длились 25-30 минут и были построены так, что в начале предъявлялись наименее сложные упражнения, а затем сложность упражнений постепенно увеличивалась. Также сложность возрастала внутри отдельных упражнений. Перед каждым типом тренинга был интервал времени в 10 минут. Каждое упражнение длилось 30-180 секунд. После проведения каждого сеанса тренинга регистрировалась ЭЭГ при выполнении творческого (задание «Гибкость») и контрольного заданий, описанных в разделе 1.4.3. Вызванная синхронизация и десинхронизация ЭЭГ (ВС/ВД) была рассчитана в специализированном программном обеспечении WinEEG и анализировалась в частотных диапазонах тета, альфа 1 (8-10 Гц), альфа 2 (10-12 Гц), бета 1 (12-18), бета 2 (18-30).

В результате было показано, что Ext и Int тренинги оказывают различное воздействие на успешность решения творческих задач. Анализ успешности выполнения творческих заданий свидетельствует об эффективности кратковременного воздействия Int тренинга для решения творческих задач, требующих активизации воображения, ассоциативного мышления и увеличения объема обрабатываемой информации. Подобное выраженное увеличение показателей успешности выполнения творческих заданий может быть обусловлено комплексным воздействием упражнений, развивающих параллельно множество навыков, мыслительных операций и их взаимосвязей. Особенности временной динамики по данным ВС/ВД в тета диапазоне при выполнении творческих задач являются раннее вовлечение (200-350 мс) левой теменной зоны, более позднее вовлечение (600-800 мс) правой теменной зоны, и еще более позднее вовлечение центрально-теменной зоны (1250-1550 мс), правой задне-височной зоны (1290-1390 мс), центральной зоны (1400-1450 мс и 2000-2200 мс), а также левой передней лобной зоны (2250-2300). В указанных зонах выполнение творческих задач после Int тренинга характеризуется большей вызванной синхронизацией, чем выполнение тех же задач после Ext тренинга. Полученные данные показывают, что Int тренинг приводит, кроме прочего, к улучшению работы эпизодической памяти и более эффективному запоминанию новой информации.

Результаты, полученные в альфа1 диапазоне после Int тренинга демонстрируют отсроченное во времени вовлечение левой теменной зоны (вызванная синхронизация на интервале 1200-1450 мс) при выполнении творческих задач (стадия предшествующая выполнению задания). Синхронизация, обнаруженная на стадии предшествующей выполнению задания, когда испытуемый не выполнял никакой конкретной задачи, предположительно, давала возможность перераспределить внимание, что могло сказываться на снижении напряжения и усталости, возникающих при длительной концентрации внимания. Подчеркнем, что данный эффект обнаружен при выполнении творческих задач после Int тренинга, что является новым и неожиданным результатом, показывающим, что творческая деятельность может обеспечиваться особой временной динамикой процессов внимания. Также в альфа 1 диапазоне в тех же условиях показано ранее вовлечение) левой височной зоны, что указывает на более активное участие височной коры после воздействия внутренне-ориентированного тренинга.

