

На правах рукописи

КРУЧНИНА ОЛЬГА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**ДИНАМИКА НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ВОСПРИЯТИЯ УСТНОЙ И ПИСЬМЕННОЙ РЕЧИ ПО МЕРЕ ВОЗРАСТНОГО
РАЗВИТИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

03.03.01 – ФИЗИОЛОГИЯ

**Санкт-Петербург
2020**

Работа выполнена в группе возрастной психофизиологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук

Научный руководитель:

Гальперина Елизавета Иосифовна, кандидат биологических наук, руководитель группы возрастной психофизиологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук

Официальные оппоненты:

Мачинская Регина Ильинична, член-корреспондент РАО, доктор биологических наук, зав. лабораторией нейрофизиологии когнитивной деятельности Института возрастной физиологии РАО;

Ляксо Елена Евгеньевна, профессор, доктор биологических наук, руководитель группы по изучению детской речи кафедры высшей нервной деятельности и психофизиологии биолого-почвенного факультета Санкт-Петербургского государственного университета.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мозга человека им. Н.П. Бехтерева Российской академии наук

Защита диссертации состоится 26 мая 2020 года в 11 часов на заседании диссертационного совета (Д.002.127.01) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук по адресу: 194223, г. Санкт-Петербург, пр. Мориса Тореза, 44. Тел. (812)552-79-01, электронная почта office@iephb.ru, сайт <http://www.iephb.ru>.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН (194223, г. СанктПетербург, пр. Мориса Тореза, 44), а также на сайте ИЭФБ РАН: <http://www.iephb.ru/sovet.htm>

Автореферат разослан « » 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор биологических наук



/Р.Г. Парнова/

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Исследование особенностей мозгового обеспечения вербальной деятельности в процессе ее становления является одним из наиболее актуальных направлений физиологии когнитивных процессов (Nickok, Poeppel, 2004; Price, 2012; Tremblay, Dick, 2016, Kireev et al., 2018). Вместе с тем анализ нейрофизиологических механизмов понимания на уровне целостных текстов, а не отдельных слов или фраз, является наименее изученным на сегодняшний день. Несформированность понимания или функциональная неграмотность прогнозируется как серьезная проблема современности при возрастающем информационном давлении (Ясюкова, 2015). При восприятии речи для извлечения смысла высказывания необходима интеграция различных уровней языковой системы (слуховое\зрительное восприятие, фонологический, морфосинтаксический, семантический, прагматический и просодический анализ). Интеграция нейронных сетей необходима для восприятия сложной когнитивной информации (Varela et al., 2001) и особенно речи (для обзора Weiss, Rappelsberger, 1996). Вероятно, мозговые механизмы пластичности, участвующие в освоении сложных лингвистических навыков, отличаются от механизмов, которые обеспечивают реализацию уже усвоенных автоматизированных вербальных навыков (Spironelli, 2010). В то же время, стратегия восприятия на уровне текста зависит от множества параметров: свойств текста, задачи и ситуации чтения, компетенции читателя и пр. (Корнев с соавт., 2019), которые делают автоматизацию навыка понимания на уровне текста или даже предложения крайне затруднительной.

Вербальная деятельность является ключевой для развития и обучения ребенка и зависит от возрастных (Vijayakumar et al., 2018), половых (Hirnsstein et al., 2019) и индивидуальных особенностей психофизиологических функций (Buchweitz et al., 2009), а также от степени сформированности нейрональных основ их реализации (Walenski et al., 2019; Deniz et al., 2019). Большинство исследований мозгового обеспечения восприятия речи проводится на взрослых (Wilson, 2018), либо на детях раннего возраста, находящихся на начальных стадиях овладения речью (Friederici, 2006), тогда как сведений, характеризующих особенности речевой функции у детей предподросткового и подросткового возраста значительно меньше, а имеющиеся данные в основном получены в объединенных без учета возрастной периодизации возрастных группах. Считается, что механизмы восприятия устной речи уже сформированы к 6-7 годам, т.е. к началу школьного обучения, и являются основой для эффективной учебной деятельности и овладения письменной речью (Ахутина, 2014; Станкова с соавт., 2020). Восприятие письменной речи или чтение – это сложный когнитивный процесс, который, в отличие от восприятия устной речи, требует целенаправленного обучения. При этом техническая сторона чтения формируется на протяжении начального школьного обучения, т.е. от 7 до 11 лет (Безруких, Крещенко, 2011; Корнеев с соавт., 2019), а понимание на уровне целого текста, как прочитанного, так и воспринимаемого на слух, продолжает совершенствоваться на протяжении подросткового, юношеского и взрослого возраста (Корнев, 2003, Шемякина с соавт., 2018). Процессы понимания речи могут опираться на модально неспецифичные системы мозга, тогда как физиологические различия восприятия речи на слух и чтения могут быть обусловлены разными сенсорными входами (Deniz, 2019).

На предподростковый и подростковый периоды развития приходится ряд существенных изменений в развитии мозга (Wilke et al., 2005; Lenroot, Giedd, 2006; Цехмистренко с соавт., 2019) и высших психических функций (Diamond, 2002; Мозговые механизмы..., 2014, Ляксо с соавт., 2017). Интенсивные гормональные перестройки, характерные для этого периода, оказывают существенное влияние на особенности мозгового обеспечения вербальной деятельности у мальчиков и девочек (Berenbaum, Beltz, 2011). Однозначного мнения относительно половых отличий функциональной связности мозга, как в фоновом состоянии, так и при деятельности, пока не сформировано, а имеющиеся данные зачастую противоречивы (Etchell et al., 2018). Вопрос о возрасте проявления половых отличий до конца не решен, возможно, в связи с недостатком лонгитюдных и онтогенетических исследований. Вероятно, у мужчин и женщин существует специфика реализации вербальной

деятельности, которую признают даже сторонники теории «гендерного равенства» (*Gender Similarities*), четко оговаривая условия, в которых были выявлены гендерные различия (Hyde, 2005, 2016). Однако остается открытым вопрос: связаны ли эти отличия с различными темпами полового созревания у мальчиков и девочек и, следовательно, они нивелируются по завершению этого периода, либо траектории развития церебрального обеспечения речевой функции у мужчин и женщин отличаются.

Наиболее используемым методом исследования физиологического обеспечения когнитивных функций является фМРТ. В то же время при изучении закономерностей становления речевой функции у детей исключительно важна экологичность организации наблюдения, что накладывает определенные методические ограничения. Так, использование фМРТ у детей затруднено длительным обездвиживанием и сильным шумом сканера. При использовании электроэнцефалографических методов (ЭЭГ, ССП\ERP) экспериментальные условия более приближены к естественной форме исследуемых процессов (Friederici, 2004). Метод связанных с событиями потенциалов (ССП) позволяет описать временной ход событий при обработке речевого сигнала (Friederici, 2011), тогда как пространственное взаимодействие различных корковых зон в процессе вербальной деятельности традиционно описывается с помощью корреляционного анализа ЭЭГ (Цицерошин, Шеповальников, 2009).

Длительность и гетерохронность созревания психофизиологических функций, обеспечивающих вербальную деятельность, определяют необходимость исследования особенностей становления интегративной деятельности мозга при восприятии устной и письменной речи как на разных этапах онтогенеза, так и на различных стадиях формирования навыка. Взаимодействие корковых и подкорковых структур лежит в основе формирования структурно-функциональных систем со звеньями различной степени жесткости, которые обеспечивают различные психические процессы (Бехтерева, 1971; Цицерошин, Шеповальников, 2009). Совершенствование процессов восприятия речи сопровождается развитием системы функциональных связей нервных центров, что находит свое отражение в становлении пространственной структуры биопотенциалов мозга по мере взросления.

Ранее описаны особенности организации биоэлектрической активности головного мозга у детей, подростков и взрослых в состоянии спокойного бодрствования (Фарбер, 1990; Горбачевская 1991; Соколова, Малышев, 2006; Anderson, Perone, 2018; Станкова, Шеповальников, 2018) и при различных видах когнитивной деятельности (Соколова, 2003; Мачинская, 2006; Цицерошин, Шеповальников, 2009; Guillemard et al., 2018). Вместе с тем, сравнительный детальный анализ возрастных особенностей функциональной активности мозга при восприятии устной и письменной речи на уровне текста в широком возрастном диапазоне ранее не был произведен.

Возникает сложная проблема взаимосвязи многих факторов (возраста и пола испытуемых, модальности вербальной задачи и пр.) и их влияния на системное взаимодействие различных отделов коры при вербальной деятельности. Несмотря на большое количество мультидисциплинарных исследований речи, сочетанное влияние факторов возраста и пола на особенности мозговой организации восприятия устной и письменной речи в широком возрастном диапазоне от второго детства до взрослого возраста еще недостаточно полно описаны. Недостаток этих знаний ощущается особенно остро, когда встает вопрос о модернизации методов обучения и повышения эффективности коррекционной работы. Данное исследование посвящено описанию траектории формирования пространственно-временных взаимодействий биопотенциалов мозга, отражающих становление нейрофизиологических механизмов восприятия устного и письменного текста у испытуемых мужского и женского пола.

Цель и задачи исследования:

Цель работы заключалась в описании возрастной динамики нейрофизиологического обеспечения восприятия устной и письменной речи у испытуемых мужского и женского пола.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

1. Изучить возрастные особенности пространственной синхронизации биопотенциалов (ПСБП) мозга у испытуемых 4 – 35 лет в состоянии спокойного бодрствования.
2. Сопоставить картину пространственной синхронизации биоэлектрической активности мозга при восприятии на слух и чтении текста у детей, подростков и взрослых.
3. Описать возрастные особенности компонентов связанных с событиями потенциалов (ССП), возникающих в ответ на зрительное предъявление фраз, у детей предподросткового и подросткового возраста.
4. Описать половые особенности биоэлектрической активности мозга (ПСБП, СПП) в состоянии спокойного бодрствования и при вербальной деятельности.
5. Описать динамику становления пространственной синхронизации биопотенциалов мозга при восприятии текстов у детей, подростков и взрослых мужского и женского пола.

Научная новизна работы. Впервые в широком возрастном диапазоне, охватывающем детский, подростковый и взрослый возраст, показана динамика становления пространственной организации биопотенциалов мозга как в состоянии спокойного бодрствования, так и при восприятии устных и письменных текстов, с использованием метода оценки общей скоррелированности ЭЭГ процессов в факторном пространстве.

Топическая специфичность изменений ПСБП, выявляемая при восприятии текстов на слух и при чтении увеличивается с подросткового возраста (с 12 лет). При восприятии текстов на слух наблюдается изменение вклада височных областей левого полушария и затылочно-теменных – правого. При чтении текста – лобных, затылочных и центральных зон билатерально, причем по мере возрастного развития паттерн межрегиональных взаимодействий, характеризующий процесс чтения на уровне текста, проявляется все более отчетливо.

