

УРОВЕНЬ ПОНИМАНИЯ ПАССИВНОГО ЗАЛОГА РУССКОЯЗЫЧНЫМИ ДЕТЬМИ 4–5 ЛЕТ ОТРАЖАЕТСЯ В ХАРАКТЕРИСТИКАХ ВЫЗВАННОГО ОТВЕТА МОЗГА

© 2022 г. О. В. Кручинина¹, Е. П. Станкова¹, Д. М. Гийемар¹, Е. И. Гальперина^{1,*}

¹Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: galperina-e@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.12.2021 г.

После доработки 12.01.2022 г.

Принята к публикации 17.01.2022 г.

Усвоение пассивного залога и определение тематических ролей в предложении является ключевым в понимании логико-грамматических конструкций. В русском языке одна и та же семантическая ситуация может быть выражена различными грамматическими средствами, овладение которыми продолжается на протяжении дошкольного возраста и зависит от частоты их использования в языке. Мозговые механизмы восприятия пассивного залога у детей 4–5 лет описаны фрагментарно. В нашем исследовании 46 детей 4–5 лет с нормальным речевым развитием и 26 взрослых выполняли задание на соотносении прослушиваемых трехсловных предложений в активном и пассивном залоге с изображениями при одновременной регистрации ЭЭГ. По результатам корректного определения тематических ролей в предложениях с пассивным залогом с прямым порядком слов были сформированы две подгруппы детей: с высоким (>80% правильных ответов, $n = 17$) и низким (<60%, $n = 19$) уровнем понимания. В выделенных подгруппах детей выявлены отличия по характеристикам связанных с событиями потенциалов (ССП) при восприятии третьего слова в предложении (второго существительного – noun phrase, NP2), а также по показателям слухоречевой памяти и сформированности фонематического и лексико-грамматического компонентов речевой системы. По фронто-центральному, а также височно-теменным зонам интереса левого и правого полушарий мозга рассчитывали СПП для каждого слова в предложении. Показана мозговая чувствительность к грамматическим маркерам залога, таким как флексии существительного как у взрослых, так и у детей, которая выражалась в большей амплитуде вызванного ответа на предложения в пассивном залоге, чем в активном. У взрослых и детей с высоким уровнем понимания пассивного залога данная чувствительность была обнаружена во всех исследованных зонах интереса, а у детей с низким уровнем понимания отличия не проявились в височно-теменных областях левого полушария. У детей с высоким уровнем понимания наблюдалась позитивность на 200–600 мс, которая начиналась во фронто-центральных областях, захватывая височно-теменные области обоих полушарий, а у детей с низким уровнем – достоверных отличий было существенно меньше. По всей видимости, чувствительность фронто-центральных и височно-теменных областей коры обоих полушарий, особенно левого, к грамматическим маркерам залога обеспечивает эффективное понимание сложных грамматических конструкций у детей уже в 4–5 лет.

Ключевые слова: СПП, дети, пассивный залог, тематические роли, фронто-центральная позитивность, NP2

DOI: 10.31857/S004445292202005X

Одним из ключевых аспектов понимания речи является анализ тематических ролей в предложении, т.е. понимания того, кто, что и с кем сделал. Одна и та же семантическая ситуация может быть выражена в русском языке с использованием различных грамматических инструментов (активный или пассивный залог с использованием соответствующих предложно-падежных конструкций), овладение которыми продолжается на протяжении дошкольного возраста и зависит от их частотности в языке. Грамматические конструкции типа “noun phrase 1 – verb – noun phrase 2” (NP1-V-NP2) для

русского языка наиболее частотны в активном залоге” Субъект (существительное в И.п.) – действие (глагол) – объект (сущ. в В.п.), например, “Внук обнял деда”, а менее частотны – в пассивном залоге – Субъект (сущ. в И.п.) – действие (краткое причастие) – объект (сущ. в Тв.п.), например, “Внук обнят дедом”. Возраст освоения пассивного залога сильно различается для разных языков, поскольку частота встречаемости таких конструкций определяет возраст их усвоения [1–6]. Показано, что в русском языке пассивные конструкции уже используются некоторыми детьми в возрасте 4–5 лет

[7, 8]. При определении тематических ролей опора может осуществляться на разные признаки. Так, в возрасте 2–3 лет дети преимущественно опираются на семантику, а не на синтаксические маркеры [9]. Если семантические подсказки в предложении отсутствуют и ситуация семантически обратима (например, “Внук обнял деда” и “Дед обнял внука” в сравнении с “Дед выпил чай”, но не “Чай выпил деда”), то приходится опираться исключительно на грамматические признаки (окончание существительных и суффикс глагола/причастия) [10]. На примере немецкого языка показано, что уже 3-летние дети могут обнаружить нарушения падежной маркировки канонической структуры предложения [11], но затрудняются в различении объектно-субъектных отношений [12]. Использование падежной маркировки для тематического распределения ролей показано у детей, начиная с 4–5 лет [12–14], но даже у детей 7–8 лет с нормальным речевым развитием могут возникать затруднения, особенно в случае синтаксически сложных, обратимых предложений с пассивным залогом или обратным порядком слов [15–17]. Понимание логико-грамматических конструкций, т.е. корректное определение тематических ролей, наступает раньше, чем собственная продукция пассивного залога [18, 19]. Наши собственные данные показывают, что дети 5–6 лет уже довольно успешны в понимании пассивного залога [20]. Таким образом, путь от начала проявления чувствительности к маркерам залога до эффективного использования морфосинтаксической информации для распределения тематических ролей — долгий путь в развитии ребенка.

Поскольку при анализе предложений возможна опора на разные грамматические и семантические маркеры, это подразумевает возможность существования разных стратегий выделения тематических ролей. Разные стратегии анализа сложных грамматических конструкций, вероятно, обеспечиваются разными нейрофизиологическими механизмами, которые могут влиять на вероятность правильного понимания высказывания [21]. Стратегии зависят от языковой группы, изменяются в онтогенезе ребенка вследствие совершенствования лингвистических навыков, а также в ходе возрастных морфофункциональных изменений мозга ребенка.

Мозговые механизмы понимания предложно-падежных конструкций, кодирующих субъектно-объектные отношения, описаны в основном у взрослых [22–24]. В частности, показаны различия амплитуды негативного компонента ССП в центрально-париетальной области на 450 мс и генерализованной позитивности на 650 мс от начала предъявления стимула в зависимости от интерпретации аргумента глагола, который определяет его значение во фразе [25]. У детей разных возрастов такие механизмы описаны фрагментарно. Прямое сопостав-

ление с пулом данных, полученных на материале английского языка, невозможно, поскольку определение тематических ролей облегчается наличием жесткого порядка слов. На материале немецкого языка показано, что дети от 3 до 6 лет пользуются разными стратегиями и задействуют разные мозговые механизмы при определении тематических ролей. Так, дети 3 лет опираются на семантику и не показывают мозговой чувствительности к маркерам субъектно-объектных отношений, дети 4.5 лет опираются при определении ролей на второе существительное (NP2) в предложении, демонстрируя эффект фронто-центральной позитивности, свидетельствующей о сложностях синтаксической интеграции, а дети 6 лет уже опираются на первое существительное (NP1), показывая эффект негативности, характерный для взрослых [9, 12]. Особенно мало физиологических работ на материале русского языка. Ранее нами у детей 5–6 лет было показано снижение спектра мощности ЭЭГ в альфа1-, бета 2-диапазоне частот в лобных отделах билатерально, увеличение фрактальной размерности ЭЭГ в средневисочных зонах коры билатерально и затылочной области левого полушария при восприятии инвертированных предложений с пассивным залогом по сравнению с активным [20].

