

На правах рукописи

Баирова Надежда Будоцыреновна

**ПРОИЗВОЛЬНАЯ РЕГУЛЯЦИЯ ПОВЕДЕНИЯ В ДЕТСКОМ ВОЗРАСТЕ:
СВЯЗЬ С ОСЦИЛЛЯТОРНЫМИ СЕТЯМИ МОЗГА И ПСИХИЧЕСКИМ
ЗДОРОВЬЕМ**

19.00.02 – Психофизиология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата медицинских наук

Новосибирск 2021

Работа выполнена в лабораториях аффективной, когнитивной и трансляционной нейронауки и дифференциальной психофизиологии Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины» (НИИНМ, г. Новосибирск).

Научные руководители: *Елена Романовна Слободская* главный науч. сотрудник НИИНМ, доктор психол. наук, доцент.

Геннадий Георгиевич Князев, заведующий лабораторией дифференциальной психофизиологии НИИНМ, главный научный сотрудник, доктор биол. наук, доцент.

Официальные оппоненты: *Ирина Валерьевна Тарасова*, доктор медицинских наук, ведущий научный сотрудник лаборатории нейрососудистой патологии ФГБНУ «Научно-исследовательский институт комплексных проблем сердечно-сосудистых заболеваний»; *Наталья Яковлевна Большунова*, доктор психологических наук, профессор кафедры общей психологии и истории психологии, заведующая лабораторией психологической антропологии и дифференциальной психологии Новосибирского государственного педагогического университета.

Ведущая организация – Институт медицины и психологии В. Зельмана Новосибирского государственного университета.

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в «__» часов на заседании диссертационного совета Д 001.014.02 при ФГБНУ ННМ 630117, г. Новосибирск, ул. Тимакова, 4, а/я 237. Телефон: (383) 335-98-01. Факс: (383) 335-97-54. E-mail: dissovet@physiol.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИИНМ и на сайте <http://neuronm.ru/>.

Автореферат разослан _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор биол. наук В. Н. Мельников

ВЕДЕНИЕ

Актуальность проблемы

В последние годы в науке о человеке и его развитии усилился интерес к проблеме произвольной регуляции поведения в первые годы жизни. Установлено, что способность контролировать свое поведение позволяет прогнозировать важнейшие результаты развития. Так, низкий уровень произвольной регуляции связан с большей выраженностью поведенческих проблем и их последствий (таких как, употребление психоактивных веществ, антисоциальное поведение и правонарушения), причем вклад произвольной регуляции не зависит от интеллекта и социального статуса (Moffitt et al., 2011; Eisenberg, 2012; De Lisi, Vaughn, 2014). Произвольная регуляция поведения связана с социальной компетентностью и позволяет прогнозировать такие важные жизненные итоги как физическое и психическое здоровье, академическую успеваемость, финансовое благополучие и удовлетворенность жизнью (Rothbart, 2011; Moffitt et al., 2013; Diamond, 2016).

Для обозначения произвольной регуляции поведения используют разные термины: самоконтроль, саморегуляция, регуляторные способности, волевая регуляция, контроль поведения и другие. Эти терминологические расхождения отчасти связаны с различиями в парадигмах и отражают проблему номинальности (Zhou et al., 2012; Gagne, 2017; Nigg, 2017). При исследовании произвольного контроля поведения в детском возрасте в мировой литературе чаще всего используют термин *effortful control*, который обозначает способность подавлять/тормозить доминантную реакцию и активировать субдоминантную, фиксировать и переключать внимание, выбирать способ действий в условиях конфликта, планировать на будущее и находить ошибки (Rothbart, 2011; Eisenberg, 2012). Из-за отсутствия непосредственного аналога в русском языке, в данной работе для обозначения *effortful control* используется термин *произвольная регуляция*.

Установлено, что регуляторные способности закладываются в младенческом возрасте (Rothbart et al., 2011). К концу первого года жизни произвольная регуляция становится более отчетливой, она активно развивается в течение всего раннего детства и совершенствуется на протяжении всей жизни. Важным этапом в развитии ребенка и его произвольной регуляции является младший школьный возраст (7-10 лет). Обучение в школе требует от детей умения концентрировать свое внимание в течение длительного времени, искать и находить информацию, контролировать свои действия и поступки, следовать указаниям взрослых, планировать свои действия, что способствует созреванию соответствующих функций.

Эффективный контроль своего поведения, мыслей и эмоций является сложной задачей и важным показателем развития ребенка. Поэтому понимание психофизиологической основы возрастных и индивидуальных особенностей произвольной регуляции в раннем, дошкольном и младшем школьном возрасте имеет большое научное и практическое значение.

Степень разработанности темы исследования

Для исследования произвольной регуляции поведения широко используются как психометрические, так и экспериментальные методы исследования. Большая часть исследований произвольной регуляции в детском возрасте проведена с помощью родительских отчетов о поведении детей (Rothbart, 2011). Родительские опросники являются ценным методом исследования, т.к. родители имеют уникальную возможность наблюдать своих детей в широком диапазоне ситуаций, которые невозможно воспроизвести в лаборатории (Rothbart, Bates, 2006). Экспериментальные методы включают стандартизованные батареи заданий для детей от 22 до 78 мес. (Murray, Kochanska, 2002), а также психофизиологические тесты, измеряющие целенаправленное внимание и тормозный контроль, в том числе Струп-тест и его модификации для младших детей, например «День/ночь» (Gerstadt et al. 1994), «Фрукты» (Archibald, Kerns, 1999) и др. Несмотря на концептуальное сходство способности к произвольной регуляции поведения, оцениваемой с помощью родительских опросников, и показателей, оцениваемых с помощью экспериментальных методов, вопрос об их соотношении остается открытым. В одних исследованиях обнаружены небольшие или умеренные корреляции между психометрическими и экспериментальными показателями произвольной регуляции поведения (Blair, Razza, 2007; Verstraeten et al., 2010; Zhou et al., 2012), в других находят больше различий, чем сходства (Samyn et al., 2003). Выяснение этого вопроса прольет свет на природу регуляторных способностей и предоставит основания для разработки диагностических и коррекционных методов.

Произвольная регуляция поведения концептуально и операционально перекрывается с исполнительными функциями (*executive function*, Blair, Razza, 2007; Zhou et al., 2012), однако эти аспекты регуляторных способностей до последнего времени изучали в рамках различных научных дисциплин (Zhou et al., 2012; Gagne, 2017; Nigg, 2017). Оба конструкта имеют в своей структуре общие компоненты, такие как торможение и внимание (Zhou et al., 2012), измеряются сходным образом (Kim et al., 2013, Bridgett et al., 2013) и имеют схожую нейрофизиологическую основу (Posner, Rothbart, 2009; Johansson, 2015). Основные работы по проблеме развития произвольной регуляции и исполнительных функций в первые годы жизни проведены на стыке психологических исследований и нейронаук (Rothbart et al., 2011; Posner