Показано, что половые особенности пространственной синхронизации биопотенциалов мозга более выражены при вербальной деятельности, чем в состоянии спокойного бодрствования. Впервые описана динамика становления с возрастом ПСБП мозга при восприятии устной и письменной речи, которая различается у мужчин и женщин. У женщин уровень ПСБП мозга изменяется сходным образом, как при восприятии устных, так и письменных текстов: нарастает к 15 - 17 годам, а затем стабилизируется. У мужчин в зависимости от модальности предъявления текста выявлена специфика изменения уровня ПСБП мозга: при восприятии текста на слух - постепенно нарастает с возрастом, а при чтении - нарастает от детского к подростковому возрасту, не изменяется на протяжении подросткового возраста, а затем опять увеличивается у взрослых. Половые отличия пространственной синхронизации биопотенциалов мозга при восприятии речи начинают проявляться в подростковом возрасте. С использованием методов оценки ПСБП мозга и анализа СПП выявлены зоны, в которых наиболее ярко проявляются половые отличия в подростковом возрасте, а именно теменно-височные области правого полушария. Таким образом для становления мозговых механизмов обеспечения вербальных функций высокого порядка, касающихся анализа сложных взаимоотношений речевых сигналов на уровне фразы и текста, подростковый период развития является ключевым.

Теоретическая и практическая значимость работы. Полученные нами результаты вносят существенный вклад в понимание нейрофизиологических процессов, лежащих в основе восприятия речи на уровне фразы и текста. Реализованный в работе комплексный подход позволяет описать влияние возраста, пола и специфики вербального задания на пространственную синхронизацию биопотенциалов мозга.

Практическая значимость работы обусловлена актуальностью совершенствования методологии разработки индивидуальных траекторий развития, образования и обучения детей и подростков, с учетом их возрастных, половых и социокультурных особенностей. Полученные в работе данные могут быть использованы в дальнейшем при разработке возрастных нормативов нейрофизиологического обеспечения когнитивной деятельности у типично развивающихся детей и подростков, а сопоставление полученных данных с ЭЭГ-

характеристиками детей при разных видах нарушения речи может быть использовано для разработки адекватных подходов коррекционно-развивающей работы.

Данные о возрастных и половых особенностях пространственно-временной организации биопотенциалов мозга при разных видах вербальной деятельности использованы в теоретических и практических занятиях по курсам «Возрастная психофизиология» и «Нейробиологические основы коммуникации». Материалы диссертации могут быть использованы в курсах лекций и практических занятий для студентов педагогических, психологических, биологических и медицинских специальностей университетов и институтов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Формирование структуры межрегиональных взаимодействий биопотенциалов мозга продолжается вплоть до взрослого возраста и характеризуется постепенным увеличением уровня пространственной синхронизации биопотенциалов мозга, что прослеживается не только в состоянии спокойного бодрствования, но и при восприятии речи.
2. В предпубертковом и пубертковом возрасте продолжается формирование нейрофизиологических механизмов, обеспечивающих восприятие устной и письменной речи на уровне фразы и текста, что проявляется в снижении амплитуды вызванного ответа при чтении фраз по мере взросления, а также в возрастании специфики паттерна функционального взаимодействия корковых полей мозга при восприятии текста на слух и чтении.
3. Половые отличия пространственной синхронизации биопотенциалов мозга проявляются при восприятии текстов на слух или зрительно, а не в состоянии спокойного бодрствования.
4. Возрастная динамика формирования, а также структура функционального взаимодействия корковых полей при восприятии устных и письменных текстов различается у мужчин и женщин, при этом различия не исчерпываются темповыми характеристиками развития.

Апробация результатов. Результаты исследования доложены и обсуждены на международных и всероссийских конференциях, среди которых: International Conference «Neurobiology of Speech and Language» (St. Petersburg, 2017, 2018, 2019); World Congress of Psychophysiology (IOP-2016, Cuba, IOP-2018, Lucca); The Fourth St. Petersburg Winter Workshop on Experimental Studies of Speech and Language (Night Whites, St. Petersburg, 2018); FENS (Barcelona, 2012); International IEEE Conference devoted to the 150-anniversary of Alexander S. Popov (St. Petersburg, 2009); Интегративная физиология: Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 170-летию со дня рождения И.П. Павлова (Санкт-Петербург, 2019 г.); Всероссийская (с международным участием) научная конференция «Центральные механизмы речи», посвященная памяти проф. Н. Н. Трауготт (Санкт-Петербург, 2017 г., 2019 г.); Актуальные проблемы биомедицины (Санкт-Петербург, 2018 г.); III международная научная конференция «Современные проблемы нейробиологии», посвященная памяти заслуженного деятеля науки РФ, профессора В.В. Шилкина (Ярославль, 2018 г.); Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Современные аспекты интегративной физиологии» (Санкт-Петербург, 2018 г.); VI Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием Клиническая нейрофизиология и нейрореабилитация (Санкт-Петербург, 2018 г.); Всероссийская молодежная конференция с международным участием «Нейробиология интегративных функций мозга», посвящённая 100-летию Физиологического общества им. И. П. Павлова (Санкт-Петербург, 2017 г.); Международный междисциплинарный конгресс «Нейронаука для медицины и психологии» (Судак, 2009 г., 2010 г., 2011 г., 2017 г.); Международное совещание и Школа по эволюционной физиологии, посвященные памяти академика Л.А. Орбели (Санкт-Петербург, 2011 г., 2016 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 25 печатных работ, 6 из которых – статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования материалов кандидатских диссертаций, 1 глава в монографии, а также статьи и тезисы докладов в других печатных изданиях.

Финансовая поддержка работы. Данное исследование проведено на средства государственного бюджета по госзаданию ИЭФБ РАН, гранта РФФИ № 18-313-00169мол_a («Мой первый грант»).

Личный вклад автора. Все экспериментальные данные получены лично автором или при его непосредственном участии. Автор лично разработал схему эксперимента, подбирал и валидизировал стимульный материал. Обработка и обобщение результатов, подготовка рукописи были проведены автором работы. Подготовка публикаций по теме исследования выполнялась автором работы и его научным руководителем.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, обзора литературы, описания материалов и методов исследования, результатов исследования, их обсуждения, заключения и выводов. Работа изложена на 161 странице печатного текста, включает 15 рисунков и 10 таблиц. Список литературы состоит из 360 источников (в том числе 73 отечественных).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытуемые. В исследовании принимали участие 254 испытуемых в возрасте от 4 до 35 лет (Таблица 1). Испытуемые не имели неврологических заболеваний и речевых нарушений в анамнезе, не принимали лекарственных препаратов и не имели жалоб на здоровье на момент обследования. Исследования проводили с соблюдением требований Хельсинкской декларации по утвержденному Комиссией по этике биомедицинских исследований ИЭФБ РАН протоколу. Все испытуемые участвовали в исследованиях добровольно. Родители несовершеннолетних участников исследования были информированы о целях обследования и дали письменное согласие на его проведение.

Таблица 1 – Состав испытуемых, принявших участие в экспериментальных сериях.

	Экспериментальная серия	Возраст в годах	Количество	Пол мужской\женский
1	Исследование спокойного бодрствования с закрытыми глазами	4 – 35	230	114\116
2	Исследование спокойного бодрствования бодрствование с открытыми глазами	9 – 35	147	65\82
3	Изучение восприятия текстов на слух	5 – 35	120	56\66
4	Изучение чтения текстов	9 – 35	131	62\69
5	Изучение чтения фраз (ССП)	9 – 14	39	16\23

Стимульный материал. Тексты для восприятия на слух и чтения подбирались, исходя из возраста испытуемых, и соответствовали определенным критериям: семантически завершённый отрывок литературного текста длиной 400-450 слов, описательного характера, преимущественно эмоционально нейтральный, новый для испытуемых. Текст для чтения предъявлялся на мониторе компьютера, расположенном в 1 м от испытуемого. Текст для прослушивания предъявлялся через наушники. После прочтения\прослушивания отрывка испытуемым необходимо было ответить на 10 вопросов по содержанию текста для оценки понимания прочитанного\прослушанного. В анализ брались записи ЭЭГ тех испытуемых, процент ошибочных ответов у которых не превышал 10 %.

Отдельная экспериментальная серия (ССП ЭЭГ исследование) была посвящена исследованию чтения нераспространенных фраз, состоящих из двух слов (подлежащее, сказуемое), детьми 9-11 лет и подростками 12-14 лет.

Регистрация ЭЭГ в состояниях спокойного бодрствования и при восприятии текстов на слух или чтении. Регистрацию ЭЭГ производили на 24-канальном компьютерном электроэнцефалографе *Brain Dynamics analyzer* (Россия) с полосой пропускания – 0.5–30 Гц, с частотой дискретизации 250 Гц по каждому из каналов. Запись производили от 20 монополярных отведений, из них 16 располагали по международной схеме 10–20 (Fp_1 , Fp_2 , F_3 , F_4 , F_7 , F_8 , C_3 , C_4 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 , P_3 , P_4 , O_1 , O_2). Дополнительно устанавливали четыре электрода:

два – в передневисочных областях каждого из полушарий (T_1, T_2) и два – в зонах перекрытия височной, теменной и затылочной областей (Tr_1, Tr_2). В качестве референтного отведения использовали объединенные электроды на мочках ушей. Для регистрации движений глаз и морганий использовали биполярное отведение с расположением электродов в районе височного угла глаза и верхнего края глаза.

Регистрация связанных с событиями потенциалов мозга при чтении фраз. Для регистрации ЭЭГ использован электроэнцефалограф Нейровизор БММ NVX 52 фирмы Neurobotics. ЭЭГ регистрировалась монополярно от 19 электродов, расположенных по системе 10/20 (Fp1, Fp2, F3, F4, Fz, F7, F8, C3, C4, Cz, T3, T4, T5, T6, P3, P4, Pz, O1, O2), с референтом в виде объединенного ушного электрода, заземляющий электрод располагался на голове испытуемого в области вертекса. Сопротивление электродов не превышало 10 кОм. ЭЭГ регистрировалась в полосе 0.53 – 50 Гц, частота дискретизации составляла 500 Гц, сетевой фильтр 45-55 Гц. Для регистрации движений глаз и морганий использовали биполярное отведение с расположением электродов в районе височного угла глаза и верхнего края глаза.

Анализ пространственной синхронизации биопотенциалов мозга в состояниях спокойного бодрствования и при восприятии текстов на слух или чтении. ЭЭГ в диапазоне 1.6–30 Гц после удаления артефактов разделяли на эпохи анализа по 4 с, для каждой эпохи анализа вычисляли матрицы коэффициентов кросскорреляции (КК) ЭЭГ от всех отведений попарно. Для определения уровня общей пространственной синхронизации биопотенциалов мозга (ПСБП) и особенностей топической организации ПСБП матрицы КК ЭЭГ анализировали методом «объемов» (Барвинок, Рожков, 1992). В основе метода лежит представление многоканальной ЭЭГ в виде совокупности векторов b_1, \dots, b_n единичной длины в многомерном евклидовом пространстве, где каждый из векторов соответствует локальному ЭЭГ-процессу, а косинус угла между двумя векторами есть КК между локальными процессами. Иными словами, матрица КК ЭЭГ $A = (a_{ij})$, $1 \leq i, j \leq n$ представляет собой матрицу попарных скалярных произведений векторов b_1, \dots, b_n и $a_{ij} = (b_i, b_j)$. В нашем случае $n = 20$, что соответствует числу отведений ЭЭГ. Производили расчет объема d -мерного параллелепипеда, натянутого на вектора b_{i1}, \dots, b_{id} . Для получения более статистически устойчивых оценок параметра VOL , объем параллелепипеда рассчитывали не в полномерном ($d = n = 20$) пространстве, а при $d = 4$, таким образом, что величина VOL соответствовала среднему из $n!/(d!(n-d)!)$ объемов. Объем параллелепипеда, соответствующего каждой подматрице матрицы КК ЭЭГ $A = (a_{ij})$, $1 \leq i, j \leq d$, пропорционален корню квадратному значения определителя подматрицы A . В целях оптимизации вычислительной процедуры параметр VOL вычисляли по формуле: $VOL = (-1)^{d-1} \text{Tr} B_d$, где B_d – присоединенные матрицы для подматриц A_d которые рассчитывались по методу Д.К. Фаддеева (Гантмахер, 1967).