Выбор зон интереса для нашего исследования основывается на наиболее часто упоминаемых в связи с анализом всех типов предложений зонах: фронтальной и височно-теменно-затылочной областью слева, а также височной областью коры справа [25–29]. Вышеуказанные области включают как зоны, неспецифически активирующиеся при анализе разных типов вербальной информации, так и специфически активирующиеся при анализе семантики и синтаксиса. Области задней части левой верхней височной извилины и борозды, а также задней части левой средневисочной извилины специфически активируются при анализе синтаксиса [26]. Анализ отношений глагола и его аргумента обеспечивается взаимодействием вышеназванных структур с *pars opercularis* левой нижней лобной извилины [25, 30]. Связь задневисочных областей мозга с вентролатеральной корой обеспечивается проводящими путями, составляющими дорсальный путь обработки речи, в частности, верхним продольным и дугообразными пучками [31].

Для описания особенностей вызванного ответа, отражающего мозговые реакции при выполнении picture-sentence matching task и изменяющегося в зависимости от совершенствования навыка определения тематических ролей в предложениях с пассивным залогом, возникла необходимость разработки стимульного материала, который бы позволил однозначно оценивать с одной стороны — способность ребенка опираться именно на грамматические маркеры, а с другой — мозговую чувствительность к этим компонентам. Поэтому при раз-

работке стимульного материала мы постарались выровнять как лексический материал, так и физические характеристики стимулов (аудиофайлы и изображения) по параметрам, влияющим на характеристики ССП [24].

Мы предполагаем, что уровень понимания пассивного залога у детей 4–5 лет будет отражаться на характеристиках ССП при восприятии предложений в активном и пассивном залоге. Чувствительность к грамматическим маркерам залога будет проявляться только у тех детей, которые успешны в определении тематических ролей в предложениях с пассивным залогом. Гипотеза нашего исследования заключается в том, что выражаться эта чувствительность будет в различиях амплитуды и/или латентности вызванного ответа на восприятие предложений с активным и пассивным залогом с прямым порядком слов. Данные отличия будут соотноситься с грамматическими смысловыми изменениями, которые проявляются на 2-м и 3-м слове (глаголе или причастии – V, и втором существительном – NP2) в предложении. Цель исследования: определить специфические особенности вызванного ответа мозга (топографию, латентности и амплитудные различия) у детей 4–5 лет при восприятии предложений с активным и пассивным залогом в зависимости от уровня сформированности навыка определения тематических ролей в пассивном залоге.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Испытуемые

В исследовании приняли участие 55 детей 4–5 лет (средний возраст 4.9 ± 0.5 , 27 мальчиков), и 26 взрослых группы контроля, у которых уровень владения навыком определения тематических ролей в предложении, независимо от залога и порядка слов, принимался за дефинитивный (средний возраст 22.7 ± 2.5 , 6 мужчин). Критерием включения детей 4–5 лет в группу явилось соответствие их уровня речевого развития возрастной норме. Поэтому 6 детей, у которых было диагностировано общее недоразвитие речи (I–II уровня) ($n = 4$) и фонетико-фонематическое нарушение речи ($n = 2$), были исключены из исследования по результатам психолого-логопедического обследования. Кроме того, данные 3 человек были исключены из дальнейшего анализа ССП в связи с большим количеством артефактов во время регистрации ЭЭГ.

Таким образом, в возрастную группу 4–5 лет вошло 46 испытуемых (20 мальчиков). Все испытуемые были правши (оценено по модифицированному тесту Annett [33]). Родной язык для всех испытуемых был русский. Родители (законные представители) детей представили добровольное письменное информированное согласие, подписанное ими после разъяснения им потенциальных рисков и преиму-

ществ, а также характера предстоящего исследования. Все испытуемые участвовали в исследованиях добровольно. По завершении исследования все дети получали призы, взрослые – денежное вознаграждение. Все исследования проведены в соответствии с принципами биомедицинской этики, сформулированными в Хельсинкской декларации 1964 г. и ее последующих обновлениях, и одобрены Комиссией по этике биомедицинских исследований Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН (протокол 1–07 от 16.07.2019 г.).

Схема исследования

Обследование ребенка проходило в два этапа в два разных дня. На первом этапе проводился сбор анкетных данных и анамнеза ребенка, определение ведущей руки, а также комплексное логопедическое и психологическое обследование (продолжительность не более 40 мин). На следующий этап исследования отбирались дети с показателями речевого и интеллектуального развития, соответствующего возрастной норме. На втором этапе проводилась регистрация ЭЭГ во время выполнения теста на сопоставление предложения и изображения (sentence-picture matching task), 4 серии по 10 мин с 3 перерывами, кроме того, в случае необходимости по требованию ребенка делался дополнительный перерыв.

Взрослые испытуемые группы контроля были из числа студентов, их IQ и другие психологические характеристики не оценивались, т.к. считались достаточными для восприятия предложений в пассивном залоге. Взрослые испытуемые выполняли тест на сопоставление предложения и изображения в свободном режиме с перерывами по желанию.

Этап I: Оценка речевого развития и психологическая диагностика

Логопедическое обследование. Комплексное логопедическое обследование предполагает качественную оценку [33]. Для количественной оценки различных компонентов речевой системы мы использовали соответствующие разделы шкалированной методики Зайцевой, Шептуновой [34]. На основе данной методики был составлен протокол обследования, позволяющий оценить в баллах уровень сформированности у ребенка звуко-слоговой структуры речи, фонематических функций (восприятия, анализа, синтеза и представлений) и лексико-грамматического строя речи. Сформированность фонематического восприятия оценивалась по повторению ребенком за логопедом слогов и слов с акустико-артикуляционно сходными звуками (12 серий слогов, 12 пар слов). Для оценки уровня развития фонематических функций

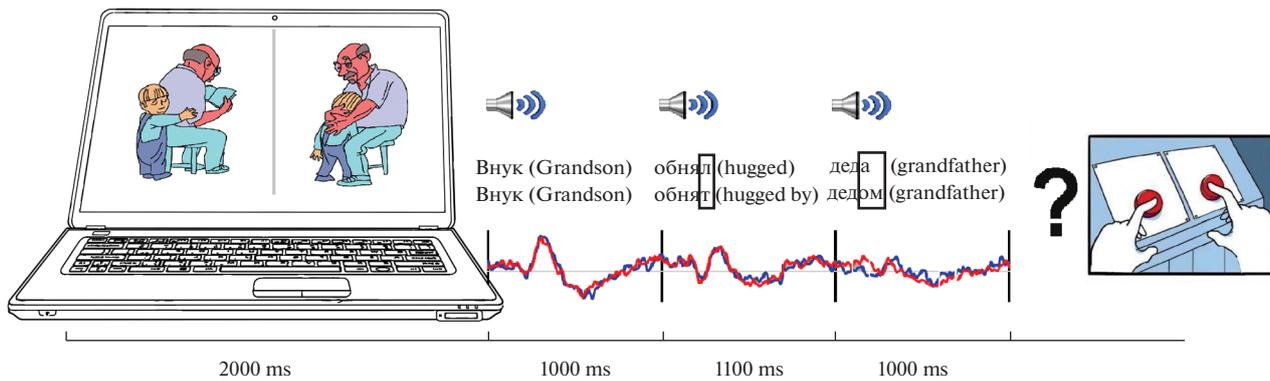


Рис. 1. Структура пробы и временная последовательность событий в тесте на сопоставление предложения и изображения (синий цвет – активный залог, красный – пассивный залог, рамкой выделены морфемы, различающиеся в предложениях с активным и пассивным залогом). Вертикальными линиями обозначен момент начала звучания стимула в пробе.