et al., 2012). Установлено, что к механизмам, обеспечивающим произвольную регуляцию, относятся осцилляторные сети мозга (*resting state networks, RSN*, Heatherton, Wagner, 2011; Rothbart et al., 2011; Posner et al., 2012). К таким сетям относят дефолт систему мозга (DMN), играющую значительную роль в планировании действий и оказывающую влияние на регуляторные способности, а также две сети контроля внимания (TPN): сеть исполнительного контроля (CEN) и сеть выявления значимости (SN), активность которых связана с исполнительными функциями (Seeley et al., 2007). Ключевыми структурами DMN являются задняя часть поясной извилины (PCC), медиальная префронтальная кора (MPFC), передняя часть поясной извилины (ACC), а также латеральная, медиальная и нижняя париетальная кора; к ключевым структурам CEN относятся дорсолатеральная префронтальная кора (DLPFC) и задняя часть париетальной коры, а к SN - задний отдел передней части поясной извилины (dACC) и передняя островковая кора (AIns). Следует отметить, что все данные о развитии нейронных сетей получены с помощью фМРТ; этот метод исследования основан на регистрации оксигенации крови, которая отражает метаболические процессы в головном мозге и связан с нейронной активностью только опосредованно (Debener et al., 2006). Использование электрофизиологических методов исследования, обладающих высоким временным разрешением, в комбинации с программами, позволяющими на основании полученных сигналов, регистрируемых на поверхности головы, локализовывать источники мозговой активности, может верифицировать имеющиеся фМРТ данные, а также более полно исследовать структурно-функциональную организацию головного мозга и изучить психофизиологическую основу произвольной регуляции.

Целью исследования было изучение произвольной регуляции поведения и ее возрастных особенностей в детском возрасте с использованием психологических опросников, экспериментального задания (модификация Струп-теста для детей) и ЭЭГ показателей сетей покоя (RSN); а также изучение взаимосвязей произвольной регуляции с личностными чертами и психическим здоровьем.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1) Изучить возрастные особенности произвольной регуляции поведения в раннем, дошкольном и младшем школьном возрасте по результатам экспериментального задания и данным психологических опросников.

2) Изучить связь между показателями выполнения экспериментального задания, представляющего новую модификацию Струп-теста для детей (правильность ответов, среднее время реакций, вариабельность времени реакции, интерференция), и произвольной регуляцией и ее компонентами (устойчивость внимания, тормозный контроль, сенсорная

чувствительность, удовольствие низкой интенсивности, регуляция активности), оцененными с помощью данных родительских опросников.

3) Исследовать связь показателей выполнения экспериментального задания для оценки произвольной регуляции с личностными чертами в рамках пятифакторной модели и психическим здоровьем.

4) Исследовать электрофизиологические особенности осцилляторных сетей покоя, обеспечивающие процессы произвольной регуляции, и их связь с психометрическими показателями произвольной регуляции у детей в раннем, дошкольном и младшем школьном возрасте.

Методология и методы исследования

Исследование проведено в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Научно-исследовательский институт нейронаук и медицины» (НИИНМ) в соответствии с принципами Хельсинской декларации и было одобрено решением этического комитета НИИНМ.

В исследовании использовали экспериментальные методы (модификация Струп-теста для детей – тест «Размер животного») и международно признанные психометрические инструменты, адаптированные и валидизированные для применения в России. Статистическую обработку данных проводили с использованием SPSS-22. Для изучения нейрофизиологических показателей произвольной регуляции поведения применяли методы 64-канальной регистрации и анализа электрической активности мозга. Обработка ЭЭГ данных осуществлялась с помощью пакетов EEGLAB и SPM-12 в программной среде Matlab.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Установлены выраженные возрастные различия произвольной регуляции поведения, оцененной с помощью экспериментального задания (новой модификации Струп-теста для детей): показатели выполнения теста (правильность ответов, время реакции и вариабельность времени реакции) на протяжении дошкольного и младшего школьного возраста значительно улучшаются.

2) Показатели выполнения Струп-теста связаны с родительскими оценками произвольной регуляции детей и ее компонентов (тормозным контролем, устойчивостью внимания и регуляцией активности), личностных черт домена сознательности (организованностью и отвлекаемостью) и показателями психического здоровья детей (общее число проблем, экстернальные проблемы (проблемы с поведением, гиперактивность/невнимательность), интернальные проблемы (эмоциональные симптомы, проблемы со сверстниками).

3) Среди показателей выполнения Струп-теста для детей наиболее тесные связи с психометрическими показателями произвольной регуляции, личностной чертой сознательность и проблемами психического здоровья обнаружила вариабельность времени реакции, что позволяет использовать этот показатель в качестве экспериментального индикатора регуляторных функций.

4) Установлена связь произвольной регуляции поведения с ЭЭГ коррелятами функциональных связей дефолт системы мозга (DMN) и сетей внимания (TPN) в альфа и бета диапазонах. Произвольная регуляция, оцененная с помощью родительских опросников, положительно коррелировала с силой связей между разными частями DMN, TPN и структурами мозга, участвующими в восприятии сенсорной информации.

Научная новизна исследования

Впервые установлена связь показателей выполнения новой модификации Струп-теста для детей (правильность ответов, среднее время реакции, вариабельность времени реакции, интерференция) с произвольной регуляцией и ее компонентами - тормозным контролем, устойчивостью внимания и регуляцией активности, оцененными с помощью психологических опросников.

Впервые установлена связь показателей выполнения модификации Струп-теста для детей с личностной чертой сознательность и с показателями психического здоровья детей в широком возрастном диапазоне от 5 до 12 лет.

Впервые установлена связь вариабельности времени реакции в экспериментальном задании с произвольной регуляцией поведения, оцененной с помощью родительских опросников, а также с размерными оценками гиперактивности-невнимательности, экстернальных проблем и общим уровнем проблем психического здоровья по данным родительских опросников в популяционной выборке детей.

Впервые исследованы сети покоя (DMN, TPN) на основе ЭЭГ данных и связи произвольной регуляции, измеренной с помощью родительских опросников, с показателями коннективности сетей покоя – дефолт системы мозга (DMN) и систем контроля внимания (TPN), и соотношением их активности у детей.

Теоретическое значение работы

Работа посвящена актуальной проблеме изучения произвольной регуляции поведения, ее психофизиологических основ, возрастных особенностей, а также взаимосвязи с личностными чертами и психическим здоровьем. Исследование выполнено на стыке нейрофизиологии, психологии и медицины.

Полученные данные позволили расширить теоретические знания о регуляторных способностях и исполнительных функциях, а также об их связи с психическим здоровьем и распространенными отклонениями (проблемы с поведением, гиперактивность/невнимательность, эмоциональные симптомы, проблемы со сверстниками). Помимо этого, результаты исследования внесли вклад в понимание нейрофизиологических механизмов, обеспечивающих произвольную регуляцию поведения.

Практическое значение работы

Выявленные закономерности свидетельствуют от том, что экспериментальные методы исследования произвольной регуляции поведения, а именно модификация Струп-теста для детей «Размер животного», могут быть использованы для оценки и своевременного выявления дефицита регуляторных способностей.

Кроме этого, полученные результаты могут быть положены в основу разработки коррекционных и профилактических программ и проверки их эффективности.

Апробация работы

Основные результаты были доложены в виде устного доклада на международной 22 ежегодной конференции по исследованию темперамента (ОТС, 22nd Occasional Temperament Conference, г. Мурсия, Испания, 2018) и в виде стендового доклада на международной конференции по исследованию развития детей и подростков (SRCD, Society for Research in Child Development, г. Остин, США, 2017). Сбор экспериментальных данных и исследование ЭЭГ были частично поддержаны грантами РФ «Волевая регуляция в детском возрасте: развитие и связь с благополучием и проблемами психического здоровья», проект № 16-18-00003 и РФФИ «Осцилляторные сети мозга у детей - лонгитюдинальное исследование», проект № 17-06-00055. Результаты работы опубликованы в 6 печатных трудах, из них: статей в российских журналах – 3, в зарубежных – 3.