Чем больше скоррелированы сигналы, тем меньше углы между векторами, тем меньший объем занимает пучок ЭЭГ-векторов в пространстве. Таким образом, «объем» (VOL), занимаемый пучком ЭЭГ-векторов в пространстве, иначе говоря, показатель линейной зависимости ЭЭГ-сигналов от всех отведений, выступает качестве меры ПСБП мозга. Если $VOL = 0$, то процессы максимально линейно зависимы, если $VOL = 1$, то процессы линейно независимы (векторы пучка попарно ортогональны).

Для оценки особенностей топической организации ПСБП для каждого из ЭЭГ-отведений вычисляли показатель $V(i)$ (где i – порядковый номер отведения) – «долю объема» пучка векторов, приходящуюся на i -й вектор. Величины $V(i)$ пропорциональны диагональным элементам матрицы Vd . Величина $V(i)$ характеризует степень отличия i -го ЭЭГ-сигнала от совокупности остальных: чем больше $V(i)$, тем больше отличие.

Картина ЭЭГ, а, следовательно, и показатель VOL , сильно изменяются в зависимости от наличия зрительного сенсорного потока. В данном исследовании при восприятии текста на слух испытуемый находился с закрытыми глазами, а при чтении - с открытыми, поэтому особенности ПСБП мозга при вербальной деятельности, оцениваемые как по интегративному показателю VOL , так и по долям зон $V(i)$, рассматривались по отношению к соответствующему

фоновому состоянию: восприятие на слух сравнивали с фоном, зарегистрированным при закрытых глазах, а чтение - с состоянием спокойного бодрствования, зарегистрированным при открытых глазах.

Статистический анализ производился в пакете программ «Statistica-12». Межгрупповые сравнения ПСБП проводили с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) с учетом факторов «возраст» (4 возрастные группы), «задание» (фон и вербальная деятельность) и «пол». Уровень значимости принимали равным 0,01. Апостериорный анализ проводили с помощью теста Фишера, применяли поправку Бонферони для корректировки уровня значимости гипотезы на количество сравнений. В тексте приведены средние значения показателей ПСБП мозга и 95% доверительный интервал для ошибки среднего.

Анализ связанных с событиями потенциалов мозга при чтении фраз. Непрерывная запись ЭЭГ разделялась на эпохи анализа, которые начинались за 200 мс перед началом предъявления стимула и продолжались 2000 мс после начала предъявления стимула. Анализ связанных с событием потенциалов производили в программе «WinEEG». Методом независимых компонентов удаляли глазодвигательные артефакты из нативной ЭЭГ (Chaumon et. al., 2015), фрагменты ЭЭГ в момент чтения фраз (пробы), содержащие другие виды артефактов, удалялись из обработки на основе визуального анализа. Расчет вызванных потенциалов производили на интервале от 300 мс до предъявления стимула до 1000 мс после предъявления стимула (всего 1300 мс). Для каждой пробы производилась коррекция изолинии. Усреднение вызванных потенциалов производили отдельно для каждого отведения ЭЭГ. Компоненты ССП – N100, N200, P300, N400, P500 определяли, как последовательности отрицательных и положительных пиков во временных интервалах 50-150, 150-250, 250-400, 350-450, 450-600 мс. Интервалы пиков определяли по значениям полумаксимумов амплитуд волн.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В различных экспериментальных сериях были выявлены возрастные и половые особенности биоэлектрической активности коры головного мозга, как в состоянии спокойного бодрствования, так и при восприятии устных и письменных текстов и фраз, у испытуемых от 4 до 35 лет.

Возрастные особенности биоэлектрической активности мозга были описаны как с использованием метода оценки «объемов рассеяния» ЭЭГ векторов в факторном пространстве, характеризующего пространственную организацию ЭЭГ, так и с использованием анализа событийно-связанных потенциалов, описывающего временную последовательность изучаемых событий.

В ряде работ описаны возрастные изменения пространственной организации биопотенциалов мозга (Фарбер с соавт., 1990, 2014, Физиология развития ребенка, 2010, Цицерошин, Шеповальников, 2009, Гальперина и др. 2010, Семенова с соавт., 2015). Показатель «объем рассеяния» ЭЭГ векторов (*VOL*) характеризует степень линейной взаимосвязанности колебаний потенциалов во всей совокупности отведений ЭЭГ, его величина обратно пропорциональна уровню пространственной синхронизации ЭЭГ, т.е. меньшие значения величины *VOL* свидетельствуют о большем уровне ПСБП мозга. Выявленное нами снижение «объема рассеяния» ЭЭГ векторов в факторном пространстве у испытуемых от 4 до 35 лет в состоянии покоя с закрытыми глазами отражает градуальное возрастание степени пространственной синхронизации биоэлектрических процессов по мере развития (**Рисунок 1**). Результаты исследования демонстрируют достоверное увеличение степени пространственной синхронизации биопотенциалов мозга от 4 до 20 лет. В возрасте 20 лет степень согласованности локальных ЭЭГ - сигналов достигает уровня взрослого возраста и выходит на плато (**Рисунок 1**). Описанная тенденция увеличения уровня пространственной синхронизации биопотенциалов с возрастом прослеживается в группах испытуемых и мужского и женского пола.

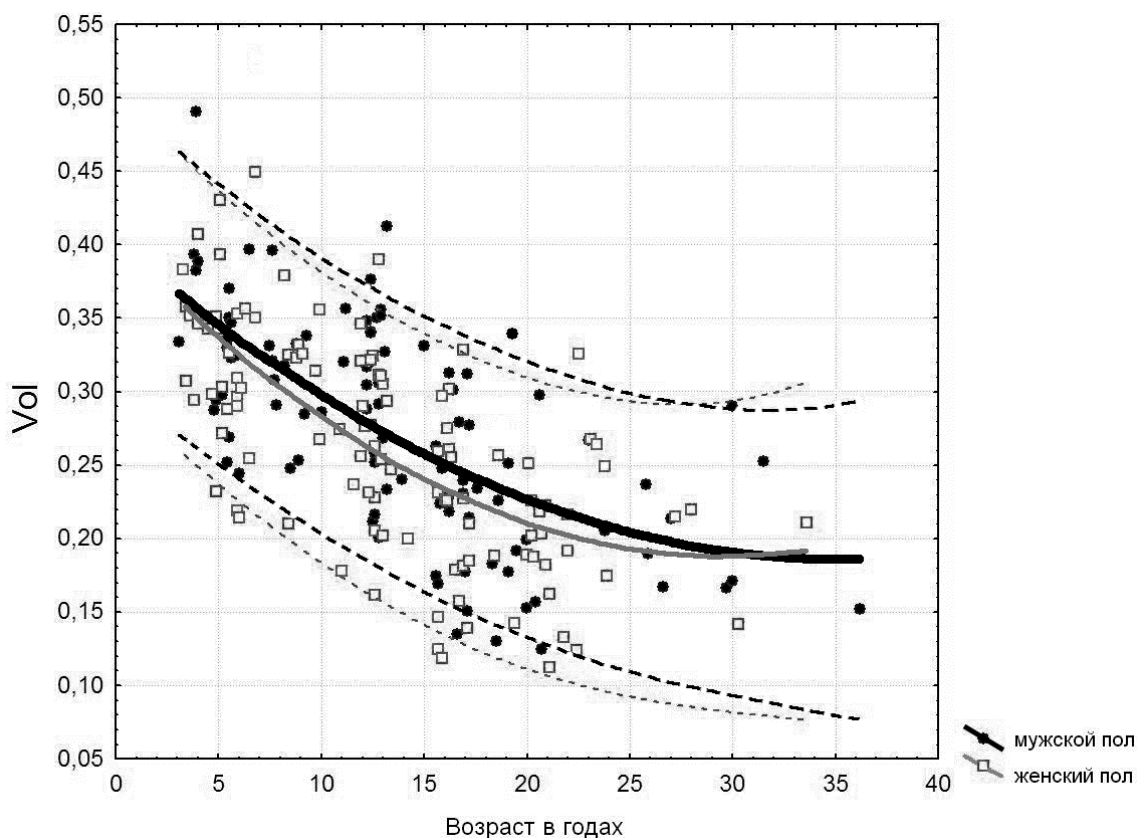


Рисунок 1. Изменение уровня ПСБП с возрастом у испытуемых мужского и женского пола в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами. По оси абсцисс представлен возраст испытуемых в годах, по оси ординат – показатель уровня пространственной синхронизации ЭЭГ, рассчитанный по «объемам рассеяния» векторов ЭЭГ (VOL), характеризующего степень линейных взаимосвязей колебаний потенциалов во всей совокупности отведений ЭЭГ, в относительных единицах. Черным (линией и кружком) обозначены испытуемые мужского пола, серым (линией и квадратом) – женского. Использована полиномиальная аппроксимация возрастной зависимости. Пунктирные линии – 95% предикативные границы.

Постепенное увеличение по мере возрастного развития пространственной синхронизации биопотенциалов мозга, показано не только в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми, но и с открытыми глазами, а также при вербальной деятельности (**Рисунок 2**). Полученные нами результаты подтверждают данные литературы о становлении пространственной синхронизации ЭЭГ с возрастом, которая оценивалась с использованием расчета когерентности ЭЭГ сигнала (Barry et al, 2004, Фарбер, 2009), коэффициентов корреляции ЭЭГ процессов (Цицерошин, Шеповальников, 2009, Guillemard et al., 2018) и «объема» рассеяния ЭЭГ векторов (Сороко с соавт., 2013, Кручинина с соавт., 2014, 2018).