ребенку предлагалось задание на вычленение заданной фонемы из слова, на называние первой, последней фонемы в слове (по 5 заданий). Исследование лексико-грамматического строя речи включало оценку уровня развития экспрессивной и импрессивной речи: название слов из соответствующих семантических групп, словообразование и словоизменение (6 типов заданий, по 5 в каждом). При анализе данных выполнение всех заданий каждого раздела рассматривали за 100% и вычисляли процент правильно выполненных ребенком заданий, который трактовался как степень сформированности соответствующего компонента речевой системы.

Кроме того, производилась оценка объема оперативной памяти и внимания с использованием субтеста 5 опросника Векслера (повторение цифровых рядов в прямом и обратном порядке).

Психологическая диагностика включала определение уровня невербального интеллекта (Цветные прогрессивные матрицы Равена) [35], а также оценку объема слухо-речевой памяти с помощью субтеста 5 опросника Векслера – повторение цифр в прямом и обратном порядке [36].

Комплексная психолого-педагогическая диагностика проводилась с целью отбора детей, речевое и интеллектуальное развитие которых соответствует возрастной норме.

Этап II: Тест на соотнесение картинки и предложения

Тест на соотнесение картинки и предложения (sentence-picture matching task) предъявлялся с помощью оригинальной программы “Грамконструктор” (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020616013, г. Санкт-Петербург, Россия). В состав теста входят трехсловные предложения 4 типов – в активном залоге с прямым и обратным порядком слов и в пассив-

ном залоге с прямым и обратным порядком слов (всего 268 предложений). Типы стимулов рандомизированы внутри каждого набора предложений. Структура пробы: парные сюжетные изображения – 0–2000 мс, 1-е слово в предложении (существительное) – 2000–3000 мс, 2-е слово (глагол или краткое причастие) – 3000–4100 мс, 3-е слово (существительное) – 4100–5100 мс, знак вопроса, разрешающий моторный ответ, – от 5100 мс (рис. 1).

В настоящем исследовании мы рассматриваем результаты восприятия предложений с прямым порядком слов в активном и пассивном залоге.

Лингвистический, слуховой и зрительный стимульный материал был уравновешен по параметрам, влияющим по данным литературы, на вызванный ответ мозга.

Стимульный материал к тесту

Предложения. Для исследования понимания логико-грамматических конструкций были составлены инверсивные (обратимые) предложения в активном и пассивном залоге с прямым порядком слов. Все предложения были построены по схеме “существительное – глагольная группа (глагол или краткое причастие) – существительное” (NP1–V–NP2). В качестве объекта и субъекта действия были подобраны пары одушевленных существительных, которые были сбалансированы по роду, склонению, количеству слогов и фактору частотности.

Звуковые файлы. Предложения, произнесенные диктором с естественной интонацией и паузацией, были записаны в условиях звукоизолированной анэхоидной камеры объемом 62.5 м³ (5 × 5 × 2.5 м). Ослабление уровня наружных шумов в камере составляло не менее 40 дБ в диапазоне частот 0.5–16 кГц. Для записи применяли конденсаторный микрофон Rode NT-USB с кардиоидной диаграммой направленности и встроенным АЦП (частота дискретизации 44100 Гц, 16 Бит). Микрофон под-

ключали через USB-порт к ПК ASUS Sonic Master со звуковым редактором Adobe Audition 1.5, в котором выполняли запись и последующее редактирование звуковых файлов. Звуковые файлы сохраняли в формате WAV (44 100 Гц, 16 Бит). Длительность звучания слов выровнена отдельно для первых (NP1), вторых (V) и третьих (NP2) слов в предложении, поскольку данные параметры наиболее критичны для нейрофизиологического исследования.

Зрительный стимульный материал. Парные сюжетные картинки, соответствующие отобранным обратимым предложениям, были отрисованы профессиональным художником. Пример изображения приведен на рис. 1. При разработке изображений руководствовались следующими принципами: 1) субъект и объект действия хорошо воспринимаются и различаются, так же, как и само действие. 2) На изображении отсутствуют лишние детали, не имеющие отношения к сюжету. 3) Парные изображения выровнены по цвету. 4) Субъект и объект занимали сопоставимую площадь изображения (разница не более 25%), с целью избежать трактовки более крупного персонажа как субъекта действия. 5) Количество используемых цветов – не больше 4 на каждой паре картинок. 6) Направление действия симметрично на каждой паре картинок.

Процедура исследования

Регистрация ЭЭГ. Как в фоне, так и во время выполнения теста проводилась регистрация монополярной ЭЭГ от 31 электрода, расположенного по системе 10/10, в полосе 0.53–70 Гц, частота дискретизации 250 Гц по каналу, с использованием объединенного ушного электрода в качестве референта, заземляющий электрод располагался на голове испытуемого между электродами FCz и Fz. Для регистрации ЭЭГ использовали 32-канальный электроэнцефалограф (МИЦАР-ЭЭГ-ВП31/8, Санкт-Петербург, Россия). Для регистрации движений глаз и морганий использовали биполярное отведение с расположением электродов в районе височного угла и верхнего края глаза.