Объем и структура диссертации

Содержание диссертации изложено на 112 страницах печатного текста. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы, описания методов и материалов исследования, результатов собственных исследований, обсуждения, заключения, выводов, списка цитируемой литературы. Работа иллюстрирована 5 таблицами, 3 рисунками и 2 схемами. Библиографический список включает 251 работы (20 российских, 231 зарубежных источников).

Личный вклад автора

Автором лично выполнены сбор психометрических и экспериментальных данных, создание баз данных в программе SPSS, статистический анализ психометрических и

экспериментальных показателей с использованием SPSS, первичная обработка ЭЭГ данных (первичное удаление явно зашумленных участков и каналов), научная интерпретация полученных результатов, подготовка публикаций и докладов по теме диссертационной работы, написание текста диссертации и автореферата.

Благодарности

Автор выражает признательность всем сотрудникам НИИНМ, принимавшим участие в работе: Петренко Евгении Николаевне, Козловой Елене Александровне, Варшал Александре Владимировне за помощь в сборе экспериментальных данных и в создании баз данных, Савостьянову Александру Николаевичу, Сапрыгину Александру Евгеньевичу, Таможникову Сергею Сергеевичу, Дмитриенко Надежде Васильевне за помощь в сборе и обработке ЭЭГ данных, Бочарову Андрею Викторовичу за разработку и создание теста «Размер животного», а также за помощь при анализе ЭЭГ данных и всем участникам исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Организация исследования и испытуемые

Работа была одобрена Этическим комитетом НИИНМ. К участникам обращались через школы, дошкольные учреждения и непосредственно. Перед началом работы все родители дали информированное согласие на участие их детей в эксперименте. Все дети участвовали в экспериментальном исследовании, родителям предлагали заполнить комплект опросников; у части детей была проведена запись ЭЭГ. В выборку исследования не были включены дети с серьезными неврологическими, психическими и соматическими заболеваниями. По окончании исследования все дети получили подарки, а родители - вознаграждение в качестве благодарности за участие в эксперименте.

В исследования приняли участие 202 ребенка (57% мальчиков) в возрасте от 5 до 12 лет (средний возраст – 8.4 ± 1.6). Для изучения возрастных особенностей выборка была разделена на 6 групп, из них в возрасте младше 7 лет – 17%, 7-8 лет – 19%, 8-9 лет – 19%, 9-10 лет -15%, 10-11 лет -18%, 11 - 12 лет– 12%. В ЭЭГ исследовании приняли участие 52 ребенка (31 мальчик), средний возраст – 9.5 ± 0.6 лет.

Процедура исследования

Сбор данных осуществляли на базе ГБУЗ НСО «Городская поликлиника № 14», МДОУ «Детский сад № 485», Социально-психологического центра «НИКА» и НИИНМ г. Новосибирска. Эксперимент проводили в тихой хорошо освещенной комнате, в которой находились ребенок и экспериментатор; в это время родители заполняли опросники. Детям

было предложено выполнить задание «Размер животного», а также другие тесты, не имеющие отношения к данному исследованию. Длительность теста «Размер животного» составила около 15 минут. У детей, проходивших исследование на базе НИИНМ, до выполнения экспериментального задания, проводили регистрацию ЭЭГ в течение 12 одноминутных интервалов (6 с закрытыми глазами и 6 с открытыми глазами).

Инструменты

Экспериментальное исследование

В исследовании использовали задание «Размер животного» - разработанную для детей модификацию классического Струп-теста (Szűcs et al., 2009). Задание предъявляли в виде компьютерной игры, используя программу Inquisit (Millisecond Software). На экране монитора попарно предъявляли животных (тигр, слон, заяц, бабочка и божья коровка). В конгруэнтных случаях большое животное было изображено большим, а маленькое – маленьким; в неконгруэнтных случаях – наоборот (рис. 1). Эксперимент состоял из 60 изображений (30 конгруэнтных и 30 неконгруэнтных), которые предъявляли в случайном порядке. Участникам было предложено выбрать то животное, размер которого в реальной жизни больше, нажимая соответствующую кнопку на клавиатуре (справа или слева).



Рис. 1. Пример стимула из теста «Размер животного». А – конгруэнтный. Б – неконгруэнтный.

ЭЭГ-исследование

Запись ЭЭГ проводили с помощью установки Brain Products (Германия) с использованием шапочки соответствующего размера с 64 электродами, смонтированными по системе 10-10. Один электрод использовали для записи вертикальной окулограммы; в качестве референта использовали Cz электрод, располагающийся на верхушке черепа (вертекс), заземляющий электрод располагался в центре лба. Аналоговый сигнал усиливался с помощью многоканального усилителя биопотенциалов с полосой пропускания 0.1–100 Гц и превращался в цифровой с частотой дискретизации 1000 Гц. Импеданс электродов поддерживался на уровне не выше 5 кОм.

Психометрическое исследование

Для психометрического оценивания произвольной регуляции поведения использовали сокращенные шкалы родительских опросников, разработанных Ротбарт с коллегами (TMCQ, Simonds, Rothbart, 2004; CBQ-VSF, Putnam, Rothbart, 2006). У дошкольников применяли шкалу Опросника поведения в детстве, включающую четыре компонента: Тормозный контроль, Устойчивость внимания, Сенсорную чувствительность и Удовольствие низкой интенсивности (CBQ-VSF, Putnam, Rothbart, 2006); у младших школьников – шкалу Опросника темперамента в среднем детстве, включающую три компонента: Регуляция активности, Тормозный контроль и Устойчивость внимания (TMCQ, Simonds, Rothbart, 2004). Русскоязычные версии шкал были валидизированы; коэффициенты внутренней согласованности шкалы произвольной регуляции составили 0.77 у дошкольников (Slobodskaya et al., 2018) и 0.80 у младших школьников. (Kornienko et al., 2018).

Личностные особенности ребенка оценивали при помощи краткой формы Списка индивидуальных особенностей ребенка, состоящей из 62 утверждений, с помощью которых оценивают 15 личностных черт в рамках пятифакторной модели: экстраверсия, нейротизм, уступчивость, сознательность и открытость (ISID-S, Slobodskaya, Zupančič, 2010). Коэффициенты внутренней согласованности шкал Большой пятерки в настоящем исследовании варьировали от 0.79 до 0.90 (среднее значение 0.66).

Для оценивания **психического здоровья** использовали Опросник «Сильные стороны и трудности» для родителей (SDQ, Goodman, 2001), валидизированный в России (Goodman et al., 2005). SDQ содержит 25 утверждений для оценки пяти подшкал: просоциальное поведение, эмоциональные симптомы, проблемы с поведением, гиперактивность/невнимательность и проблемы со сверстниками; сумма последних четырех подшкал составляет общее число проблем. Шкала экстернатальных проблем включает проблемы с

поведением и гиперактивность/невнимательность, шкала интернальных проблем - эмоциональные симптомы и проблемы со сверстниками. Коэффициенты внутренней согласованности подшкал в настоящей работе колебались от 0.58 до 0.77 со средним значением 0.66.