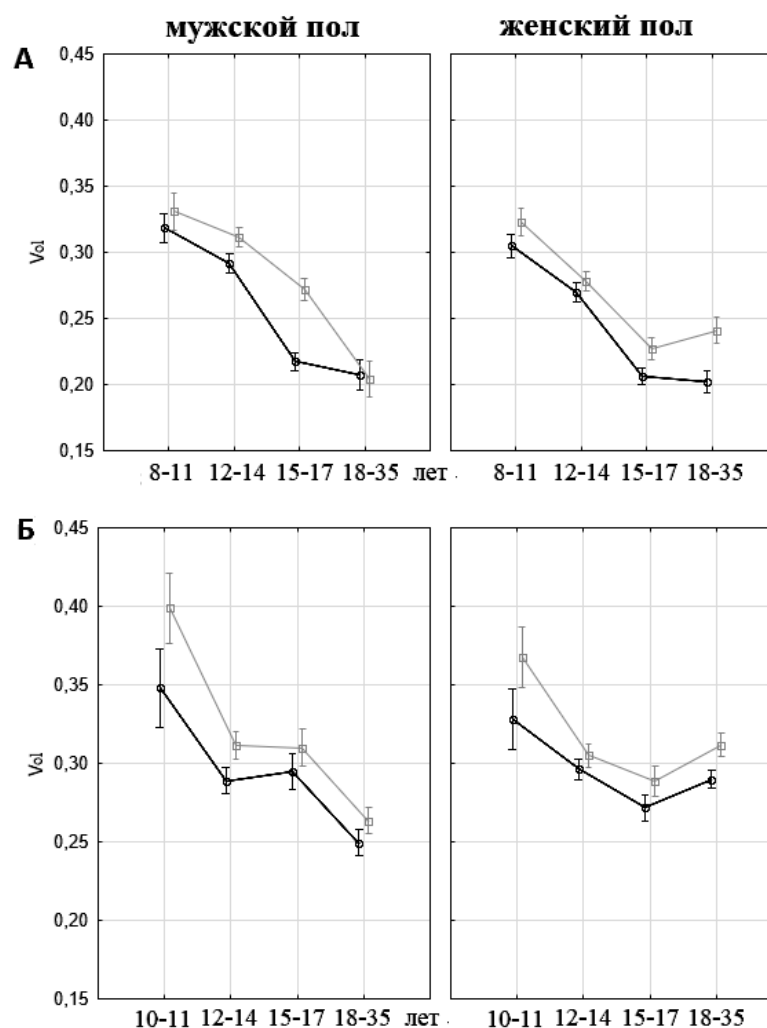


Рисунок 2. Динамика изменений уровня пространственной синхронизации ЭЭГ в фоне и при восприятии текстов у испытуемых 8-35 лет мужского и женского пола. А - в спокойном бодрствовании с закрытыми глазами и при восприятии на слух текстов; Б - в спокойном бодрствовании с открытыми глазами и при чтении текстов. Черная линия – спокойное бодрствование (с закрытыми/открытыми глазами), серая линия – восприятие текста на слух\чтение. По оси абсцисс обозначены возрастные группы, по оси ординат – показатель уровня пространственной синхронизации ЭЭГ, рассчитанный по «объемам рассеяния» векторов ЭЭГ, в относительных единицах. Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы для ошибки среднего.

Ранее нами было показано, что по мере возрастного развития происходит увеличение уровня пространственной синхронизации биопотенциалов мозга в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми глазами (от 4 до 30 лет), а также при восприятии на слух текстов как на русском, так и на английском языках (Кручинина с соавт., 2014). В данном исследовании при восприятии на слух и при чтении текста у испытуемых от 8 до 35 лет (N=143, 64 мужского пола) также, как и в состоянии спокойного бодрствования, выявлено постепенное увеличение по мере возрастного развития уровня пространственной синхронизации биопотенциалов мозга (**Рисунок 2**). Результаты дисперсионного однофакторного анализа показали, что фактор «Возраст» (4 градации: 8-11 лет, 12-14 лет, 15-17 лет, 18-35 лет) оказывал достоверное влияние на величину показателя VOL, зарегистрированного в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми ($F(3, 104) = 46,1, p < 0.00001$) и открытыми глазами ($F(3, 127) = 32,2, p < 0.00001$), а также при выполнении каждого из вербальных заданий: восприятии текста на слух ($F(3, 104) = 28,8, p < 0.00001$), чтение текста ($F(3, 127) = 25,3, p < 0.00001$). В частности, от детского ко взрослому возрасту, при выполнении вербальных заданий разной модальности, как и в состоянии спокойного бодрствования (**Таблица 2**), происходит снижение значения показателя VOL,

характеризующего степень линейной взаимосвязанности ЭЭГ-сигналов со всей совокупностью отведений.

Таблица 2. Среднее значение показателя *VOL* в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми и открытыми глазами, а также при восприятии текста на слух и при чтении текста у испытуемых 8-35 лет.

<i>VOL</i>	8-11 лет		12-14 лет		15-17 лет		18-30 лет	
	Ср. зач.	95% доверит. для ош. ср.	Ср. зач.	95% доверит. для ош. ср.	Ср. зач.	95% доверит. для ош. ср.	Ср. зач.	95% доверит. для ош. ср.
Фон - закрытые глаза	0.314	±0.005	0.283	±0.006	0.224	±0.006	0.223	±0.006
Фон - открытые глаза	0.335	±0.008	0.293	±0.003	0.280	±0.004	0.277	±0.002
Восприятие на слух	0.326	±0.005	0.294	±0.003	0.250	±0.003	0.228	±0.005
Чтение текста	0.381	±0.007	0.308	±0.003	0.297	±0.004	0.290	±0.003

Примечание: группы испытуемых: дети 8-11 лет (средний возраст 10.1 ± 1.2 , N=35, 16 мальчиков), подростки 12-14 лет (средний возраст 13.3 ± 1.1 , N=36, 15 юношей), подростки 15-17 лет (средний возраст 16.5 ± 1.3 , N=35, 15 юношей) и взрослые испытуемые (средний возраст 26.1 ± 5.1 , N=41, 16 мужчин).

Уровень пространственной синхронизации биоэлектрической активности мозга при выполнении вербальных заданий значимо ниже, чем в состоянии спокойного бодрствования во всех возрастных группах (4-6 лет, 8-11 лет, 12-14 лет, 15-17 лет, взрослые), при этом динамика возрастных изменений сходна в каждом из вербальных заданий и соответствующем фоне. Снижение уровня ПСБП мозга характеризует увеличение доли локальной активности и, следовательно, возрастание степени дифференцированного участия различных зон коры в обеспечении когнитивных процессов. При когнитивной деятельности у взрослых и детей описаны изменения статистических связей биоэлектрической активности различных отделов коры больших полушарий мозга по сравнению с состоянием покоя (Цицерошин, 1997, Гальперина с соавт., 2010, 2014; Guillemard et al., 2018). М.Н. Цицерошиным (1997) было показано, что выполнение функциональных нагрузок сопровождается видоизменением исходной пространственной структуры статистических взаимосвязей колебаний биопотенциалов, типичной для состояний покоя, а не ее полным разрушением, и созданием абсолютно новых “конstellаций” нервных центров. Необходимым условием для реализации когнитивной деятельности является соотношение процессов регулируемой локальной активации, создающих структурную основу нейронных сетей (Фарбер, 2000; Дубровинская, 2009; Павлова, 2017), а также процессов межцентральной интеграции, обеспечивающих взаимодействие в этой распределенной системе (Цицерошин с соавт., 2012, Guillemard et al., 2018). Таким образом, целенаправленная деятельность обеспечивается селективным вовлечением в работу различных систем мозга, повышением активности одних и снижением - других зон коры, а также избирательной организацией синергических и реципрокных связей между ними (Фарбер, 2009, Сороко с соавт., 2012).

Поскольку картина ЭЭГ меняется в зависимости от наличия зрительного сенсорного потока (Изнак, Гусельников, 1984; Развитие мозга и формирование ..., 2009), а также изменяются и пространственно-временные отношения биопотенциалов (Цицерошин, Шеповальников, 2009), то выявленная нами динамика увеличения с возрастом уровня пространственной синхронизации биопотенциалов мозга во всех исследованных состояниях позволяет предположить наличие более общих, не зависящих от специфики задания, мозговых механизмов, обеспечивающих интеграцию нервных процессов, как в фоне, так и при

деятельности, и действующих одинаково эффективно при нагрузках, выполняемых с закрытыми и открытыми глазами.

На предпододростковый и подростковый периоды развития приходится ряд существенных изменений в развитии мозга (Wilke et al., 2005; Lenroot, Giedd, 2006; Физиология развития ребенка, 2010; Цехмистренко с соавт., 2019) и высших психических функций (Diamond, 2002; Мозговые механизмы формирования познавательной деятельности и личности... 2014, Ляксо с соавт., 2017). В нашем исследовании возрастные различия были также выявлены при оценке топических особенностей пространственной синхронизации биопотенциалов мозга. Используя показатель $V(i)$, характеризующий степень тесноты связей одного отведения со всеми остальными, мы оценили вклад каждой из исследованных зон коры в организацию пространственной структуры биопотенциального поля мозга при восприятии на слух и чтении текстов. По результатам дисперсионного многофакторного анализа выявлено влияние фактора «Возраст» на процесс становления целостной деятельности мозга у детей и подростков 9-11, 12-14 и 15-17 лет (**Рисунки 3**). Оказалось, что по этому показателю в 13 из исследованных нами корковых зон (6 в левом и 7 в правом полушарии мозга) выявлены статистически значимые различия церебрального обеспечения процесса восприятия текстов по мере взросления (Кручинина с соавт., 2014).

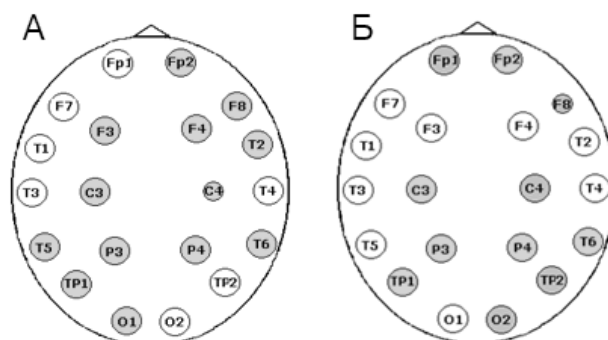


Рисунок 3. Связь фактора «Возраст» с особенностями локализации изменений биоэлектрической активности мозга при восприятии на слух (А) и чтении (Б) текста детьми и подростками (9-17 лет) по данным многофакторного дисперсионного анализа. Размер кружка соответствует уровню достоверности, маленький – $p < 0.05$; большой – $p < 0.01$.

В отдельной экспериментальной серии при чтении нераспространенных предложений были выявлены достоверные отличия между группами детей 9-11 и 12-14 лет. С возрастом снижается амплитуда вызванных ответов как в ранних сенсорных, так и поздних когнитивных компонентах ССП ЭЭГ (P100, N170, P300, N400, P600) в лобных, височных, теменных и затылочных отведениях ЭЭГ обоих полушарий мозга (Galperina, Kruchinina, 2018).

Существует предположение, что компонент P1 (P100) отражает подавление нерелевантной, а N1 (N170) связан с обработкой сопровождающей релевантной информации (Klimesch et al., 2004). При этом на начальной стадии овладения навыком чтения амплитуда компонента N170 коррелирует со скоростью чтения слов (Maurer et al., 2006), а различия нивелируются по мере завершения формирования технической стороны чтения (Maurer et al., 2011). Однако при чтении на уровне предложения и текста эти различия, вероятно, могут проявляться и в более старшем возрасте (**Рисунок 4**, T_5 , T_6 , O_1 , O_2). Максимум амплитуды компонента N170 наблюдается в затылочно-височных областях, и, вероятно, существует нескольких пространственно разделенных источников, ответственных за его генерацию (Rossion et al., 2003; Deffke, et al., 2007).

От 9-11 к 12-14 годам выявлено также уменьшение амплитуды положительного компонента на интервале 260-350 мс в теменно-височных областях (**Рисунок 4**, P_3 , P_z , P_4 , T_5 , T_6). Описанный компонент напоминает P300, который наиболее исследован с использованием oddball-paradigm (van Dinteren et al., 2014). Амплитуда P300 чувствительна к распределению

ресурсов внимания (Donchin, Coles, 1988), при этом бóльшая амплитуда отражает большее количество внимания (Polich, 2007), в том числе при чтении (Hillman et al., 2012). Наблюдаемое нами снижение амплитуды вызванного ответа у подростков 12-14 лет, по сравнению с детьми 9-11 лет, вероятнее всего свидетельствует о снижении ресурсных затрат на обработку стимула, и, возможно, уменьшении требований к поддержанию внимания, что происходит с возрастом и по мере совершенствования навыка.