Процедура предъявления стимулов. В ходе ЭЭГ-исследования взрослые и дети выполняли тест на соотнесение картинки и предложения (sentence-picture matching task). Временная структура пробы описана выше. На экране ноутбука (17.3") перед испытуемым появлялись парные сюжетные изображения (рис. 1). Затем на фоне изображения в наушники подавалось предложение, которое для анализа ССП имело маркировку начала звучания каждого слова в фразе, при этом для экологичности исследования была сохранена естественная интонация и паузация. По завершении звучания на экране появлялся знак вопроса, после появления которого испытуемый выбирал одну из двух картинок, соответствующую услышанному предложению, и нажимал кнопку на клавиатуре под выбран-

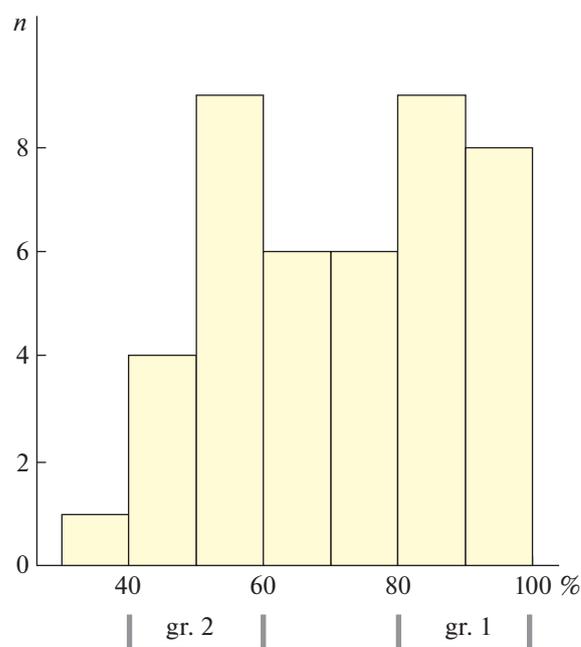


Рис. 2. Результаты выполнения детьми 4–5 лет теста на соотнесение предложений в пассивном залоге с прямым порядком слов и изображений. По оси абсцисс – процент правильных ответов (%), по оси ординат – количество детей (n), gr. 1 – дети с высоким процентом правильных ответов (>80%), $n = 18$, gr. 2 – дети с низким процентом правильных ответов (<60%), $n = 21$.

ным изображением. Продолжительность пробы варьировала, поскольку переход к следующему слайду происходил в режиме self-paced mode, т.е. время на ответ не было ограничено. В течение выполнения теста были предусмотрены 3 перерыва, таким образом, выполнение каждой части занимало не более 10 мин. После выполнения теста рассчитывались среднее время реакции и процент верных ответов для предложений каждого типа.

Анализ данных

Поведенческие данные. По результатам выполнения испытуемым теста на сопоставление предложения и изображения рассчитывали процент правильных ответов и время реакции и проводили апостериорные сравнения с помощью U-критерия Манна–Уитни для каждого типа предложения. Оценив корректность определения детьми тематических ролей в предложениях с пассивным залогом, мы сформировали 2 подгруппы испытуемых: с высоким процентом правильных ответов (>80%) и низким – <60% (рис. 2). Проводились апостериорные сравнения каждого параметра результатов логопедического обследования (уровень развития фонематического восприятия, сформированности фонематических функций, лексико-грамматического строя речи) и психологической диагностики

(показатели слухоречевой памяти, невербального интеллекта) с помощью U-критерия Манна–Уитни, в двух подгруппах детей 4–5 лет. Приведены средние значения показателей и 95%-ный доверительный интервал для среднего. Статистический анализ производили в пакете программ IBM SPSS Statistics версия 26.

Обработка ЭЭГ и расчет связанных с событием потенциалов (ССП) производились в программе “WinEEG” (версия 2.140.113). Для удаления глазодвигательных артефактов и миограммы использовали метод независимых компонент [37]. Фрагменты записи, содержащие другие виды артефактов, удалялись из обработки на основе визуального анализа. Расчет вызванных потенциалов производили от начала предъявления аудиостимула для каждого из 31 отведений (для построения топограмм распределения амплитуды пиков вызванного ответа): для первого слова предложения (0–1000 мс), для второго слова – глагола или причастия (0–1100 мс), для третьего слова – (0–1000 мс).

Для статистического анализа СПП усредняли группы отведений ЭЭГ по зонам интереса, наиболее часто выделяемых при описании восприятия речи. Фронтно-центральная зона – 9 электродов ($F_3, F_4, Fz, FC_3, FC_4, FCz, C_3, C_4, Cz$), по 5 электродов теменно-височных зон правого ($T_8, TP_8, P_8, CP_4, P_4$) и левого полушария ($T_7, TP_7, P_7, CP_3, P_3$). Для каждой группы испытуемых сопоставляли средние амплитуды компонент СПП на каждое слово в предложении на последовательных интервалах с шагом в 100 мс с помощью T-критерия Вилкоксона для связанных выборок. Статистический анализ производили в пакете программ IBM SPSS Statistics версия 26.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Поведенческие данные

Результаты логопедического обследования. Критерием включения детей в группу являлось соответствие уровня речевого развития возрастной норме. По результатам комплексного логопедического обследования 6 детей были исключены из исследования.

Результаты психологической диагностики. По результатам оценки невербального интеллекта все дети (5 детей на момент исследования не достигли возраста 4.5 лет, поэтому ПЦМ Равена с ними не проводились), принимавшие участие в исследовании, продемонстрировали средний и высокий показатели интеллекта для данной возрастной группы 20.2 ± 4.7 балла ($n = 44$), при этом нормативные показатели для данного возраста составляют 14 баллов, разброс в баллах от 8 до 22 [35]. Результаты субтеста 5 опросника Векслера на повторение цифровых рядов в прямом порядке продемонстрировали, что дети 4–5 лет ($n = 49$) удерживают в памяти 4.3 ± 1.2 цифры. Дети повторяют предложения в

активном залоге длиной 7.9 ± 1.9 слова и пассивном – 5 ± 1.5 слова. Данная оценка производилась с тем, чтобы удостовериться, что удержание в памяти предложений из 3 слов, используемых в экспериментальной парадигме, не должно было вызывать у детей данного возраста затруднений.

Результаты выполнения теста на сопоставление предложения и изображения. В группе взрослых испытуемых качество выполнения теста на сопоставление предложения, содержащего активный или пассивный залог, и изображения составляло $99 \pm 3\%$ для каждого типа предложения.

В группе детей качество выполнения теста, оцениваемое по проценту правильных ответов, колебалось – от 40 до 98.5% правильных ответов, поэтому сначала мы проверили влияние фактора “возраст”. Достоверных отличий по проценту правильных ответов в тесте на сопоставление предложения, содержащего активный или пассивный залог, и изображения между детьми 4 и 5 лет выявлено не было. Была построена гистограмма распределения количества правильных ответов при прослушивании предложений с пассивным залогом у детей 4–5 лет. Характер распределения был бимодальный с максимумами на 80 и 60% (рис. 2). Поэтому были сформированы 2 подгруппы детей: с высоким процентом правильных ответов ($>80\%$, $n = 18$) и низким ($<60\%$, $n = 21$). Впоследствии в анализ СПП не были включены данные 3 человек из-за плохого качества записи ЭЭГ. Таким образом, результаты СПП исследования включают 17 детей с высоким и 19 детей с низким процентом правильных ответов. Отличий по времени реакции при определении тематических ролей в предложениях различных типов ни в одной из исследованных подгрупп выявлено не было (табл. 1).