АНАЛИЗ ДАННЫХ

Обработка экспериментальных данных

С помощью программы Inquisit регистрировали правильность ответа ребенка и время реакции (ВР) в каждом предъявлении. Из дальнейшего анализа исключали выбросы: ВР короче 350 мс и длиннее 2 SD от среднего арифметического (Kindt, Brosschot, 1999; Assef et al. 2007). Далее вычисляли процент правильных ответов в целом и отдельно для конгруэнтных и неконгруэнтных стимулов, среднее ВР, среднее отклонение ВР (СОВР), и два показателя интерференции: 1) величина интерференции (ВИ) - разность между средним ВР для неконгруэнтных и конгруэнтных стимулов; 2) индекс интерференции (ИИ, %) – частное от деления ВИ на среднее ВР на конгруэнтные стимулы $\times 100$. Более низкие показатели соответствовали лучшим результатам.

Статистический анализ психометрических и экспериментальных данных

Статистический анализ проводили в программе SPSS 22. Надежность шкал опросников определяли с помощью коэффициента внутренней согласованности альфа Кронбаха (α). Для оценки Струп-эффекта (различий в показателях выполнения задания при предъявлении конгруэнтных и неконгруэнтных стимулов) и вклада возраста и пола в показатели выполнения теста «Размер животного» были проведены две серии дисперсионного анализа ANOVA. В первой серии внутрисубъектным фактором был вид стимула, межсубъектными факторами - возрастные группы и пол; результирующими переменными - правильность ответов, среднее ВР и СОВР. Во второй серии оценивали вклад возраста и пола в показатели интерференции. Величину эффекта оценивали с помощью η^2 (%), этот показатель оценивает долю разнообразия признака, обусловленную данным фактором. Эффекты, объяснявшие 1% - 5.8%, 5,9% - 13.9%, более 14% разнообразия считали небольшими, умеренными и существенными, соответственно (Cohen, 1988).

Взаимосвязи показателей теста «Размер животного» с показателями произвольной регуляции, личностных особенностей и психического здоровья изучали при помощи корреляционного анализа. Методом множественной иерархической пошаговой регрессии оценивали общую прогностическую значимость возраста, пола и психометрических

показателей в отношении результатов теста «Размер животного» с помощью коэффициента множественной детерминации R^2 , независимый вклад каждого предиктора оценивали с помощью стандартизованного регрессионного коэффициента β . В регрессионном анализе первым блоком вводили пол и возраст ребенка, а вторым блоком – показатели произвольной регуляции, личностных черт и проблем поведения по данным родительских опросников.

Анализ ЭЭГ данных

Удаление артефактов

Были удалены сверхмедленные и быстрые колебания с использованием фильтрации в диапазоне от 1 до 45 Гц, а также «шумящие» артефактные каналы с помощью функции автоматической детекции под зрительным контролем в программе EEGLAB toolbox (<http://www.sccn.ucsd.edu/eeglab/>). Дополнительно артефакты устраняли с помощью анализа независимых компонент (АНК).

Фильтрация ЭЭГ ритмов в частотные диапазоны

После удаления артефактов с помощью АНК данные фильтровали в спектральных диапазонах стандартных ЭЭГ ритмов. Поскольку частотный состав ЭЭГ изменяется с возрастом и сдвигнут у детей по сравнению с взрослыми в низкочастотную область (Klimesch, 1999, Niedermeyer and Da Silva, 2004), частотные диапазоны определяли относительно индивидуальной частоты альфа пика (Doppelmaier et al., 1998), с использованием методов, описанных Лансбергом с коллегами (Lansbergen et al. 2011).

Локализация источников данных с помощью метода пространственной фильтрации (Beamforming)

Для построения модели головы методом граничных элементов (boundary element head model, Fuchs et al., 2001) использовали возраст-специфичные усредненные MPT (<http://jerlab.psych.sc.edu/NeurodevelopmentalMRIDatabase/>) для детей от 6 до 10 лет с интервалом в 0.5 года из международной базы (Richards et al., 2016). Корегистрацию позиций электродов с данными MPT производили с использованием программного обеспечения SPM-12 на основе замеренных координат электродов и референтных точек на черепе (nasion, preauricular points). Для пространственной фильтрации данных применяли метод минимальной дисперсии с линейными ограничениями (linearly constrained minimum variance, van Veen, et al., 1997), который минимизирует дисперсию на выходе фильтра. Полученные в результате пространственной фильтрации четырехмерные пространственно-временные матрицы были нормализованы, чтобы соответствовать стандартному мозгу, для проведения дальнейших анализов.

Построение карт коннективности

Коррекция утечки сигнала, возникающей вследствие плохого пространственного разрешения метода локализации источников, проводили с помощью метода ортогонализации (Brookes et al., 2012b; Hipp et al., 2012). Далее с использованием трансформации Гилберта, рассчитывали огибающую сигнала, которая после снижения частоты оцифровки до 1 сек. использовали для построения карт коннективности с помощью метода, на основе выбора интересующей точки мозга – семени (Brookes et al., 2011b). Локализацию семени определяли соответствии с данными предыдущих фМРТ исследований (DMN – в MPFC; CEN – в DLPFC; SN – в области правой AIns) (Fox et al., 2005; Seeley et al., 2007). Затем были рассчитаны корреляции Пирсона между временным ходом активности в этой точке и во всех остальных вокселях мозга. С помощью z-трансформации Фишера нормализовывали распределения коэффициентов корреляции, выполняли сглаживание карт коннективности с полушириной (FWHM) равной 8 мм и полученные таким образом карты коннективности использовали для статистического анализа.

Статистический анализ ЭЭГ данных

Для выявления статистически достоверных связей был использован одновыборочный T-тест. Поправка на множественные сравнения проводилась в два этапа – на уровне вокселя ($p < 0.001$), на уровне кластера (family-wise error corrected $p < 0.05$). Для оценки разницы показателей коннективности внутри и вне сети рассчитывали индекс функциональной специализации сетей. Дальнейший статистический анализ проводили в пакете SPM-12 методом регрессии оценок произвольной регуляции на карты антикорреляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Струп-эффект

Результаты показали, что дети испытывали больше трудностей при выполнении теста в неконгруэнтных пробах: достоверные различия наблюдались в отношении среднего ВР, $F(1, 186) = 31.55, p < .001$ и правильности ответов, $F(1, 186) = 5.63, p = 0.019$. Это свидетельствует о наличии Струп-эффекта в тесте «Размер животного», аналогичного таковому в классическом словесно-цветовом Струп-тесте. Величина эффекта для правильности ответов была небольшой ($\eta^2 = 2.9\%$), а для СВР – существенной ($\eta^2 = 14.5\%$). В отношении СОВР Струп-эффект был недостоверным, взаимодействия вида стимула с полом и возрастом также не были статистически значимы.