Результаты, полученные в альфа2 диапазоне при анализе ВС/ВД показывают, что Int тренинг приводит к более эффективному использованию мозговых ресурсов при выполнении творческих задач, в частности при извлечении информации из долговременной памяти, что может способствовать ее лучшей интеграции в мысленные образы и отражаться в увеличении успешности творческой деятельности. Показано, что стадия, предшествующая выполнению задания после воздействия Int тренинга при сравнении с Ext тренингом сопровождается вызванной синхронизацией, проявляющейся как относительно рано (на 30-220 мс в правой височной зоне, на 390-550 мс в левой теменной зоне), так и более отсроченной во времени (на 880-1200 мс в левой передней лобной зоне, на 660-1590 мс и 1800-2200 мс в правой передней лобной зоне, на 1160 – 1460 мс в левой передней височной зоне, на 1040 – 1300 мс в правой задней лобной зоне, на 400 – 700 мс и 1160-1600 мс в правой передней височной зоне, на 580-630 мс и 1430-1760 мс в центральной зоне, на 820-1230 мс в правой височной зоне, на 1080-1340 мс в левой теменной зоне, на 1100-1280 мс в центральной теменной зоне, на 1040-1230 мс в правой теменной зоне, на 1280-1450 мс в правой задней височной зоне, на 800-870 мс и 1100-1250 мс в левой затылочной зоне). Эти данные имеют логичное объяснение с позиций гипотезы нейронной эффективности (Haier et al., 1992), утверждающей, что лица с более развитыми интеллектуальными ресурсами имеют менее выраженную вызванную десинхронизацию в когнитивных тестах, что связано с более высоким общим уровнем торможения коры, и более эффективным использованием для решения когнитивных задач ограниченного количества корковых зон. Можно полагать, что синхронизация во многих зонах коры с выраженной правосторонней латерализацией на стадии предшествующей выполнению задания, показанная при воздействии Int тренинга, позволяет эффективнее использовать мозговые ресурсы, в частности давая возможность вовлекать зоны правого полушария в процессы воображения. Также вызванная синхронизация в тех же условиях обнаружена на этапе выполнения задания в правой передней височной зоне (на 190-250 мс и 540-640 мс), левой передней височной зоне (на 1550-1600 мс) и правой передней лобной зоне (на 1850-2300 мс). Эти данные показывают, что непосредственно при творческой деятельности процессы торможения охватывают передние зоны коры, что может свидетельствовать в пользу предположений о снижении сознательного контроля при творчестве и автоматическом и характере процессов извлечения информации из памяти. Таким образом, основным результатом данного исследования является то, что один сеанс актерского тренинга влияет на активность мозга и значительно улучшает поведенческие характеристики, а теменные области можно рассматривать как элемент системы обеспечения творческого мышления, который наиболее чувствителен к актерскому тренингу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на то, что систематические исследования мозговой организации творческого мышления начались с 70-х гг 20 века, в мире до сих пор не выработана единая непротиворечивая концепция реализации мозгом творческой деятельности. Для преодоления такой ситуации необходимо выработать иной подход к исследованиям творческого процесса. В данной работе нами был предложен вариант такого подхода, учитывающий сложность и неоднородность творческого мышления и отличающийся от ранее использовавшихся парадигм одновременным учетом ряда особенностей, таких как индивидуальные особенности индивида, вносящие свой вклад в обеспечение специфики творческого мышления; временные и качественные особенности самой творческой деятельности; использование разработанной батареи взаимосогласованных тестовых заданий, которые освещают проблему творческого мышления, по возможности, со всех сторон и результаты выполнения которых можно сравнивать между собой; использование полиметодического подхода (Н.П. Бехтерева, 1974, 1985, 1988), позволяющего взаимодополнить и взаимоподтвердить нейрофизиологические данные, получаемые разными методами с использованием одних и тех же тестовых заданий.

Использование данного подхода в ИМЧ РАН на протяжении 19 лет изучения мозговой организации творческой формы мышления (всего в наших психофизиологических исследованиях приняли участие 652 добровольца), показала его правомерность и продуктивность. До 2008 г. непосредственным руководителем данного направления являлась академик Н.П. Бехтерева.

Была выработана непротиворечивая концепция мозгового обеспечения вербальной творческой деятельности и выявлены ее базовые характеристики. Было показано, что динамический характер организации мозговых систем, присущий любому виду деятельности, при творчестве является значительно более выраженным. Вербальное творческое мышление, в первую очередь, связано с изменениями мощности ЭЭГ, что рассматривается как показатель степени общей кортикальной активации, без которой реализация любой творческой деятельности представляется проблематичной. Наблюдаемое разнообразие пространственно-временных характеристик ЭЭГ при вербальной творческой деятельности зависит, по нашим наблюдениям, от личностных особенностей добровольцев, от типа творческой задачи, от когнитивной стратегии, используемой при решении, от различных ситуационных факторов, т.е. от наличия большого количества "гибких" звеньев при творчестве. Такая динамичность связана с тем, что мозг каждый раз формирует свою пространственно-временную систему для выполнения творческой деятельности, и при творческом мышлении происходит активация большого количества областей мозга. Такая генерализованная активация вероятно связана с преодолением матрицы стереотипов, которая не может обеспечить успешное решение нестандартных творческих задач.