Сопоставление результатов выполнения теста в двух подгруппах детей 4–5 лет с данными их логопедического обследования и психологической диагностики. Несмотря на то что общий уровень речевого развития детей соответствовал возрастной норме, нами были выявлены различия между подгруппами детей по показателям уровня развития фонематических процессов и лексико-грамматического строя речи (табл. 1), вероятно, в силу широких границ возрастной нормы [33]. Значимые различия между подгруппами детей выявлены также по результатам оценки невербального интеллекта (ПЦМ Равена [35]) и оперативной памяти (а именно по повторению цифровых рядов в прямом порядке по методике Векслера [36]), позволяющей оценить объем кратковременной оперативной памяти (табл. 1). Таким образом, хотя все обследованные дети имеют нормативные показатели речевого и интеллектуального развития, однако, можно предположить, что дети с высоким уровнем понимания тематических ролей близки к верхней гра-

Таблица 1. Результаты психологической диагностики, логопедического обследования и выполнения теста на сопоставление предложения и изображения в двух подгруппах детей 4–5 лет

	группа 1 (<i>n</i> = 18)	группа 2 (<i>n</i> = 21)	<i>p</i>
Правильные ответы на предложения в активном залоге (%)	95	62	0.00
Правильные ответы на предложения в пассивном залоге (%)	89	53	0.00
Время принятия решения на предложения в активном залоге (с)	3.4	3.3	0.79
Время принятия решения на предложения в пассивном залоге (с)	4.3	3.7	0.53
Уровень сформированности фонематического восприятия (%)	83.3	67.4	0.01
Уровень сформированности фонематических функций (%)	80.2	54.3	0.01
Уровень сформированности лексико-грамматического строя речи (%)	84.5	68.5	0.01
Показатели невербального интеллекта (в баллах по ЦПМ Равена)	22.5 ± 4.2	18.8 ± 4.7	0.01
Объем слухоречевой памяти (кол-во слов)	4.7 ± 0.7	3.9 ± 1.7	0.05

Примечание. По каждому параметру приводятся либо проценты, либо средние значения и стандартное отклонение по каждой подгруппе детей 4–5 лет, жирным выделены достоверные различия $p < 0.05$.

нице возрастной нормы, тогда как дети с низким уровнем имеют средние и низкие показатели.

Анализ связанных с событием потенциалов

От начала предъявления каждого из слов в предложении производили усреднения ССП по трем зонам интереса (9 отведений для фронто-центральной зоны интереса, по 5 отведений для теменно-височных зон левого и правого полушарий) с шагом 100 мс. При сравнении вызванного ответа на предложения в активном и пассивном залоге статистически значимые отличия как у взрослых, так и в каждой подгруппе детей 4–5 лет были выявлены только на третьем слове (NP2).

В контрольной группе взрослых испытуемых ($n = 26$) во фронто-центральных областях отличия были выявлены во временном окне 100–200 мс ($Z = -2.349$, $p = 0.02$) и 600–700 мс ($Z = -2.527$, $p = 0.01$) от начала предъявления третьего слова в предложении. При этом амплитуда вызванного ответа на предложение в пассивном залоге была выше. В височно-теменных отведениях левого полушария достоверные отличия наблюдались во временном окне 400–700 мс ($Z = -2.248$, $p = 0.02$), в симметричных зонах правого полушария – 300–500 мс ($Z = -2.222$, $p = 0.02$) и 600–700 мс ($Z = -3.289$, $p = 0.000$) (рис. 3а).

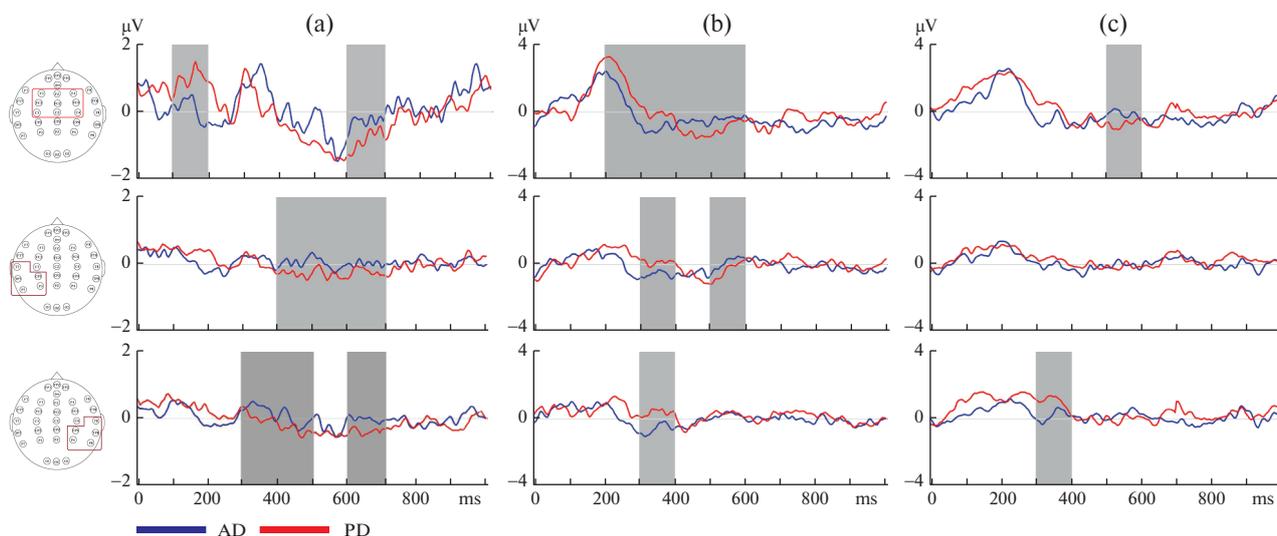


Рис. 3. Средние амплитуды ССП по фронто-центральной и височно-теменной зонам интереса с шагом 100 мс от начала предъявления 3-го слова в предложениях с активным (AD – синий цвет) и пассивным (PD – красный цвет) залогом. (а) – взрослые испытуемые ($n = 26$), (б) – дети с высоким % правильных ответов ($n = 17$), (в) – дети с низким % правильных ответов ($n = 19$). Серым выделены интервалы достоверных отличий средних амплитуд ССП $p < 0.05$.

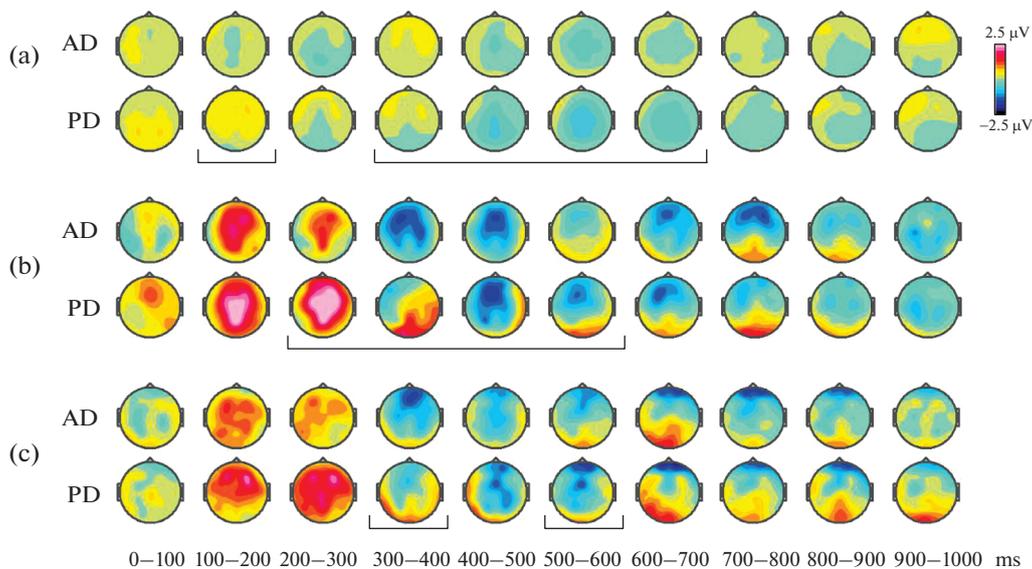


Рис. 4. Топограммы ССП с шагом 100 мс от начала предъявления 3-го слова в предложениях с активным (AD) и пассивным (PD) залогом. (а) – взрослые испытуемые ($n = 26$), (б) – дети с высоким % правильных ответов ($n = 17$), (с) – дети с низким % правильных ответов ($n = 19$). Серыми скобками выделены интервалы достоверных отличий средних амплитуд ССП $p < 0.05$.