Эффекты возраста и пола

Статистически достоверные возрастные эффекты были обнаружены относительно правильности ответов, $F(5, 201) = 3,54$, $p = 0,004$, $\eta^2 = 8,3\%$; среднего ВР, $F(5, 197) = 11,27$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 22,7\%$, и СОВР, $F(5, 197) = 7,74$, $p < 0,001$, $\eta^2 = 16,8\%$. В конгруэнтных пробах доля правильных ответов возрастала, начиная с 10 лет; в неконгруэнтных пробах дети младшего школьного возраста отвечали правильнее, чем дошкольники (Рис.1). Дошкольники отвечали медленнее, чем дети младшего школьного возраста (Рис.2). Это согласуется с данными большинства исследований, показавших, что результаты выполнения классического Струп-теста и его модификаций на протяжении дошкольного и младшего школьного возраста улучшаются (Catale, Meulemans, 2009; Charchat-Fichman, Oliveira, 2009). В отношении СОВР: у младших детей вариативность ответов была больше, чем у старших. Эффекты возраста в отношении правильности ответов, среднего ВР и СОВР были умеренными или существенными. Показатели теста у мальчиков и девочек не различались; взаимодействия пола и возраста также были недостоверны, что согласуется с результатами предыдущих исследований как классического Струп-теста (MacLeod, 1991), так и его модификаций для детей (Wright et al., 2003; Montgomery, Coeltzow, 2010).

Рис.1. Правильность ответов в конгруэнтных и неконгруэнтных пробах теста «Размер животного»

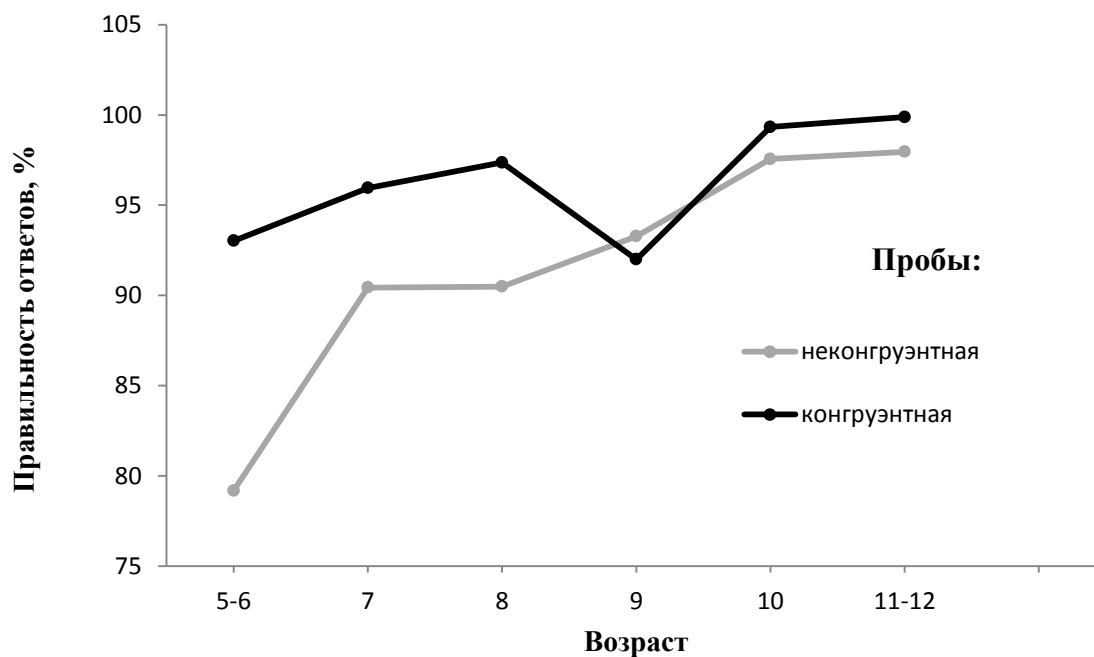
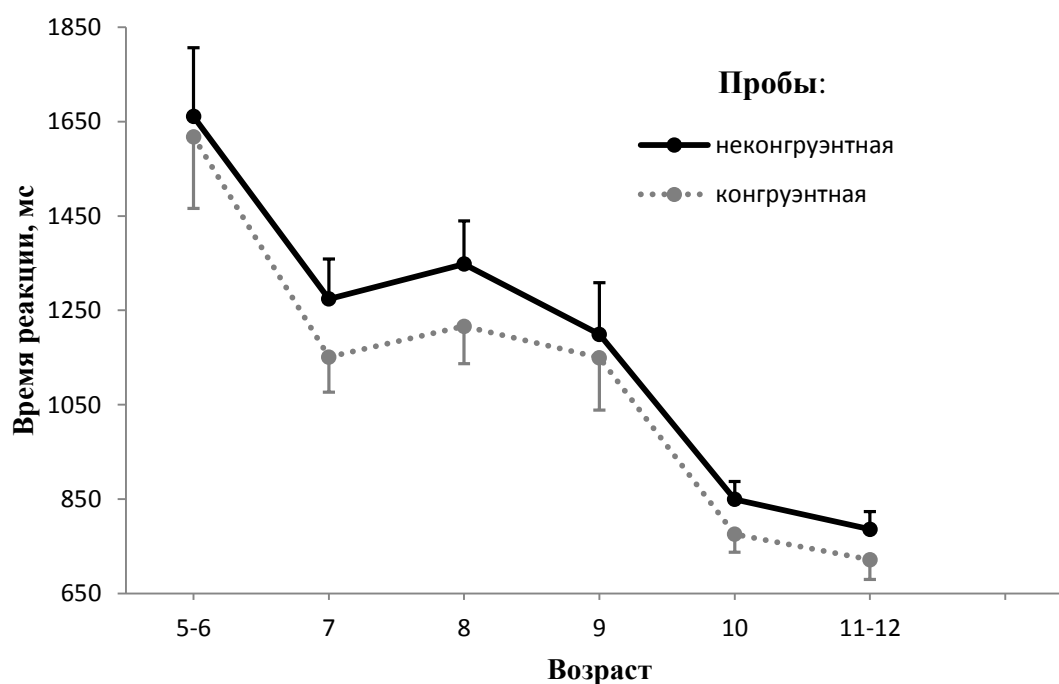


Рис.2. Среднее ВР в конгруэнтных и неконгруэнтных пробах теста «Размер животного»



Связь показателей теста «Размер животного» и произвольной регуляции поведения

В таблице 1 приведены коэффициенты корреляции Пирсона между экспериментальными показателями теста и произвольной регуляцией, оцененной с помощью родительских опросников. Поскольку правильность ответов, среднее ВР и СОВР существенно коррелировали с возрастом ребенка ($r = .25$; $r = -.45$; $r = -.38$, соответственно, все $p < .001$), были подсчитаны частные корреляции под контролем возраста. Среднее ВР и СОВР отрицательно коррелировали с произвольной регуляцией поведения и ее компонентами – устойчивостью внимания, тормозным контролем; разница в величине коэффициента корреляции была незначительной. Кроме этого, среднее ВР и СОВР коррелировали с регуляцией активности, что хорошо согласуется с ограниченным количеством имеющихся теоретических и экспериментальных данных (Bull, Scerif, 2001; Bell et al., 2007) и свидетельствует о том, что для разрешения конфликта, имеющего место в парадигме Струп-теста, помимо подавления доминантного, но неправильного ответа, важно иметь способность активировать субдоминантную, более правильную реакцию.