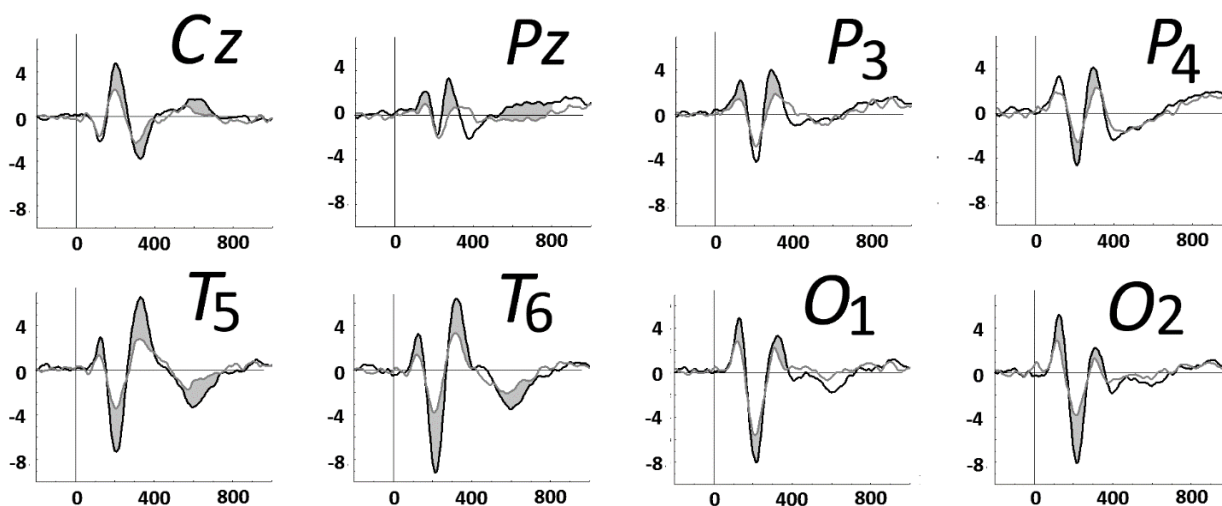


Рисунок 4. Различия ССП при чтении нераспространенных фраз у детей 9-11 (черный цвет) и 12-14 лет (серый цвет). По оси абсцисс – время в мс, по оси ординат – амплитуда вызванного ответа в μV , серым выделены значимые временные интервалы при $p < 0.01$. Вертикальная линия на шкале обозначает начало предъявления стимула.

Нами выявлено также значимое различие амплитуды позднего негативного компонента в задневисочных отведениях обоих полушарий в интервале 500-700 мс после предъявления стимула. Этот компонент напоминает N400 с более поздней латентностью, что согласуется с данными о том, что компонент N400 у детей, имеет большую амплитуду, большую латентность и более широко распространен по сравнению с N400 у взрослых (Holcomb et al., 1992; Nahne et al., 2004; Atchley et al., 2006, McNealy et al., 2009). Компонент N400 выявляется при предъявлении любых лингвистических стимулов независимо от модальности (Holcomb et al., 1992; Kutas, Federmeier, 2011). По-видимому, этот компонент связан с ожиданием продолжения предложения, которое зависит от различной информации, хранящейся в долговременной памяти, например, лексико-семантической структуры языка (Kutas, Federmeier, 2000), знаний об окружающем мире (Kristensen et al., 2004) и прочей контекстной информации. Широкое топографическое распределение компонента N400 предполагает, что его источники также являются распределенными или расположены достаточно глубоко: в верхней и средней височных извилинах, у границы височной и теменной долей, в медиальной височной доле, а также в лобных областях (Halgren, et al., 2002). Для зрительно предъявляемых слов максимум распределения находится в центрально-теменных областях с небольшим сдвигом вправо (Kutas, Hillyard, 1984).

У детей 9-11 и подростков 12-14 лет при чтении предложений выявлена также разница вызванного ответа для позднего позитивного компонента с латентностью 550-800 мс в центральных и теменной областях (**Рисунок 4**). Данный компонент может расцениваться, как компонент P600, который топографически проявляется в центропариетальной области и связан с синтаксическим и семантическим повторным анализом (Friederici, 1997; Canseco-Gonzalez, 2000). Показано, что у детей 6 - 9 лет P600 имеет большую латентность (750 мс - 1500 мс), чем у взрослых (Friederici, Nahne, 2001).

Таким образом, в данной экспериментальной серии возрастные различия были выявлены как в ранних (P100, N170), так и поздних когнитивных компонентах ССП (P300, N400, P600), при этом в задневисочных (T_5 , T_6) билатерально и теменной (P_4) области коры правого полушария мозга отличия амплитуды вызванного ответа проявились при сравнении детей 9-11 и подростков 12-14 лет во всех перечисленных компонентах. Двусторонняя активация задневисочных областей была показана при семантической обработке речи у детей 10 лет (Spironelli et al., 2010). Авторы высказывают предположение, что затылочно-височные области (особенно левого полушария мозга) являются ключевыми для объединения речевых зон лобных и височных областей и области зрительных форм распознавания слов (Spironelli et al., 2010).

Выявленные возрастные особенности изменения биоэлектрической активности мозга при восприятии устных и письменных текстов сопровождаются спецификой перестройки межрегиональных взаимодействий ЭЭГ для каждого вида вербальной деятельности (восприятия текста на слух или чтения) по сравнению с соответствующим фоновым состоянием. Выявлены специфические для каждого задания (восприятие на слух или чтение текстов по сравнению с соответствующим фоном) паттерны изменений структуры пространственного взаимодействия ЭЭГ (**Рисунок 5**). Так, **при восприятии текстов на слух** по сравнению со спокойным бодрствованием с закрытыми глазами увеличивается вклад пространственно-асинхронной (локальной) составляющей в височных областях левого полушария и снижается - в затылочно-теменных областях правого полушария (**Рисунок 5, А**). Такой схожий у детей, подростков и взрослых паттерн активации при восприятии текста согласуется с результатами фМРТ исследований, описывающих довольно схожие кластеры активации в обоих полушариях мозга у детей (8 -11 лет) и взрослых при восприятии устной речи (Dapretto et al., 2005). Специфическая активация верхней височной извилины левого полушария показана методами нейровизуализации (фМРТ) при обработке воспринимаемых на слух речевых стимулов (Michael et al., 2001; Dehaene et al., 2010). Выявленное во всех возрастных группах испытуемых (у детей, подростков и взрослых) усиление вклада пространственно-асинхронной (локальной) составляющей средневисочной (T_3) области левого полушария, вероятно обусловлено тем, что эта область является важным узловым пунктом для восприятия речи (Weiss, Mueller, 2003).

Различные языковые процессы при восприятии речи по-разному затрагивают два полушария мозга. Нами выявлено, что вклад правого полушария при восприятии текста на слух по сравнению со спокойным бодрствованием увеличивается по мере взросления (**Рисунок 5**). Известно, что правое полушарие активно включается в работу всякий раз, когда контекстную и семантическую информацию необходимо интегрировать для интерпретации неоднозначности в речи, особенно на уровне предложения или текста (Bottini et al., 1994; Caplan, Dapretto, 2001; Kircher et al., 2001; Rodd et al., 2005; Dapretto, 2005).

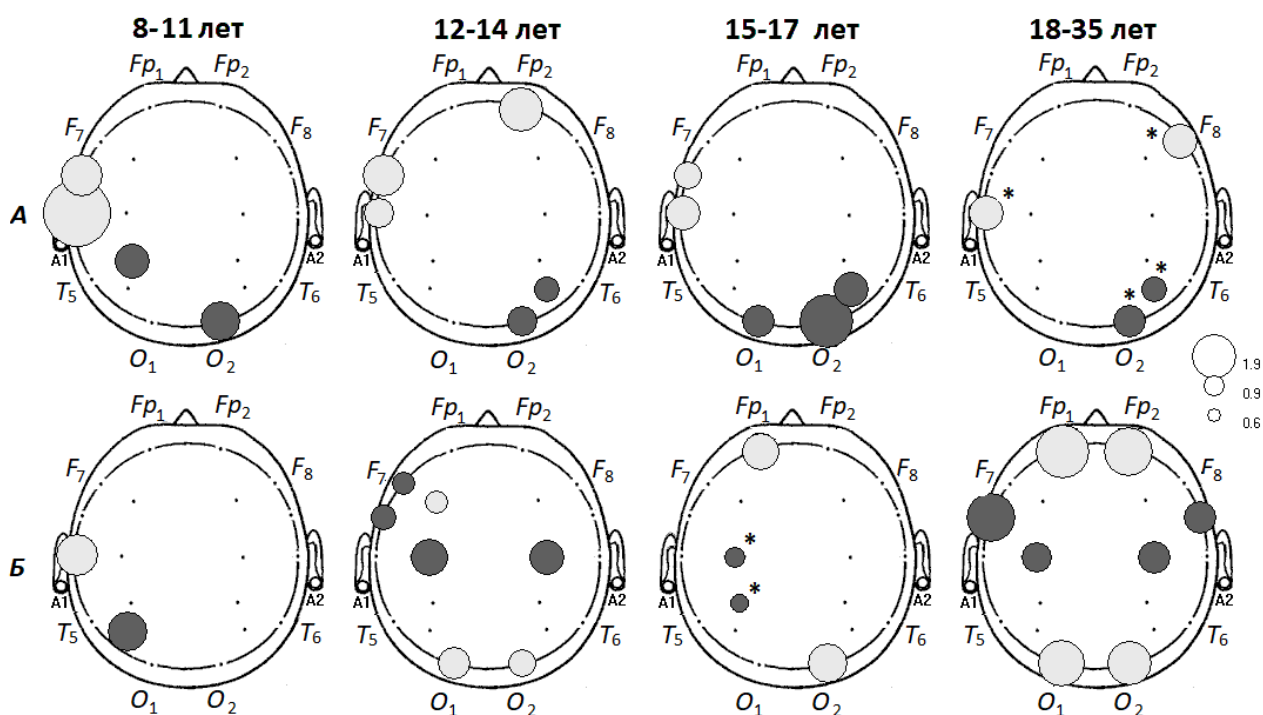


Рисунок 5. Топические особенности пространственных взаимосвязей ЭЭГ у детей, подростков 12-14 и 15-17 лет и взрослых при восприятии на слух текста по сравнению со спокойным бодрствованием с закрытыми глазами (А), при чтении текста по сравнению со спокойным бодрствованием с открытыми глазами (Б) (по показателям вклада зон $V(i)$). Диаметр кружка пропорционален величине критерия Фишера для апостериорных сравнений, серый кружок – увеличение $V(i)$ при деятельности по сравнению с фоном, черный – уменьшение $V(i)$. Уровень значимости различий: * $p < 0.01$, $p < 0.001$.

Кроме того нами показано, что по мере возрастного развития специфический паттерн активации мозга при восприятии текста на слух по сравнению с фоном сохраняется, но степень его выраженности с возрастом падает (**Рисунок 5, А**), что подтверждает ранее высказанную гипотезу о возрастной минимизации функций: у детей в отличие от взрослых при когнитивной деятельности (прослушивание и запоминание стихотворений, корректурные пробы и др.) по сравнению с фоновым состоянием наблюдается повышенная генерализация изменений исходного паттерна межцентральных отношений (Шеповальников, 1991), в частности более высокая общая активация при фонологическом анализе описана у детей, чем у взрослых (Gaillard et al., 2000). Кроме того, у детей по сравнению со взрослыми крупномасштабные нейронные сети (large-scale networks) более диффузны и имеют менее жесткие границы (Thomason et al., 2008; Fair et al., 2009) и, вероятно, при переходе к состояниям, обусловленным внешними воздействиями, в работу вовлекается больше областей, и, следовательно, изменения являются более генерализованными (Szostakiwskyj, 2017). Дети, подростки и взрослые могут использовать очень похожие нейронные сети во время фонологической обработки, но степень активации каждого региона изменяется в процессе развития (McNealy et al., 2009).