В подгруппе детей, показавших высокий процент правильных ответов ($n = 17$), достоверные отличия амплитуды вызванного ответа выявились во фронто-центральных отведениях во временном окне 200–400 мс ($Z = -2.275$, $p = 0.01$) и 400–600 мс ($Z = -1.810$, $p = 0.05$). В теменно-височных зонах интереса левого полушария – во временном окне 300–400 мс ($Z = -2.327$, $p = 0.01$) и 500–600 мс ($Z = -1.913$, $p = 0.03$), а для правого полушария – 300–400 мс ($Z = -2.792$, $p = 0.002$). Амплитуда во всех временных отрезках была выше для предложений с пассивным залогом, причем это соотношение сохраняется с переходом через нулевую отметку во фронто-центральных и теменно-височных областях левого полушария (рис. 3б).

В группе детей с низким процентом правильных ответов ($n = 19$) отличия амплитуды вызванного ответа выявились во временном окне 500–600 мс ($Z = -1.810$, $p = 0.04$) во фронто-центральных отведениях, а также в теменно-височных зонах справа во временном окне 300–400 мс ($Z = -2.069$, $p = 0.02$). Амплитуда во всех временных отрезках также была выше для предложений с пассивным залогом (рис. 3с).

Анализ топограмм ССП при восприятии третьего слова (NP2) в предложениях показал сходную картину пространственного распределения максимума вызванного ответа для активного и пассивного залога как у взрослых, так и в обеих подгруппах детей (рис. 4). Распространенность и амплитуда ССП при восприятии предложений в пассивном залоге выше, чем в активном, как у детей 4–5 лет, так и у взрослых контрольной группы.

У взрослых испытуемых топографические различия ССП, связанные с анализом предложений с активным или пассивным залогом, начинают проявляться сразу после начала предъявления третьего слова предложения и продолжаются до 700 мс (рис. 4а). В группе детей с высоким процентом правильных ответов позитивность как в случае активного, так и пассивного залога, начинает развиваться со 100 мс от начала предъявления третьего слова, однако для активного залога она уже на 300 мс сменяется негативностью, тогда как для пассивного залога это происходит, начиная с 400 мс (рис. 4б), что, вероятно, отражает большую автоматизированность процессов определения тематических ролей в предложениях с активным, чем с пассивным залогом. У детей с низким процентом правильных ответов характер пространственно-временного распределения вызванного ответа имеет сходство с таковым у детей первой подгруппы (рис. 4с). Фронто-центральная позитивность сменяется негативностью на временном отрезке 100–300 мс при восприятии предложений в активном залоге, однако распространенность и амплитуда ответа в данном случае ниже, чем, вероятно, и объясняются более узкие окна достоверных статистических отличий (300–400 и 500–600 мс).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе мы обнаружили у взрослых контрольной группы и детей 4–5 лет отличия вызванного ответа при восприятии логико-грамматических конструкций в активном и пассивном залоге в тесте на соотнесение изображения и предложе-

ния (рис. 3). При этом характер отличий имел как черты сходства, так и особенности в каждой из подгрупп детей 4–5 лет. Мы предполагали, что данные отличия будут соотноситься с грамматическими смысловыми различиями изменениями, которые проявляются на 2-м (V) и 3-м (NP2) слове в предложениях с прямым порядком слов. Предложения в активном и пассивном залоге отличаются по суффиксу второго слова в предложении – глагольной группы (обнял/обнят), и окончанию третьего слова, существительного (внука/внуком). Полученные результаты подтвердили нашу гипотезу, что уровень понимания пассивного залога должен отражаться на характеристиках ССП, демонстрируя мозговую чувствительность к грамматическим маркерам залога, которая выражается в отличиях амплитуды ответа на предъявление третьего слова в предложениях с активным и пассивным залогом.

Данные ССП у всех испытуемых выявили значимые различия между двумя типами предложений только по третьему слову. Как у взрослых, так и у детей 4–5 лет с различным уровнем понимания пассивного залога, амплитуда ССП на предложения в пассивном залоге выше, чем в активном, что может отражать субъективную сложность задания и повышенные требования к мозговым ресурсам [38]. Сниженная амплитуда вызванного ответа может отражать уменьшение потенциала постсинаптических нейронов, активацию меньшего числа нейронов популяции, а также снижение временной синхронности генерации в популяции нейронов [38].

Метаанализы, направленные на описание мозговых механизмов восприятия предложений на слух, показали, что в данном процессе задействуются как зоны, специфически активирующиеся при анализе семантики и синтаксиса, так и неспецифически, обеспечивающие обработку разных типов вербальной информации: левая височно-теменно-затылочная область, левая фронтальная и правая височная области [25–28]. Исходя из этого, в нашем исследовании зонами интереса были фронто-центральные области и височно-теменные левого и правого полушарий мозга. Отличия при восприятии предложений с активным и пассивным залогом были выявлены во фронто-центральных и височно-теменных зонах справа во всех трех группах, тогда как в височно-теменных зонах левого полушария показаны отличия только в контрольной группе взрослых и детей с высоким уровнем понимания пассивного залога (рис. 3).

Отличия по фронто-центральных областям у взрослых были выявлены на 100–200 мс: амплитуда ССП больше при восприятии третьего слова в пассивной конструкции (субъект действия), чем в активной (объект действия) (рис. 3а). Полученные данные можно соотнести с эффектом негативности, показанном на немецком языке на интервале

100–400 мс во фронто-центральных областях. В задании на выявление тематических ролей object-initial имеет более негативное значение, чем subject-initial у взрослых и у детей, начиная с 6 лет [12]. Описываемый нами эффект проявился на 100–200 мс только у взрослых и не обнаруживался у детей 4–5 лет. В то же время нельзя исключить, что ранние относительно предъявления третьего слова различия ССП могут отражать процессы обработки еще предыдущего, второго слова в предложении (глагольная группа “обнял/обнят”).