Таблица 1. Корреляции показателей теста «Размер животного» с произвольной регуляцией

	ПО	СВР	СОВР	ВИ	ИИ
Произвольная регуляция	-.03 (-.02)	-.17* (-.20**)	-.20** (-.22**)	.01 (.01)	.04 (.04)
Устойчивость внимания	-.03 (-.03)	-.14* (-.17*)	-.17* (-.19**)	.08 (.08)	.11 (.11)
Тормозный контроль	.03 (.02)	-.16* (-.15*)	-.25*** (-.25***)	.04 (.04)	.02 (.02)
Сенсорная чувствительность	.10 (.10)	.05 (.05)	.05 (.06)	-.08 (-.08)	-.09 (-.09)
Удовольствие низкой интенсивности	-.08 (-.06)	.00 (-.05)	-.03 (-.06)	-.07 (-.08)	-.16 (-.16)
Регуляция активности	-.07 (-.06)	-.17* (-.20**)	-.19* (-.21**)	-.04 (-.04)	.07 (.07)

ПО - правильность ответов, СВР – среднее время реакции, СОВР - стандартное отклонение времени реакции, ВИ - величина интерференции, ИИ - индекс интерференции.

В скобках приведены частные корреляции под контролем возраста.

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Связь показателей теста «Размер животного» с личностными чертами

Как представлено в таблице 2 правильность ответов была положительно связана с сознательностью и двумя чертами, входящими в этот фактор: с организованностью – положительно, а с отвлекаемостью - отрицательно. Отрицательные корреляции среднего ВР с сознательностью и входящую в нее черту уступчивость были обнаружены только под контролем возраста. СОВР отрицательно коррелировало с сознательностью и со всеми чертами, входящими в этот фактор. В одном исследовании с использованием теста «Go/No Go» у детей обнаружили корреляцию СОВР в пробах «Go» с психометрическими оценками произвольной регуляцией и сознательности (Martel et al., 2008). В нашем исследовании впервые установлена взаимосвязь вариабельности ВР с индивидуальными особенностями (чертами темперамента и личности) в модификации Струп-теста для детей. Величина эффекта или сила связей экспериментальных показателей ВР и СОВР в тесте «Размер животного» с родительскими оценками произвольной регуляции и ее компонентами – устойчивостью внимания, тормозным контролем и регуляцией активности, а также показателей правильности ответов и СОВР с родительскими оценками сознательности, организованности и

отвлекаемости находилась в диапазоне от .15 до .25, что сопоставимо с модальной величиной эффекта в психологических и медицинских исследованиях, включая экспериментальные исследования (Meuer et al., 2001). Это позволяет предположить, что вариабельность ВР может быть информативным экспериментальным показателем регуляторных функций.

Таблица 2. Корреляции показателей теста «Размер животного» и личностными чертами домена сознательности

	ПО	СВР	СОВР	ВИ	ИИ
Сознательность	.14* (.16*)	-.13 (-.16*)	-.20** (-.23**)	.05 (.05)	.08 (.09)
Ориентация на достижения	.08 (.09)	-.09 (-.13)	-.17* (-.21**)	.05 (.05)	.05 (.05)
Организованность	.18** (.19**)	-.13 (-.13)	-.19** (-.20**)	.05 (.05)	.08 (.07)
Отвлекаемость	-.15* (-.17*)	.11 (.14)	.16* (.20**)	-.05 (-.05)	-.10 (-.10)
Покладистость	.07 (.08)	-.12 (-.14*)	-.16* (-.18*)	.04 (.04)	.06 (.07)

ПО - правильность ответов, ВР - время реакции, СОВР - стандартное отклонение времени реакции, ВИ - величина интерференции, ИИ - индекс интерференции.

В скобках приведены частные корреляции под контролем возраста.

* $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Связь показателей теста «Размер животного» с психическим здоровьем

Корреляционный анализ показал, что правильность ответов была отрицательно связана с гиперактивностью/невнимательностью. Среднее ВР и СОВР положительно коррелировали с общим числом проблем, экстернальными проблемами и гиперактивностью/невнимательностью. Под контролем возраста положительная связь среднего ВР с проблемами поведения стала статистически достоверной, в то время как связь среднего ВР с гиперактивностью/невнимательностью утратила статистическую значимость. Кроме этого, под контролем возраста стали статистически достоверными положительные корреляции СОВР с проблемами поведения, интернальными проблемами и эмоциональными симптомами, при этом СОВР было более тесно связано с проблемами поведения, чем ВР. Эти результаты хорошо согласуются с данными последних лет, показавшими, что у детей и взрослых, страдающих синдромом дефицита внимания и гиперактивности, другими расстройствами неврологического развития и психическими расстройствами, вариабельность ВР во многих психофизиологических заданиях, включая Струп-тест, больше, чем в

контрольной группе (Kofler et al., 2013; Karalunas et al., 2014). Наши данные подтверждают мнение о том, что вариабельность ВР является поведенческим маркером неврологического и психического здоровья (Karalunas et al., 2014; Bastiaansen et al., 2015; Raine et al., 2018). Однако взаимосвязь между вариабельностью ВР и широким спектром проблем психического здоровья в общей популяции изучена только в одной работе (Bastiaansen et al., 2015), где обнаружены корреляции вариабельности ВР с проблемами внимания, экстернальными и интернальными проблемами у молодых взрослых. В нашем исследовании взаимосвязи вариабельности ВР с размерными показателями психического здоровья впервые установлены у детей. Нейробиологические интерпретации этого феномена связывают его с работой осцилляторных сетей покоя, в частности с балансом активации DMN и TPN (Karalunas et al., 2014). Было высказано предположение, что вмешательство DMN при выполнении целенаправленных мыслительных операций, требующих сосредоточения, вызывает неустойчивость внимания и его колебания при выполнении тестов (Sonuga-Barke, Castellanos, 2007).

Таблица 3. Корреляции показателей теста «Размер животного» с психопатологией

	ПО	СВР	СОВР	ВИ	ИИ
Экстернальные проблемы	-.07 (-.07)	.15* (.16*)	.19** (.20**)	-.04 (-.05)	-.11 (-.11)
Проблемы с поведением	.06 (.06)	.11 (.14*)	.13 (.16*)	-.10 (-.09)	-.14* (-.14*)
Гиперактивность/невнимательность	-.16* (-.14*)	.15* (.14)	.20** (.19**)	.00 (-.00)	-.07 (-.07)
Интернальные проблемы	.00 (-.00)	.11 (.14)	.13 (.14*)	.00 (.00)	-.06 (-.06)
Эмоциональные симптомы	.05 (-.00)	.12 (.14)	.11 (.14*)	-.04 (.00)	-.09 (-.06)
Проблемы со сверстниками	-.05 (-.06)	.08 (.11)	.11 (.13)	.05 (.05)	-.01 (-.01)
Общее число проблем	-.05 (-.05)	.16* (.18*)	.20** (.21**)	-.03 (-.03)	-.11 (-.11)

ПО - правильность ответов, ВР - время реакции, СОВР - стандартное отклонение времени реакции, ВИ - величина интерференции, ИИ - индекс интерференции. В скобках приведены частные корреляции под контролем возраста. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$.