Тем не менее, обнаружены области мозга (по данным ПЭТ и фМРТ-исследований), которые активируются всегда при вербальном творческом процессе, независимо ни от типа творческой задачи, ни от личностных особенностей добровольцев, ни от ситуационных факторов и т.д. Это префронтальная и теменная зоны, постоянная активация которых, по-видимому, отражает работу «жестких» звеньев.

В результате проведенного анализа функциональных взаимодействий впервые показано, что структура функциональных взаимодействий «жестких» звеньев обеспечения творческой деятельности носит двойственный характер: наблюдается как ослабление, так и усиление взаимодействий между теменной и префронтальной корой. При этом, ослабление функционального взаимодействия между лобными и теменными зонами в процессе творчества рассматривается как уменьшение влияния системы детекции ошибок и когнитивного контроля. Усиление же функциональных взаимодействий рассматривается как

усиленное вовлечение всех когнитивных ресурсов, интенсификация мыслительных процессов для решения творческой задачи без явного стереотипа в своем условии.

Характер функциональных взаимодействий «жестких» зон, вовлекаемых в обеспечение творческой деятельности, тесно связан с механизмом детекции ошибок. Показан неоднозначный характер функциональных взаимодействий данной системы с механизмом детекции ошибок. С одной стороны, полученные экспериментальные данные можно трактовать в пользу оптимизирующей роли детектора ошибок в процессах выбора индивидуального варианта решения при творческой деятельности, и, не связанной, при этом, напрямую с преодолением стереотипов. С другой стороны, когда реализация творческой деятельности тесно связана с преодолением стереотипа, детектор ошибок конфронтирует с творческим вариантом мыслительной деятельности, выступая как ограничитель, что отражается в ослаблении функциональных взаимодействий между передней поясной корой и лобными и теменными областями. По нашему мнению, последний вывод кажется нам наиболее правдоподобным.

Установлено влияние личностных и профессиональных особенностей на различия мозговых паттернов при творческой деятельности. Показано, что наиболее ярко различия в мозговом обеспечении творческой деятельности у актеров и неактеров наблюдаются в альфа и в бета диапазонах. Различия в альфа-диапазоне трактуются нами как состояние внутренне-ориентированного внимания, обеспечивающем готовность к обработке, преимущественно, внутренней информации, например, создания образов в результате работы воображения. Различия в бета диапазоне, отмеченные у актеров, могут свидетельствовать о том, что работа воображения в творчестве сопровождается интенсификацией процессов обработки информации в коре, и данная особенность, по-видимому, может быть усилена, например, в ходе отбора и последующей тренировки в период обучения актерскому мастерству.

При исследовании различий в мозговом обеспечении творческой деятельности у высоко- и низкокreatивных испытуемых (не связанных с актерской профессией), обнаружены различия в высокочастотных диапазонах, которые мы трактуем как трудности в концентрации внимания при решении сложной для низкокreatивных испытуемых творческой задачи и возможном возникновении отрицательных эмоций во время выполнения заданий.

Поскольку творческая деятельность осуществляется с большим вовлечением именно «гибких» звеньев, это дает принципиальную возможность тренировать творческую деятельность у людей с разным уровнем творческих способностей, что дает в перспективе несомненное практическое приложение. Нами показана принципиальная возможность тренировки творческой способности, влияющая на успешность решения творческих задач и меняющая характер вовлечения различных областей мозга при вербальной творческой деятельности.

Сопоставление ПЭТ, фМРТ и ЭЭГ данных, проводимое в рамках полиметодического подхода, позволило на основе полученных фактов предположить существование следующей системы обеспечения творческой деятельности. Во-первых, это наличие определенной степени общей кортикальной активации, без которой выполнение исследованных типов вербальной творческой деятельности является проблематичным, отраженное в основном в динамике мощности альфа, бета и гамма-диапазонов. Во-вторых, это обязательная активация при любой творческой деятельности «жестких» зон системы (теменных и лобных областей). И наконец, активация «гибких» зон системы творчества, наиболее специфично отвечающая типу творческой задачи, индивидуальным особенностям личности, ситуации и т.д.

Таким образом, цели и задачи, поставленные в данной работе, выполнены и получены новые нейрофизиологические данные.

Стоит отметить, что данные выводы, основанные на наших экспериментальных данных, распространяются только на вербальную область креативности. Вполне возможно, что мозговая организация невербальной творческой деятельности может кардинально отличаться от полученных нами данных на вербальном материале.