Достоверные отличия по фронто-центральных областям также были выявлены у взрослых на 600–700 мс, у детей с высоким процентом правильных ответов – 200–600 мс, и у детей с низким – 500–600 мс. Поскольку интервалы отличий у детей с высоким уровнем понимания пассивного залога имеют большую латентность, чем у взрослых, можно предположить, что у данной подгруппы детей уже наблюдается чувствительность к падежной маркировке залога, однако установление тематических ролей еще требует повышенных усилий. Считается, что компоненты с латентностью 250–500 мс отражают влияние таких переменных как семантическая вероятность, лексическая частотность и лексическая близость [38, 39]. Более поздние компоненты, такие как P600 и LPC (later positive component) связывают с процессами, происходящими уже после восприятия слова, с анализом грамматических маркеров, таких как флексии [40, 41], а также с синтаксическим и семантическим повторным анализом (re-analysis) [41, 42] или интеграцией [43].

Как у взрослых, так и у детей 4–5 лет обеих подгрупп были выявлены отличия вызванного ответа при восприятии предложений с активным и пассивным залогом в височно-теменной зоне интереса правого полушария мозга. Полученные данные согласуются с результатами исследований понимания логико-грамматических конструкций у детей от 5 лет и взрослых, показавшими активацию правого полушария, наряду с левым, доминантным по речи [44, 45].

В группе взрослых, а также у детей с высоким уровнем понимания пассивного залога чувствительность к грамматическим маркерам обнаруживается не только в височно-теменных зонах правого, но также и левого полушария. У детей с высоким уровнем понимания наблюдалась позитивность на 200–600 мс, которая начиналась во фронто-центральных областях, захватывая височно-теменные области обоих полушарий, у взрослых этот процесс был менее генерализован, а у детей с низким пониманием достоверных отличий было существенно меньше. Особая роль задней части верхневисочной извилины левого полушария была показана у детей 3–6 лет, чей уровень определения тематических ролей в предложении был выше случайного [46]. Кроме того, уровень активации задней части верх-

невисочной извилины левого полушария коррелирует у детей от 5 лет с успешностью анализа синтаксических признаков [47]. Показано, что по мере возрастного развития и совершенствования синтаксических навыков усиливается функциональное взаимодействие между лобной и височной областями в левом полушарии [25, 46, 47]. В частности, у детей, чей уровень определения тематических ролей в предложении был выше случайного, было показано усиление функциональных связей между задней частью верхней височной извилины (pSTG) и нижнелобной извилиной левого полушария (IFG) от 3 к 6 годам [46]. Учитывая особую роль функциональной сети, включающей взаимодействие лобной и височной областей левого полушария, можно предположить, что различия между двумя подгруппами детей 4–5 лет проявляются вследствие морфофункциональной незрелости структур и связей левого полушария.

Процессы реанализа фразы, которые по Friederici присутствуют при анализе сложного синтаксиса, опираются на сеть, включающую в себя среднюю височную, нижнюю лобную и угловую извилины левого полушария [41]. В то же время анализ предложений повышенной сложности опирается на те же нервные сети, что анализ простых, но требует большего вовлечения ресурсов, оцениваемых по увеличению уровня BOLD сигнала [48]. Friederici связывает с анализом фразы компонент латентности 600 мс и локализующийся в центрально-париетальной области, но она же отмечает, что, по данным магнитоэнцефалографии, источником этого компонента является левая средневисочная извилина [41]. Вероятно, именно в области средней височной извилины запускается стадия реанализа предложения, а отсутствие чувствительности этих областей к маркерам пассивного залога является причиной низких результатов одной из подгрупп детей 4–5 лет.

Отдельного внимания заслуживает связь процессов понимания логико-грамматических конструкций у детей с такими психическими процессами, как память, внимание, управляющими функциями и пр. [49, 50]. Особенности функций внимания могут лимитировать процесс обработки предложения [49], а нарушение функции контроля внимания может являться причиной некоторых специфических речевых нарушений у детей [51]. В нашем исследовании была выявлена неоднородность группы детей 4–5 лет по результатам понимания предложений с пассивным залогом, что позволило сформировать две подгруппы детей: с процентом правильных ответов выше 80 и ниже 60. Дети выделенных подгрупп хотя и соответствовали возрастной норме по речевому и интеллектуальному развитию, но продемонстрировали отличия как по показателям невербального интеллекта, слухо-речевой памяти, так и по уровню сформированности таких компонентов речевой системы, как фонематический и

лексико-грамматический строй речи. Высокий уровень корреляции языковых способностей и невербального интеллекта у детей был также показан в работе [52] на материале русского языка. Ранее нами было показано, что у детей 5–6 лет способность к выявлению субъекта действия в синтаксических конструкциях положительно коррелирует со словарным запасом детей, объемом оперативной памяти и качеством активного внимания, оцененным с помощью теста Векслера (WISC) [20]. В целом результаты поведенческих и электрофизиологических исследований показывают, что дети 4–5 лет двух подгрупп используют различные стратегии определения субъектно-объектных отношений, которые соотносятся с уровнем их речевого развития. Ранее мы обсуждали высокую вариативность физиологических механизмов, обеспечивающих вербальную деятельность, на разных этапах онтогенеза [20, 53–57]. Деятельность с одинаковой результативностью осуществляется различными механизмами с опорой на разные нервные сети. Полученные в данном исследовании результаты, как поведенческие, так и ССП данные, это подтверждают.

Смена стратегий может быть связана не только с развитием языковой компетенции ребенка, но и с морфофункциональными изменениями, происходящими по мере созревания мозга ребенка. Это проявляется в изменениях толщины коры, степени миелинизации проводящих путей, изменениях функциональной коннективности, амплитуде и латентности вызванного ответа. У детей 5–6 лет преобладают межполушарные связи, а у взрослых – внутрислошарные, при этом активность задневисочной и нижней лобной коры у детей положительно коррелирует с успешностью понимания сложного синтаксиса [58, 59]. С возрастом повышается активация в области средней височной и верхней височной извилины как слева, так и справа и снижается активация в области поясной коры, как было показано на основании метаанализа фМРТ онтогенетических исследований [60].

В исследованиях афазий и аграмматизма [10, 61, 62], а также по данным исследований здоровых взрослых и детей [63–66] показано, что понимание логико-грамматических конструкций требует слаженной работы зон коры, расположенных в нижней лобной извилине левого полушария, в задней части верхней височной извилины обоих полушарий. По результатам ССП-исследования у детей 4–5 лет с низким уровнем понимания пассивного залога показаны отличия амплитуды вызванного ответа во фронто-центральных и теменно-височных зонах интереса правого, но не левого, полушария. Вероятно, у этих детей уже проявляется мозговая чувствительность к грамматическим маркерам залога. Однако, принимая во внимание их низкие поведенческие результаты, можно предположить, что дети еще не способны эффективно использо-