Регрессионный анализ

На схемах 1 и 2 приведены результаты множественного регрессионного анализа, отражающие прогностическую значимость возраста, пола, психометрических показателей произвольной регуляции и психического здоровья в отношении показателей теста «Размер животного». Возраст ребенка вносил вклад в правильность ответов, среднего ВР и СОВР. Сознательность и входящая в нее черта организованность позволяли прогнозировать правильность ответов, объясняя 2-3% вариации. Произвольная регуляция поведения была предиктором среднего ВР и определяла около 3% вариации, а сознательность была достоверным предиктором СОВР, определяя 4.6% вариации. На уровне компонентов достоверным предиктором среднего ВР была устойчивость внимания, а в подгруппе школьников – регуляция активности ($\Delta R = .03$, $\Delta F = 6.50$, $df = 1,160$, $\beta = -.18$, $p = .012$). Достоверным предиктором СОВР был тормозный контроль, а в подгруппе школьников – гиперактивность/ невнимательность ($\Delta R = .06$, $\Delta F = 11.30$, $df = 1,160$, $\beta = .24$, $p = .001$).

Схема 1. Результаты регрессионного анализа, отражающие прогностическую значимость возраста и шкал высшего уровня на показатели теста «Размер животного».

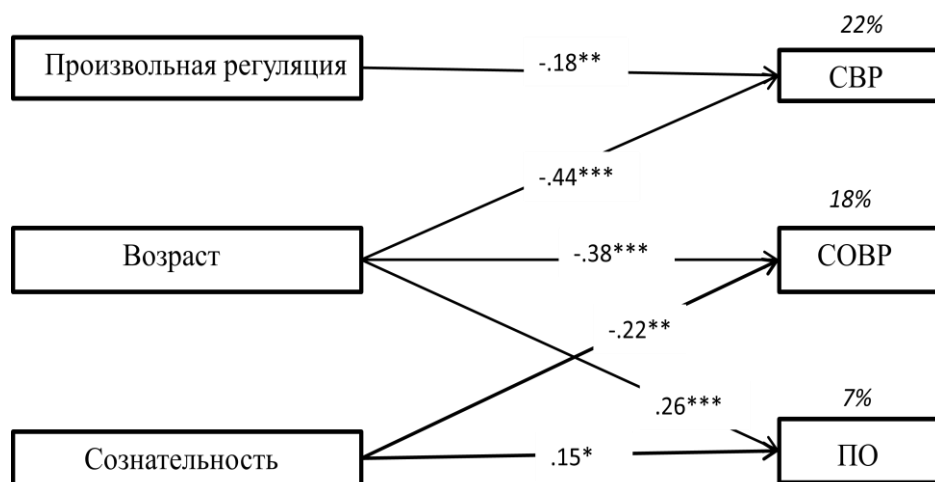
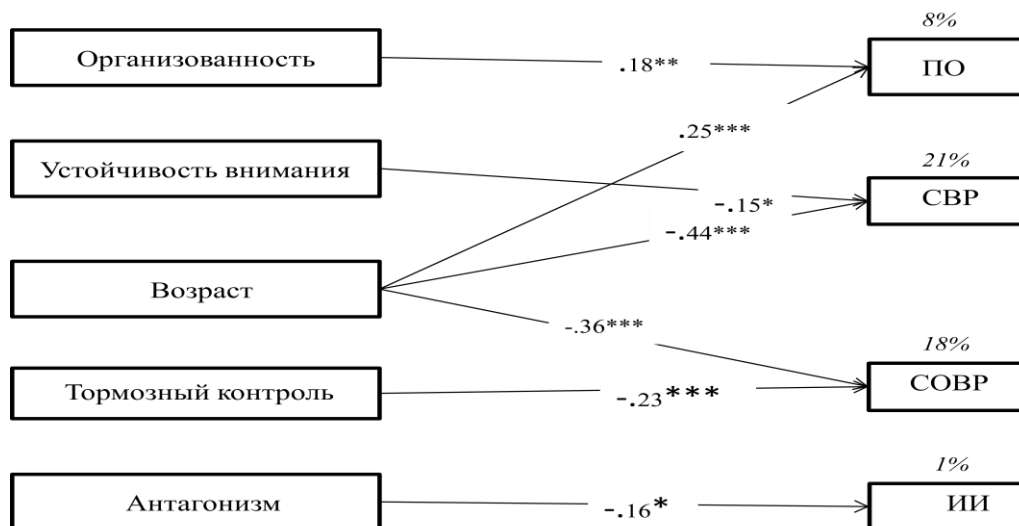


Схема 2. Результаты регрессионного анализа, отражающие прогностическую значимость возраста и шкал среднего уровня на показатели теста «Размер животного».



ПО - правильность ответов, СВР - среднее время реакции, СОВР - стандартное отклонение времени реакции, ИИ - индекс интерференции. На схемах представлены коэффициенты β , R^2

Результаты ЭЭГ исследования

Поскольку DMN и TPN находятся друг с другом в реципрокных отношениях, и сила их антикорреляции является важным показателем развития (Barber et al., 2013), оценивали баланс DMN и TPN. Для этого рассчитывали разностные карты коннективности DMN – CEN и DMN - SN у каждого ребенка отдельно. Для оценки степени интегрированности сетей у каждого испытуемого в каждой сети по каждому частотному диапазону в каждом условии (с открытыми и с закрытыми глазами) были рассчитаны индексы соответствия (GOF, разность z-оценок между корреляциями внутри и вне сети). Предварительный анализ показал, что наиболее высокие значения GOF наблюдали при открытых глазах; в DMN максимальные значения GOF были обнаружены в альфа диапазоне, а в CEN и SN - в диапазоне бета. Исходя из этих результатов и имеющихся фМРТ данных, дальнейший анализ ЭЭГ данных был ограничен двумя частотными диапазонами (альфа и бета) при открытых глазах. На рисунке 3 показаны карты коннективности детей вместе с соответствующими картами коннективности, полученными по данным фМРТ.

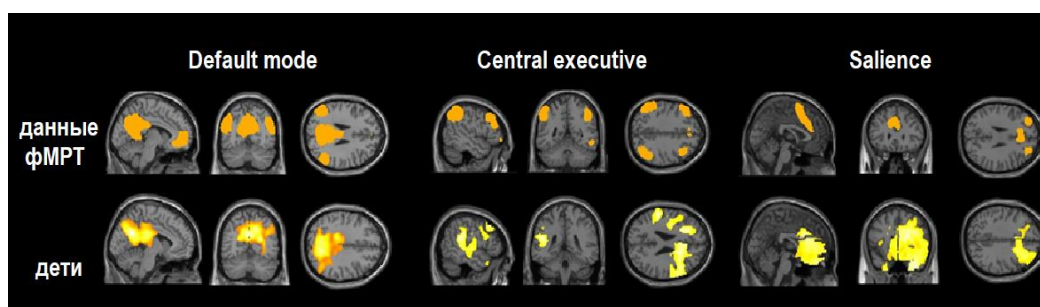


Рис.3. Полученные карты коннективности детей с соответствующими картами коннективности, полученными по данным фМРТ.