Сформированная на основе полученных экспериментальных данных непротиворечивая концепция мозговой организации вербальной творческой деятельности является новым шагом в понимании не только механизмов собственно творческой деятельности, но и фундаментальных принципов работы мозга человека в целом. Предложенный новый подход к нейрофизиологическому исследованию творческого мышления, одновременно учитывающий временные и качественные особенности творческой деятельности и личные особенности индивидов, будет полезен для дальнейших целенаправленных теоретических и практических нейрофизиологических исследований творческой деятельности.

Дальнейшее исследование проблемы творчества может базироваться в психологическом аспекте – на конструировании все более адекватных и экологически валидных сценариев творческая/контрольная задача, а также исследования других групп индивидов, обладающих специфическими творческими способностями (помимо актеров), таких как писатели, композиторы, ученые и т.д., поскольку на наш взгляд, существует высокая вероятность обнаружения, подобно актерам, специфически организованной мозговой системы обеспечения творческой деятельности, отличной от других групп.

ВЫВОДЫ

1. Предложен новый подход к исследованию творческой деятельности, одновременно учитывающий ее временные и качественные особенности, а также личностные особенности индивидов.

2. Локализованы "жесткие" зоны реализации мозгом вербальной творческой деятельности, независимо от ее временных и качественных особенностей, что отражается в воспроизводимом вовлечении лобно-теменной системы в процессы вербального творчества.

3. Раскрыт амбивалентный характер функциональных взаимодействий «жестких» звеньев обеспечения творческой деятельности: наблюдается как ослабление, так и усиление взаимодействий между теменной и префронтальной корой. При этом, ослабление функционального взаимодействия между лобными и теменными зонами в процессе творчества рассматривается как уменьшение влияния системы детекции ошибок и когнитивного контроля, а усиление взаимодействий – как вовлечение всех когнитивных ресурсов, интенсификация мыслительных процессов для решения творческой задачи без явного стереотипа в своем условии.

4. Показан неоднозначный характер функциональных взаимодействий мозговой системы обеспечения вербальной творческой деятельности с механизмом детекции ошибок. С одной стороны, полученные данные можно трактовать в пользу оптимизирующей роли детектора ошибок в процессах выбора индивидуального варианта решения при творческой деятельности, и, не связанной, при этом, напрямую с преодолением стереотипов. С другой стороны, когда реализация творческой деятельности тесно связана с преодолением стереотипа, детектор ошибок конфронтует с творческим вариантом мыслительной деятельности, выступая как ограничитель, что отражается в ослаблении функциональных взаимодействий между передней поясной корой и лобными и теменными областями.

4. Показано влияние личностных и профессиональных особенностей на различия мозговых реакций при вербальной творческой деятельности.

5. Показана принципиальная возможность тренировки творческой способности, влияющая на успешность решения творческих задач и меняющая характер вовлечения различных областей мозга при вербальной творческой деятельности

6. Показано существование следующей системы обеспечения вербальной творческой деятельности. Во-первых, это наличие определенной степени общей кортикальной активации, без которой выполнение исследованных типов вербальной творческой деятельности является проблематичным, отраженное в основном в динамике мощности альфа, бета и гамма-диапазонов. Во-вторых, это обязательная активация при вербальной творческой деятельности «жестких» зон системы (теменных и лобных областей). И наконец, активация «гибких» зон системы вербального творчества, наиболее специфично отвечающая типу творческой задачи, индивидуальным особенностям личности, ситуации и т.д.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Старченко, М.Г. Исследование нейрофизиологического обеспечения параметров вербальной креативности – беглости, гибкости, оригинальности. Сообщение 1.- Данные электроэнцефалографического исследования/ М.Г. Старченко // Международный научно-исследовательский журнал.-2018.-№1-2(67).-С.84-87.

2. Родионов, А.Р. Психофизиологические механизмы различных стратегий решения творческих задач актерами и неактерами / А.Р. Родионов, М.Г. Старченко//В мире научных открытий.- 2013.-№ 7.1 (43).-С. 58-86.