При чтении текста по сравнению с фоновым состоянием увеличивается локальная активация лобных и затылочных областей и снижается - центральных зон обоих полушарий, причем по мере возрастного развития специфический паттерн межрегиональных взаимодействий, характеризующий процесс чтения на уровне текста, проявляется все более отчетливо (**Рисунок 5, Б**).

Выявленные различия в степени изменения вклада долей зон при восприятии текстов на слух и при чтении по сравнению с фоном могут быть обусловлены тем, что для чтения показано привлечение более широких нейроанатомических сетей, что отражает более активную обработку и больший набор когнитивных требований, необходимых для чтения, по сравнению с прослушиванием (Berl et al., 2010). Поскольку показано, что сам процесс чтения

и стратегия восприятия текста очень зависят от свойств текста, задачи и ситуации чтения, компетенции читателя (Корнев с соавт., 2019) и пр.

Так называемая «сеть чтения» обычно включает три основных региона: левую затылочно-височную, височно-теменную и нижнелобную области (Norton et al., 2015). Кроме того, при чтении по сравнению со спокойным бодрствованием описана активация затылочных и задних венстральных височных областей обоих полушарий, а также лобных и теменных областей, как у взрослых, так и у детей (Berl et al., 2010; Bookheimer, 2002; Wilson et al., 2018). В исследованиях на детях показано, что вовлечение гомологичных областей обоих полушарий мозга во время чтения является необходимым условием для повышения производительности в процессе становления навыка (Berl et al., 2010), в нашем исследовании при чтении текстов по сравнению с фоном задействованы гомологичные отведения правого и левого полушария мозга у взрослых (**Рисунок 5, Б**). Активацию правого полушария при чтении текстов часто связывают с чтением более сложных предложений (Michael et al., 2001), извлечением метафорического смысла (Diaz, Erp, 2018), а также с необходимостью анализа контекста для создания связного представления о тексте (George et al., 1999). Вероятно, выявленный нами паттерн активации характерен для процесса чтения текста, а не является отражением степени сформированности навыка, что согласуется с данными о привлечении более широких нейроанатомических путей при чтении по сравнению с прослушиванием (Bookheimer, 2002).

У детей младшей возрастной группы 8-11 лет характер межцентральных взаимодействий при восприятии текста на слух и при чтении по сравнению с фоном имеют сходную структуру, а именно отмечается увеличение вклада височных отделов левого полушария и снижение теменно-височных. Такого сходства в более старших возрастных группах не наблюдается (**Рисунок 5**). Показано, что повышенная активация в левой височно-теменной (temporoparietal) области у детей во время чтения слов и псевдослов отражает повышенную зависимость от фонологического декодирования (Simos et al., 2001, 2002). Допустимо предположить изменение механизма чтения по мере совершенствования этого навыка, в частности, может снижаться опора на фонологический образ прочитанного слова, преимущественно использоваться прямой доступ к хранилищу зрительных образов слов и происходить прямое соотнесение с семантикой. Это предположение согласуется с теорией двух потоков обработки письменной речи (Coltheart, 2005). Кроме того, языковая латерализация в слуховой модальности происходит относительно рано, еще у детей дошкольного возраста, в то время как латерализация лингвистических процессов, участвующих в чтении, развивается медленнее параллельно с обучением чтению (Spironelli et al., 2010).

Можно предположить, что центральные механизмы восприятия устной и письменной речи на начальных этапах овладения чтением (у детей 8-11 лет), взаимосвязаны, что подтверждается сходством паттернов межрегиональных взаимодействий при прослушивании и чтении текста. По мере взросления и совершенствования когнитивных навыков, механизмы, обеспечивающие эти виды вербальной деятельности, становятся все более специфическими, что отражается в увеличении отличий паттернов межрегиональных взаимодействий, характеризующих процессы восприятия текста на слух и зрительно.

В целом, с помощью методов оценки «объемов» рассеяния ЭЭГ векторов в факторном пространстве и методов анализа событийно-связанных потенциалов были показаны изменения биоэлектрической активности мозга в ходе взросления, отражающие становление межрегиональных взаимодействий, функциональной связности, регуляторных процессов, оптимизация ресурсного обеспечения, и совершенствование вербальных навыков.

Помимо возрастных, мы выявили также половые различия биоэлектрической активности мозга при вербальной деятельности как по показателям пространственной синхронизации биопотенциалов мозга, так и по амплитуде вызванного ответа. Мы продемонстрировали различие траекторий развития ПСБП мозга у юношей и девушек при восприятии текстов на протяжении второго детства, подросткового и взрослого возраста (**Рисунок 6**).

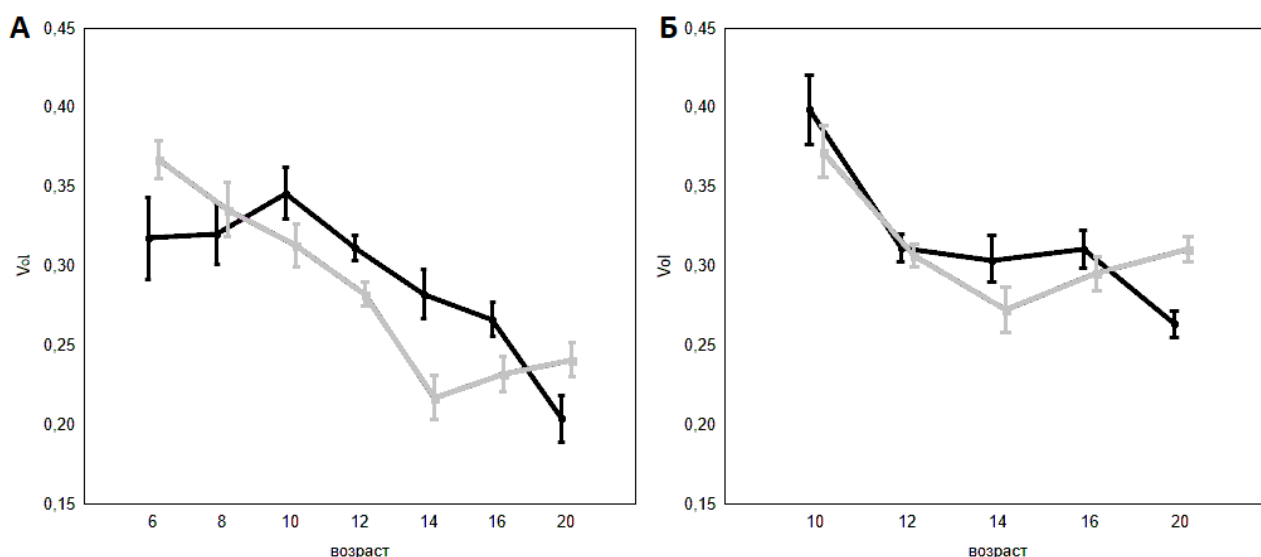


Рисунок 6. Изменения с возрастом уровня пространственной синхронизации ЭЭГ у испытуемых мужского и женского пола при восприятии на слух (А) и при чтении (Б) текста. По оси абсцисс обозначены возрастные группы (данные у детей представлены с шагом в 2 года, взрослые испытуемые от 18 лет объединены в одну группу), по оси ординат – показатель уровня пространственной синхронизации ЭЭГ, рассчитанный по «объемам рассеяния» векторов ЭЭГ, в относительных единицах. черная линия – мальчики и мужчины ($n = 69$), серая линия – девочки и женщины ($n = 88$). Вертикальные отрезки – 95% доверительные интервалы для ошибки среднего.

Однозначного мнения относительно наличия/отсутствия половых отличий функциональной связности мозга, как в фоновом состоянии, так и при деятельности, не существует, а имеющиеся данные зачастую противоречивы (Etchell et al., 2018). Так, фМРТ исследования функциональной связности сетей мозга в состоянии покоя, в том числе тех, которые активируются при вербальной деятельности, не показали половых отличий ни у детей (от 7 лет), ни у взрослых (Sole-Padulles et al., 2016, Nielsen et al., 2013). В то же время некоторые ЭЭГ исследования выявили половые различия в областях мозга, традиционно связываемых с реализацией вербальной деятельности (Hanlon et al., 1999; Hirstein, 2019).

В нашем исследовании значимые половые отличия проявились только при деятельности (**Рисунок 6**), но не в состоянии спокойного бодрствования (**Рисунок 1**). Нами показано, что динамика процесса формирования межцентрального взаимодействия отличается у лиц мужского и женского пола, при этом критическим периодом для проявления отличий является подростковый возраст. Различия в темпах возрастных изменений пространственной организации системной деятельности мозга при восприятии устной и письменной речи показаны на **Рисунке 6**. В нашем исследовании, охватывающем широкий возрастной диапазон, показано, что половые отличия изменения уровня ПСБП начинают проявляться в подростковом возрасте. Наши предыдущие исследования показали, что у девочек в период от 8 до 14 лет при выполнении заданий на прослушивание текстов на русском и английском языках наблюдается постепенное и плавное изменение показателя «объема рассеяния» ЭЭГ-векторов, в то время как у мальчиков данный показатель сохраняется примерно на одном уровне с 6 до 12 лет, а затем происходит его резкое, скачкообразное, изменение к 14-ти годам (Кручинина с соавт., 2014). Результаты согласуются с данными нейроморфологических исследований, показывающих, что по объему серого и белого вещества девочки в среднем на 1.5-2 года созревают быстрее, чем мальчики (Lenroot, Giedd, 2006; Perrin et al., 2008; Tiemeier et al., 2010; Giedd et al., 2015). Перестройки ЭЭГ пубертатного периода, коррелирующие с процессом полового созревания и связанные с эндокринными сдвигами в организме, приходится на разный календарный возраст: на 12–13 лет у девушек и 13–14 лет у юношей (Развитие мозга и формирование ..., 2009). Основные этапы перестройки амплитудно-частотных характеристик ЭЭГ у девочек происходят раньше, чем у мальчиков. При этом формирование структуры ритмического паттерна ЭЭГ и у мальчиков, и у девочек происходит до начала пубертатного периода и эндокринных перестроек организма, тогда как стабилизация

паттерна ЭЭГ в различных корковых зонах продолжается весь подростковый период (Сороко с соавт., 2015; Нагорнова с соавт., 2018). Данные различия могут быть связаны как со структурными, так и с функциональными особенностями развития мозга у мальчиков и девочек. Это также согласуется с данными о более раннем формировании у девушек-подростков многих психосоматических функций (Давыдова с соавт., 1999; Горбачевская с соавт., 2010) и развитии управляющих систем мозга (Мачинская, 2015). Перестройка психофизиологических процессов в пубертатный период у девушек происходит более плавно, чем у юношей (Perrin et al., 2008).