Связь произвольной регуляции поведения с сетями покоя

В таблице 5 представлены результаты регрессионного анализа оценок показателей произвольной регуляции на карты коннективности. В альфа диапазоне произвольная регуляция положительно коррелировала с силой связи между DMN и правой верхней височной извилиной, а также с силой связи между сетью SN и правой островковой корой. Поскольку альфа осцилляции связывают с тормозным контролем (Klimesch et al., 2007) и эффекты выявлены в центрах, участвующих в регуляции эмоций, можно думать, что хорошая произвольная регуляция проявляется в усилении тормозного контроля эмоциональных центров как со стороны DMN, которая активна в периоды покоя, так и со стороны SN, активной при оперативной деятельности. В бета диапазоне произвольная регуляция отрицательно коррелировала с силой связи между SEN и левой задней поясной корой, входящей в задний центр DMN. Кроме этого, в бета диапазоне произвольная регуляция коррелировала с доминированием DMN над TPN, оцененным с помощью разностных карт коннективности DMN – SEN и DMN – SN, положительно в правой прекилиновидной коре, являющейся частью DMN, и отрицательно в левой веретенообразной извилине, участвующей в распознавании зрительных образов. Это свидетельствует о том, что хорошая произвольная регуляция связана с лучшей интегрированностью DMN и меньшей ее интерференцией с процессами восприятия зрительной информации.

Таблица 5. Регрессионный анализ зависимости оценок произвольной регуляции и карт коннективности.

Анатомическая локализация	Координаты (x,y,z)	Объем (воксели)	t-критерий	Достоверность (p-FWE)
Семя: MPFC; частота альфа				
+правая верхняя височная извилина	59,-36,17	6633	4.21	0.021
Семя: DLPFC; частота бета				
- левая задняя поясная кора	-15,-38,27	934	3.92	0.013
Семя: AIns; частота альфа				
+правый островок	35,-22,19	1887	4.12	0.013
-левая верхняя средняя фронтальная извилина	-53,50,5	10613	3.95*	0.003

MPFC-AIns; частота альфа				
+левая верхняя фронтальная извилина	-43,42,35	6023	4.33	0.027
MPFC-DLPFC; частота бета				
+правое предклинье	15,-54,55	17859	5.1*	<0.001
- левая веретенообразная извилина	39,-40,-21	7414	4.8	0.026
MPFC-AIns; частота бета				
+правое предклинье	16,-55,-57	10651	3.63*	0.004
- левая веретенообразная извилина	-39,-40,-17	7312	3.99	0.020

MPFC-медиальная префронтальная кора; DLPFC – дорсолатеральная префронтальная кора;
 AIns – передняя островковая кора. *p < .005. p-FWE < 0.05

ВЫВОДЫ

1) Показатели выполнения экспериментального задания обнаруживают выраженные возрастные различия произвольной регуляции поведения у детей 5 – 12 лет. На протяжении дошкольного и младшего школьного возраста показатели выполнения теста (правильность ответов, среднее время реакции и стандартное отклонение времени реакции) значительно улучшались.

2) Показатели выполнения экспериментального задания (правильность ответов, среднее время реакции и стандартное отклонение времени реакции) были связаны с родительскими оценками произвольной регуляции и ее компонентов (тормозного контроля, устойчивости внимания и регуляции активности) у детей.

3) Показатели выполнения экспериментального задания (правильность ответов, среднее время реакции и стандартное отклонение времени реакции) были связаны с личностными чертами домена сознательности - организованностью и отвлекаемостью, а также с уровнем гиперактивности/невнимательности. Среднее время реакции и вариабельность времени реакции, кроме того, связаны с уровнем экстернатальных проблем и общим числом проблем психического здоровья детей. Величина эффекта была сопоставима с модальной величиной эффекта в психологических и медицинских исследованиях, включая экспериментальные исследования.

4) Вариабельность времени реакции обнаружила наиболее тесные связи с психометрическими показателями произвольной регуляции, личностной чертой сознательность и проблемами психического здоровья, что позволяет использовать ее в качестве объективного экспериментального показателя регуляторных функций и поведенческого маркера неврологического и психического здоровья.

5) С помощью ЭЭГ данных верифицированы имеющиеся данные фМРТ о сетях покоя, относящиеся к дефолт системе мозга (DMN), ключевыми структурами которой являются задняя часть поясной извилины, медиальная префронтальная кора, передняя часть поясной извилины и париетальная кора с предклиньем, и к двум системам контроля внимания (TPN): сеть исполнительного контроля (CEN) и входящими в нее дорсолатеральной префронтальной корой, задней частью париетальной коры и сеть выявления значимости (SN) с задним отделом передней части поясной извилины и передней островковой корой.

6) Установлено, что в альфа диапазоне произвольная регуляция, оцененная с помощью родительских опросников положительно коррелировала с силой связи между DMN и правой

верхней височной извилиной, а также с силой связи между SN и правой островковой корой. В бета диапазоне произвольная регуляция коррелировала с доминированием DMN над TPN, положительно в правой преклиновидной коре, являющейся частью DMN, и отрицательно в левой веретенообразной извилине, участвующей в распознавании зрительных образов.

Список сокращений

ACC - передняя часть поясной извилины (anterior cingulate cortex)

CEN - сеть исполнительного контроля (executive-control network)

dACC – задний отдел передней части поясной извилины (dorsal anterior cingulate cortex)

DLPFC - дорсолатеральная часть префронтальной коры (dorsolateral prefrontal cortex)

DMN – Дефолт система мозга (default mode network)

GOF - критерий согласия (goodness-of-fit)

MPFC – медиальная часть префронтальной коры (medial prefrontal cortex)

PCC - задняя часть поясной извилины (posterior cingulate cortex)

RSN – нейронные сети покоя (resting state network)

TPN - сеть, активирующаяся при выполнении заданий (task positive network)

SN - сеть выявления значимости (salience network)

SPM12 - программа статистического параметрического картирования (Statistical Parametric Mapping, Software)

АНК – анализ независимых компонентов

ПО - правильность ответов

ВР - время реакции

СОВР - стандартное отклонение времени реакции

фМРТ - функциональная магниторезонансная томография

Список публикаций по теме исследования:

1) Бочаров А.В., Князев Г.Г., Савостьянов А.Н., Таможников С.С., Сапрыгин А.Е., Баирова Н.Б., Слободская Е.Р. Корреляции выраженности эмоциональных проблем и гиперактивности у детей с компонентами связанного с событием потенциала в Oddball-парадигме // Журнал высшей нервной деятельности, 2019. – Т. 69. - № 3. - С. 314–324.

2) Слободская Е.Р., Баирова Н.Б., Козлова Е.А. Регуляторные способности в детстве: современные представления и методы исследования // Психологический журнал, 2018. – Т. 39(4). – С. 51-61.

- 3) Слободская Е. Р., Козлова Е.А., Баирова Н.Б., Петренко Е.Н., Лето И.В. Произвольная регуляция и благополучие детей // Психологический журнал. 2019. - Т. 40. - № 5. - С. 62-73.
- 4) Bairova N.B., Bocharov A.V., Savostyanov A.N., Petrenko E.N., Kozlova E.A., Saprigyn A.E. Slobodskaya H.R. Stroop-like animal size test: Links with child effortful control, personality and problem behavior // Child Neuropsychology, 2020. – V. 26:3. – P. 409-432.
- 5) Knyazev G., Savostyanov A., Bocharov A., Slobodskaya H., Bairova N., Tamozhnikov S., Stepanova V. Effortful control and resting state networks: A longitudinal EEG study // Neuroscience, 2017 –V.346. – P. 365-381.
- 6) Knyazev G., Savostyanov A., Bocharov A., Slobodskaya H., Bairova N. Personality and resting state networks in children: A longitudinal EEG study // Personality and Individual Differences, 2017. – V.118. – P. 39-43.