3. Данько, С. Г. Сравнение воздействия субъективной сложности и творческого характера вербальной деятельности на спектральные показатели мощности ЭЭГ/ С.Г. Данько, Н.В. Шемякина, Ж. В. Нагорнова , М.Г. Старченко //Физиология человека.-2009.-Т.35, № 3.-С. 132-134

4. Киреев, М.В. Этапы мозгового обеспечения заведомо ложных ответов / М.В. Киреев, М.Г. Старченко, С.В. Пахомов, С.В. Медведев // Физиология человека. – 2007. – Т. 33, № 6. – С. 5-13

5. Шемякина, Н.В. Динамика спектров мощности и когерентности ритмических компонентов ЭЭГ при решении вербальной творческой задачи преодоления стереотипа/ Н.В. Шемякина, С.Г. Данько, Ж.В. Нагорнова, М.Г. Старченко, Н.П. Бехтерева// Физиология человека.- 2007. -Т. 33, № 5 . - с. 14-21

6. Alho, K. Selective attention to human voice enhances brain activity bilaterally in the superior temporal sulcus / K.Alho, V.A. Vorobyev, S.V. Medvedev, S.V. Pakhomov, M.G. Starchenko, M. Tervaniemi, R.Näätänen // Brain Research.- 2006.-Vol. 1075, № 1.-P. 142-150.

7. Данько, С.Г. Электроэнцефалографические корреляты состояний мозга человека при вербальном обучении. Сообщение 1. Характеристики локальной синхронизации. / С.Г. Данько, Н.П. Бехтерева., Л.М. Качалова, Н.В. Шемякина, М.Г. Старченко // Физиология человека. – 2005. - Т. 31, № 5. - с.13-20

8. Данько, С.Г. Электроэнцефалографические корреляты состояний мозга человека при вербальном обучении. Сообщение II. Характеристики пространственной синхронизации/ С.Г. Данько, Н.П. Бехтерева., Л.М. Качалова, Н.В. Шемякина, М.Г. Старченко // Физиология человека. – 2005. - Т. 31, № 6. - с. 5 -12.

9. N.P. Bechtereva, N.P. Error detection mechanisms of the brain: Background and prospects / N.P. Bechtereva, N.V. Shemyakina, M.G. Starchenko, S.G. Danko, S.V. Medvedev//International Journal of Psychophysiology. – 2005. - Vol. 58. - P. 227-234

10. Bechtereva, N.P. PET Study of Brain Maintenance of Verbal Creative Activity / N.P. Bechtereva , A.D. Korotkov., S.V. Pakhomov, M.S. Roudas, M.G. Starchenko, S.V. Medvedev // International Journal of Psychophysiology.- 2004.-Vol. 53. P. 11-20.

11. Старченко, М.Г. Изучение мозговой организации креативного мышления/ М.Г. Старченко, Н.П. Бехтерева., С.В. Пахомов, С.В. Медведев // Физиология человека.-2003.- Т.29,№ 5.-С. 151-152.
12. Данько, С.Г. Локальная и пространственная синхронизация ЭЭГ при выполнении теста на инсайтную стратегию решения творческих вербальных задач/ С.Г. Данько, М.Г. Старченко, Н.П. Бехтерева // Физиология человека.- 2003.- Т.29, № 4.- С.129-132.
13. Бехтерева, Н.П. Исследование мозговой организации творчества. Сообщение 3. Активация мозга по данным анализа локального мозгового кровотока и ЭЭГ./ Н.П. Бехтерева, С.Г. Данько, М.Г. Старченко, С.В. Пахомов, С.В. Медведев// - Физиология человека.- 2001.- Т. 27, №. 4.- С. 6-14.
14. Бехтерева, Н.П.. Исследование мозговой организации творчества. Сообщение 2. Данные позитронно-эмиссионной томографии / Н.П. Бехтерева, М.Г. Старченко, В.А. Ключарев, В.А. Воробьев, С.В. Пахомов, С.В. Медведев// Физиология человека.-2000. Т.26, №. 5.- С.11-17.
15. Старченко, М.Г. Исследование мозговой организации творчества. Сообщение 1. Разработка психологического теста/М.Г. Старченко, В.А. Воробьев, В.А. Ключарев, Н.П. Бехтерева, С.В. Медведев // Физиология человека.-2000.-Т.26, №. 2.- С. 5-9.