Динамика становления с возрастом пространственной синхронизации биоэлектрических потенциалов мозга при восприятии устной и письменной речи различается у мужчин и женщин (**Рисунок 2**). У женщин происходит постепенное увеличение уровня ПСБП от детского к подростковому возрасту 15-17 лет, с небольшим последующим его снижением у взрослых. У мужчин возрастная динамика изменения уровня ПСБП различается для состояний с открытыми и закрытыми глазами: в состояниях с закрытыми глазами уровень ПСБП мозга постепенно увеличивается; в состояниях с открытыми глазами - нарастает от детского к подростковому возрасту, не изменяется на протяжении подросткового возраста, а затем опять увеличивается у взрослых. Таким образом, половые отличия выявляются, начиная с подросткового возраста, а сам подростковый возраст является определяющим для формирования половых отличий.

Для выявления зон интереса, в которых половые отличия наиболее ярко выражены в подростковом периоде, мы сопоставили результаты топографического распределения ПСБП долей зон коры при восприятии устных и письменных текстов (**Рисунок 7**) и ССП при чтении предложений (**Рисунок 8**). Отличия по результатам дисперсионного многофакторного анализа, оценивающего влияние пола испытуемых на показатель $V(i)$, характеризующий степень тесноты связей одного отведения со всеми остальными, были выявлены в теменной области и зоне перекрытия височной, теменной и затылочных областей (ТРО) правого полушария и задневисочных областях обоих полушарий (**Рисунок 7**).

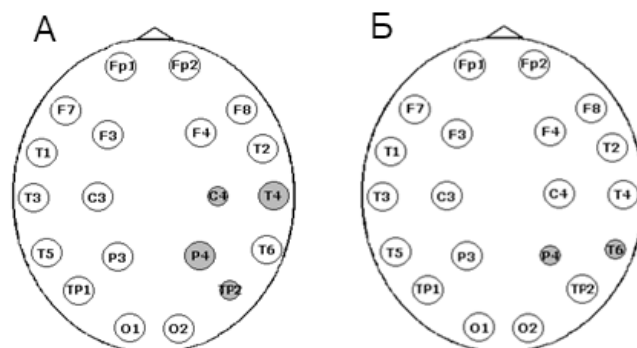
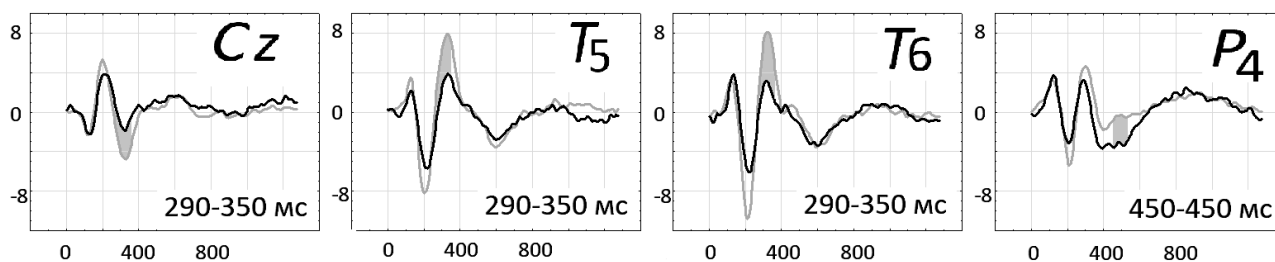


Рисунок 7. Связь фактора «Пол» с особенностями локализации изменений биоэлектрической активности мозга при восприятии на слух (А) и чтении (Б) текста детьми и подростками (9-17 лет) по данным многофакторного дисперсионного анализа. Размер кружка соответствует уровню достоверности, маленький – $p < 0.05$; большой – $p < 0.01$.

При чтении нераспространенной фразы (ССП ЭЭГ исследование) нами также выявлены половые отличия у детей как в младшей (9-11 лет), так и в старшей (12-14 лет) группах (**Рисунок 8**). Различия амплитуды ответа вызванного потенциала наиболее ярко проявляются в задневисочной и теменной областях правого полушария на интервалах 300-380 и 450-550 мс после предъявления стимула (P300, N400). А амплитуда вызванного ответа была больше у девочек, чем у мальчиков в младшей группе, и наоборот – у мальчиков больше, чем у девочек в группе подростков. Ранее показано, что процессы семантической обработки речи отличаются у женщин и мужчин, что отражается в отличиях компонентов P300 (Jaušovec, Jaušovec, 2009) и N400 (Daltrozzo et al., 2007, Wirth et al., 2007). Кроме того, поздний компонент N350 связывают с фонологической обработкой речи (Bentin et al., 1999) и показывают

достоверные половые отличия при чтении слов как у детей 10 лет (Spironelli et al., 2010), так и у взрослых (Shaywitz et al., 1995, Jaušovec, Jaušovec, 2009).

9-11 лет



12-14 лет

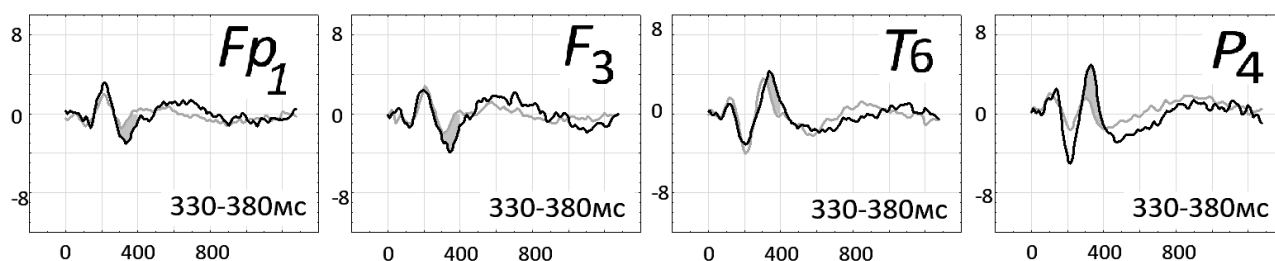


Рисунок 8. Половые различия ССП при чтении нераспространенной фразы детьми 9-11 и 12-14 лет (мальчики – черный цвет, девочки – серый). По оси абсцисс – время в мс, по оси ординат – амплитуда вызванного ответа в μV , серым выделены значимые временные интервалы при $p < 0.001$. Вертикальная линия обозначает начало предъявления стимула.

Таким образом, в различных экспериментальных сериях были описаны половые отличия при восприятии речи в задневисочной области левого полушария и височно-теменных областях правого. Burman с соавт. (2013) показали, различия в траектории развития функциональной связности задневисочной области левого полушария у мальчиков и девочек 8-15 лет при чтении слов. Показаны половые различия активации левой веретенообразной извилины при чтении слов у взрослых (Chen et al., 2007; Dong et al., 2008), а также у детей (Burman, et al., 2008). В правой нижнетеменной и задневисочной областях обнаружены морфологические отличия в толщине коры у мужчин и женщин (от 7 до 87 лет). Эти половые особенности не зависят от роста и размеров мозга, проявляются в позднем детстве и регистрируются на протяжении всей жизни (Sowell et al., 2007). Существуют данные, описывающие половые различия в организации деятельности правого и левого полушария мозга у мужчин и женщин (Nagmann et al., 2006; Catani et al., 2007; Satterthwaite et al., 2015). Функциональные связи у мужчин более локальные, обособленные (Tuan et al., 2017), больше выражены внутрислоушарные взаимодействия, а у женщин – межполушарные (Ingalhalikar et al., 2014; Tuan et al., 2017). Можно предположить, что данные особенности отражаются в пространственной организации мозга при вербальной деятельности. При различных видах вербальной деятельности функциональная активность мозга у мужчин более латерализована, чем у женщин, для которых более характерно вовлечение в деятельность примерно в равной мере как левого, так и правого полушария мозга (Разумникова, 2004; Горбачевская с соавт., 2010; Панасевич, Цицерошин, 2015). Вклад задневисочной области левого полушария и височно-теменных областей правого в восприятие устной и письменной речи на уровне фразы и текста различается у мальчиков и девочек, и это наиболее ярко проявляется в подростковом возрасте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе развития ребенка структурные и функциональные изменения мозга сочетаются с процессами становления и совершенствования вербальных навыков, при этом

дефинитивный возраст их формирования для устной и письменной речи отличается, кроме того, на эти процессы оказывают влияние половые особенности и темповые характеристики предподросткового и подросткового возраста (Мозговые механизмы формирования ..., 2014; Grigorev et al., 2018.).

В работе описаны возрастные и половые особенности биоэлектрической активности коры головного мозга у детей, подростков и взрослых в состоянии спокойного бодрствования, а также при восприятии устных и письменных текстов и фраз, как с использованием метода оценки «объемов рассеяния» ЭЭГ векторов в факторном пространстве, характеризующего пространственную организацию ЭЭГ, так и с помощью анализа событийно-связанных потенциалов, описывающих временную последовательность изучаемых событий.

Показано, что по мере возрастного развития происходит постепенное увеличение уровня пространственной синхронизации биопотенциалов мозга. Это наблюдается как в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми и открытыми глазами, так и при изучаемых видах вербальной деятельности. Уровень пространственной синхронизации биоэлектрической активности мозга при выполнении вербальных заданий ниже, чем в состоянии спокойного бодрствования во всех возрастных группах (4-6 лет, 8-11 лет, 12-14 лет, 15-17 лет и у взрослых). Кроме того, при чтении нераспространенных предложений выявлены достоверные отличия между детьми 9-11 лет и подростками 12-14 лет. С возрастом снижается амплитуда, но не латентность вызванных ответов как в ранних, так и поздних когнитивных компонентах ССП ЭЭГ (P100, N170, P300, N400, P600) в фронтальных, височных, теменных и затылочных отведениях ЭЭГ обоих полушарий мозга.

Делается предположение, что центральные механизмы восприятия устной и письменной речи на начальных этапах овладения чтением (у детей 8-11 лет), в значительной степени взаимосвязаны, что подтверждается сходством паттернов межрегиональных взаимодействий при восприятии текста на слух и чтении. Впервые показано, что по мере взросления и совершенствования навыков, механизмы, обеспечивающие эти виды вербальной деятельности, становятся все более специфичными, что отражается в увеличении отличий паттернов межрегиональных взаимодействий, характеризующих процессы восприятия текста на слух и чтении. Так, при восприятии текстов на слух по сравнению со спокойным бодрствованием с закрытыми глазами увеличивается вклад пространственно-асинхронной (локальной) составляющей в височных областях левого полушария и снижается - в затылочно-теменных областях правого полушария. При чтении текста по сравнению с фоновым состоянием увеличивается локальная активация лобных и затылочных областей и снижается - центральных зон обоих полушарий.

Половые особенности пространственной синхронизации биопотенциалов мозга более выражены при восприятии устной и письменной речи, чем в состоянии покоя. Впервые на возрастном контингенте от 8 до 35 лет описана динамика становления с возрастом пространственной синхронизации биопотенциалов мозга при восприятии устной и письменной речи у испытуемых мужского и женского пола. У женщин возрастная динамика изменения уровня ПСБП мозга сходна для чтения и восприятия текста на слух, а у мужчин – специфична по отношению в виду вербальной деятельности. У женщин происходит постепенное увеличение уровня ПСБП мозга от детского к подростковому возрасту 15-17 лет и далее существенно не изменяется. У мужчин при восприятии текста на слух уровень ПСБП мозга постепенно нарастает с возрастом, а при чтении текста – увеличивается от детского к подростковому возрасту, стабилен на протяжении подросткового возраста, и увеличивается ко взрослому возрасту.

В подростковом возрасте, критическом для развития ребенка, происходит совершенствование когнитивных функций, касающихся анализа сложных взаимоотношений речевых сигналов высокого порядка - на уровне фразы и текста. С использованием методов ССП/ЭЭГ и ПСБП мозга показано, что изменения, происходящие в этот период, затрагивают ассоциативные зоны коры задневисочных, лобных и теменных отделов. При этом происходит

изменение вклада билатеральных задневисочных и теменных областей правого полушария мозга в зависимости от пола испытуемых.

ВЫВОДЫ

1. По мере возрастного развития происходит постепенное увеличение уровня пространственной синхронизации биоэлектрической активности мозга. Это наблюдается как в состоянии спокойного бодрствования с закрытыми и открытыми глазами, так и при восприятии текстов на слух и чтении. Уровень пространственной синхронизации биоэлектрической активности мозга при выполнении вербальных заданий ниже, чем в состоянии спокойного бодрствования во всех возрастных группах (4-6 лет, 8-11 лет, 12-14 лет, 15-17 лет, взрослые).
2. Центральные механизмы восприятия устной и письменной речи на начальных этапах овладения чтением (у детей 8-11 лет), по-видимому, сильно взаимосвязаны, что подтверждается сходством паттернов межрегиональных взаимодействий при прослушивании и чтении текстов. По мере взросления и совершенствования навыков, механизмы, обеспечивающие эти виды вербальной деятельности, становятся все более специфичными, что отражается в увеличении отличий паттернов межрегиональных взаимодействий, характеризующих процессы восприятия текста на слух и при чтении.
3. Половые особенности пространственной синхронизации биоэлектрической активности мозга более выражены при обоих видах вербальной деятельности, чем в состоянии спокойного бодрствования.
4. У мужчин выявлена различная динамика становления ПСБП при восприятии устных и письменных текстов. При восприятии текста на слух уровень ПСБП мозга постепенно нарастает вплоть до взрослого возраста, а при чтении - нарастает от детского к подростковому возрасту, не изменяется на протяжении подросткового возраста, а затем опять увеличивается у взрослых. У женщин динамика становления ПСБП при восприятии устных и письменных текстов схожа, увеличение уровня ПСБП мозга происходит до подросткового возраста (15-17 лет).
5. При чтении фраз выявлено снижение амплитуды, но не латентности вызванных ответов как в ранних сенсорных, так и поздних когнитивных компонентах ССП ЭЭГ (P100, N170, P300, N400, P600) в фронтальных, височных, теменных и затылочных отведениях ЭЭГ от предподросткового к подростковому возрасту.
6. Становление вербальных функций высокого порядка, касающихся анализа сложных взаимоотношений речевых сигналов на уровне фразы и текста, охватывает подростковый период развития и выражается в изменении связанных с событиями потенциалов и пространственной синхронизации биоэлектрической активности мозга задневисочных, лобных и теменных отделов обоих полушарий мозга.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ

1. **Кручинина О.В.**, Гальперина Е.И., Кац Е.Э., Шеповальников А.Н. О факторах, влияющих на вариативность центрального обеспечения билингвизма // Физиология человека. 2012. Т. 38. № 6. С. 15–31.
2. **Кручинина О.В.**, Гальперина Е.И., Шеповальников А.Н. Особенности пространственной организации колебаний биоэлектрической активности мозга у подростков // Физиология человека. 2014. Т. 40. № 5. С. 14.
3. Гальперина Е.И., **Кручинина О.В.**, Рожков В.П. Общее и индивидуальное в организации пространственных взаимосвязей корковых процессов у подростков при вербально-мнестической деятельности // Сенсорные системы. 2014. Т. 28. № 3. С. 16-27.
4. Гальперина Е.И., **Кручинина О.В.**, Рожков В.П. Пространственная синхронизация биоэлектрической активности мозга отличается у юношей и девушек 12–13 лет при чтении повествовательных текстов // Физиология человека. 2018. Т. 44. № 2. С. 31.

5. **Кручинина О.В.**, Станкова Е.П., Гальперина Е.И. Возрастные особенности пространственно-временной организации ЭЭГ у испытуемых 8- 30 лет мужского и женского пола при восприятии устных и письменных текстов // Физиология человека. 2020. Т. 46. № 3. С. 1–15.
6. Станкова Е.П., **Кручинина О.В.**, Шеповальников А.Н., Гальперина Е.И. Эволюция центральных механизмов устной речи // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 2020. Т. 56. № 3. С. 3–16.
- Публикации в других печатных изданиях, среди которых:**
7. Galperina E., **Kruchinina O.**, Rozhkov V. Individual and common in EEG spatial patterns during different cognitive tasks in adolescent // International Journal of Psychophysiology. 2016. V.108. P. 96
8. **Кручинина О.В.**, Гальперина Е.И. Пространственно-временная организация ЭЭГ у подростков 12-13 и 15-17 лет при чтении текстов // Новые исследования. 2018. № 3. С. 5.
9. Galperina E.I., **Kruchinina O.V.** Age difference in brain regions functional connectivity during reading Russian and English texts in boys and girls 12-17 y.o. // International Journal of Psychophysiology. 2018. V. 131. S. P. S79.
10. Galperina E.I., Shemyakina N.V., Nagornova Zh.V., **Kruchinina O.V.**, Kornev A.N. ERP data on reading words and sentences in typically developing children of different ages (9-10 and 12-13 years old) // International Journal of Psychophysiology. 2018. V. 131. S. P. S50.
11. Guillemard (Tsaparina) D. M., Tsitseroshin M. N., Shepovalnikov A. N., Galperina E. I., Panasevich E. A., Kats E. E., Zaytseva L. G., **Kruchinina O. V.** Ontogenetic development of Neurophysiological Mechanisms Underlying Language Processing // in Evolutionary Physiology and Biochemistry – Advances and Perspectives. City. 2018. P. 75-90.
12. **Kruchinina O.V.**, Galperina E.I. Age and sex difference in brain regions functional connectivity during reading Russian and English texts in adolescents // Proceedings of the Fourth St. Petersburg Winter Workshop on Experimental Studies of Speech and Language (Night Whites 2018). St-Petersburg. Russia. 2018 P. 50.
13. **Кручинина О.В.** Особенности пространственно-временной организации биопотенциалов мозга при чтении текстов у детей и взрослых / Материалы конференции Актуальные проблемы биомедицины. Санкт-Петербург. Россия. 2018. С. 143-144.
14. **Kruchinina O.V.**, Galperina E.I. Impact of modality (visual or auditory) on neurophysiological bases for text processing in adolescents. // Proceedings of the 2nd International Workshop «Neurobiology of Speech and Language». St-Petersburg. Russia. 2018. P 45.
15. Galperina E.I., Shemyakina N.V., Nagornova Zh.V., **Kruchinina O.V.**, Kornev A.N. ERP components related to words and sentences reading are changed in early adolescence // Proceedings of the 2nd International Workshop «Neurobiology of Speech and Language». St-Petersburg. Russia. 2018. P 64.
16. **Кручинина О.В.**, Толкачева Д. С., Гальперина Е.И. Влияние модальности предъявляемого текста на структуру пространственной взаимосвязи биопотенциалов мозга у подростков 12-13 лет // Материалы III международной научной конференции «Современные проблемы нейробиологии», посвященная памяти заслуженного деятеля науки РФ, профессора Шилкина В. В. Ярославль. Россия. 2018. С. 37-38.
17. Станкова Е.П., Гальперина Е.И., **Кручинина О.В.**, Толкачева Д.С. Возрастные особенности пространственной организации фоновой биоэлектрической активности мозга // Материалы Всероссийской молодежной конференции с международным участием «Современные аспекты интегративной физиологии». Санкт-Петербург. Россия. 2018. С. 100-101.
18. **Кручинина О.В.**, Станкова Е.П., Толкачева Д.С., Гальперина Е.И. Пространственно-временная организация ЭЭГ у подростков при восприятии слуховой и зрительной вербальной информации // Материалы Всероссийской молодежной конференции с международным участием «Современные аспекты интегративной физиологии». Санкт-Петербург. Россия. 2018. С. 61-62.

19. Гальперина Е.И., Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В., **Кручинина О.В.**, Корнев А.Н. Возрастные изменения центральных механизмов чтения у детей 9-10 и 12-14 лет. ССП-исследование // Материалы VI Всероссийской научно-практической конференции с международным участием Клиническая нейрофизиология и нейрореабилитация. Санкт-Петербург. Россия. 2018. С. 57-58.
20. **Кручинина О.В.**, Станкова Е.П., Толкачева Д.С., Гальперина Е.И. Пространственно-временная организация ЭЭГ у подростков от 10 до 17 лет при восприятии текстов на слух // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Интегративная физиология», посвящённая 170-летию со дня рождения И.П. Павлова. Санкт-Петербург. Россия. 2019. С. 135-137.
21. Гальперина Е.И., Шемякина Н.В., Нагорнова Ж.В., **Кручинина О.В.**, Корнев А.Н. Церебральные механизмы чтения фраз в норме и при дислексии: ЭЭГ-исследование детей 9-13 лет. // Материалы IX Всероссийской (с международным участием) научной конференции «Центральные механизмы речи», посвященная памяти проф. Н.Н. Трауготт. Санкт-Петербург. Россия. 2019. С. 28.
22. **Кручинина О.В.**, Гальперина Е.И. Возрастные и половые особенности пространственно-временной организации ЭЭГ у испытуемых 8-35 лет при восприятии текстов на слух // Материалы IX Всероссийской (с международным участием) научной конференции «Центральные механизмы речи», посвященная памяти проф. Н.Н. Трауготт. Санкт-Петербург. Россия. 2019. С. 55.
23. Толкачева Д.С., **Кручинина О.В.**, Станкова Е.П., Гальперина Е.И. Особенности спектральных характеристик ЭЭГ у детей, подростков и взрослых при восприятии устных текстов // Материалы IX Всероссийской (с международным участием) научной конференции «Центральные механизмы речи», посвященная памяти проф. Н.Н. Трауготт. Санкт-Петербург. Россия. 2019. С. 83.
24. **Kruchinina O.V.**, Galperina E.I., Stankova E.P. Functional connectivity during written text processing in adolescents and young adults: EEG study. // Proceedings of the 3rd International Conference Neurobiology of Speech and Language. St-Petersburg. Russia. 2019. P. 61-62.
25. Galperina E.I., Shemyakina N.V., Nagornova Zh.N., **Kruchinina O.V.**, Kornev A.N. Sentence processing in dyslexics and typically developed 9-14 years old children. // Proceedings of the 3rd International Conference Neurobiology of Speech and Language. St-Petersburg. Russia. 2019. P. 26-27.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ПСБП – пространственная синхронизация биопотенциалов мозга;

ССП ЭЭГ (ERP) – событийно связанные потенциалы ЭЭГ;

фМРТ (fMRT) – Функциональная магнитно-резонансная томография;

ЭЭГ – электроэнцефалограмма;

$V(i)$ – «доля объема» пучка векторов, приходящаяся на i -й вектор (где i – порядковый номер отведения), показатель характеризует степень отличия i -го ЭЭГ-сигнала от совокупности остальных: чем больше $V(i)$, тем больше отличие;

VOL – volume («объем» занимаемый пучком ЭЭГ-векторов в пространстве, показатель линейной зависимости ЭЭГ-сигналов от всех отведений, выступает качестве меры ПСБП).