вать синтаксические маркеры для интерпретации смысла. У детей с высоким уровнем понимания пассивного залога установление тематических ролей еще требует повышенных усилий, что выражается в большей, чем у взрослых латентности вызванного ответа, при внешнем сходстве паттернов отличий и высоких поведенческих результатах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было показано, что группа детей 4–5 лет с нормальным речевым и интеллектуальным развитием неоднородна в понимании предложений с пассивным залогом — часть детей довольно успешна, процент их правильных ответов выше 80%, тогда как часть детей все еще продолжает оставаться в понимании предложений и выборе нужной картинки на уровне, близком к случайному. В выделенных подгруппах детей выявлены отличия по характеристикам вызванного ответа на предъявление трехсловных предложений и соотношении их с изображением, а также сформированности фонематического и лексико-грамматического компонентов речевой системы, показателей слухоречевой памяти и невербального интеллекта. Показано, что как у детей, так и у взрослых, мозговая чувствительность к грамматическим маркерам залога выражается в отличиях амплитуды ответа на предъявление третьего слова (второго существительного — NP2) в предложениях с активным и пассивным залогом. При этом амплитуда вызванного ответа выше при восприятии пассивных предложений, что может отражать повышенные мозговые затраты при обработке субъективно более сложной конструкции. У детей с высоким уровнем понимания наблюдалась позитивность на 200–600 мс, которая начиналась во фронто-центральных областях, захватывая височно-теменные области обоих полушарий, а у детей с низким пониманием достоверных отличий было существенно меньше. У детей этой подгруппы чувствительность ССП ЭЭГ к грамматическим маркерам субъект-объектных отношений проявилась во фронто-центральных и височно-теменных областях только правого полушария, тогда как у детей с высоким уровнем понимания пассивного залога отличия проявились также и в височно-теменных областях левого полушария. Вероятно, функциональная зрелость структур и связей височно-теменной области левого полушария является ключевой для формирования чувствительности к грамматическим маркерам залога и обеспечивает успешное установление тематических ролей. Важно, что у детей с высоким уровнем понимания пассивного залога и у взрослых испытуемых характер изменений ССП при восприятии предложений с прямым порядком слов схож, что, вероятно, свидетельствует о становлении церебральных механизмов эффективного различения грамматических маркеров залога, выражающих

субъект-объектные отношения, у детей уже в 4–5 лет с высоким уровнем развития высших психических функций и речи. Поскольку интервалы отличий у детей с высоким уровнем понимания пассивного залога имеют большую латентность, чем у взрослых, можно предположить, что у данной подгруппы детей наблюдается чувствительность к падежной маркировке залога, однако установление тематических ролей еще требует повышенных усилий. По всей видимости, чувствительность фронто-центральных и височно-теменных областей коры обоих полушарий к грамматическим маркерам субъект-объектных отношений в активном и пассивном залоге может являться тем мозговым механизмом, который обеспечивает эффективное понимание сложных грамматических конструкций у детей уже в 4–5 лет.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Экспериментальная работа на группе детей 4–5 лет выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-013-00923, исследования взрослых проведены в рамках Государственного задания Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова РАН.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят своих испытуемых за участие в исследовании, Е.А. Муретова за изготовление изображений, А.П. Гвоздеву за помощь с подготовкой аудиофайлов, А.А. Меклера за помощь в реализации программы предъявления стимулов, Н.В. Макурину за помощь в регистрации ЭЭГ детей 4–5 лет, Д.С. Толкачеву за помощь в психологическом тестировании детей, Д.В. Лундину за помощь в обработке данных ЭЭГ в группе взрослых.

ВКЛАД АВТОРОВ

Разработка концепции исследования и дизайна эксперимента (О.В.К., Е.И.Г., Е.П.С., Д.М.Г.); проведение ЭЭГ исследований (О.В.К., Е.И.Г., Е.П.С.), логопедическая диагностика детей (О.В.К.), обработка, анализ и интерпретация данных (О.В.К., Е.П.С., Е.И.Г.), написание и редактирование текста статьи (О.В.К., Е.И.Г., Е.П.С., Д.М.Г.), подготовка иллюстраций (О.В.К.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hoff E, Shatz M (2007) Blackwell Handbook of Language Development. Oxford. Blackwell 520.
2. Ostvik L, Eikeseth S, Klintwall L (2012) Grammatical constructions in typical developing children: effects of explicit reinforcement, automatic reinforcement and parity. *Anal Verbal Behav* 28 (1): 73–82. <https://doi.org/10.1007/BF03393108>
3. Vasilyeva M, Waterfall H (2012) Beyond syntactic priming: evidence for activation of alternative syntactic struc-

- tures. *J Child Lang* 39 (2): 258–283.
<https://doi.org/10.1017/S0305000911000055>
4. *Wright AN* (2006) The role of modeling and automatic reinforcement in the construction of the passive voice. *Anal Verbal Behav* 22:153–169.
<https://doi.org/10.1007/BF03393036>
 5. *Allen SEM, Crago MB* (1996) Early passive acquisition in Inuktitut. *J Child Lang* 23 (1): 129–155.
<https://doi.org/10.1017/S0305000900010126>
 6. *Demuth K* (1990) Subject, topic and Sesotho passive. *J Child Lang* 17 (1): 67–84.
<https://doi.org/10.1017/S0305000900013106>
 7. *Fox D, Grodzinsky Y* (1998) Children's Passive: A View from the By-Phrase. *Linguistic Inquiry* 29 (2): 311–332.
 8. *Vasilyeva M., Huttenlocher J., Waterfall H.* (2006) Effects of language intervention on syntactic skill levels of preschoolers. *Dev Psychol* 42 (1): 164–174.
<https://doi.org/10.1037/0012-1649.42.1.164>
 9. *Strotseva-Feinschmidt A, Schipke CS, Gunter TC, Brauer J, Friederici AD* (2019) Young children's sentence comprehension: Neural correlates of syntax-semantic competition. *Brain Cogn* 134: 110–121.
<https://doi.org/10.1016/j.bandc.2018.09.003>
 10. *Лурия AP* (1976) Основные проблемы нейролингвистики. М. [Luriya AR (1976) The main problems of neurolinguistics. M. (In Russ)].
 11. *Schipke CS, Friederici AD, Oberecker R* (2011) Brain responses to case-marking violations in German preschool children. *NeuroReport* 22: 850–854.
<https://doi.org/10.1097/WNR.0b013e32834c1578>
 12. *Schipke CS, Knoll LJ, Friederici AD, Oberecker R* (2012) Preschool children's interpretation of object-initial sentences: neural correlates of their behavioral performance. *Dev Sci* 15 (6): 762–774.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01167.x>
 13. *Lindner K* (2003) The development of sentence-interpretation strategies in monolingual German-learning children with and without specific language impairment. *Linguistics* 41: 213–254.
<https://doi.org/10.1515/ling.2003.008>
 14. *Dittmar M, Abbot-Smith K, Lieven E, Tomasello M* (2008) German children's comprehension of word order and case marking in causative sentences. *Child Development* 79 (4): 1152–1167.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2008.01181.x>
 15. *Garcia R, Garrido G, Kidd RE* (2021) Developmental effects in the online use of morphosyntactic cues in sentence processing: Evidence from Tagalog. *Cognition* 216: 104859.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104859>
 16. *Ахутина ТВ, Корнеев АА, Матвеева ЕЮ* (2017) Возрастная динамика понимания логико-грамматических конструкций у младших школьников и ее мозговые механизмы. Специальное образование 3 (47): 15–31. [Ahutina TV, Korneev AA, Matveeva EYU (2017) Age-related dynamics of comprehension of logico-grammatical constructions in junior schoolchildren and its brain mechanisms. *Special Education* 3 (47): 15–31 (In Russ)].
 17. *Akhutina TV, Panikratova YR, Korneev AA, Matveeva EYu, Vlasova RM* (2019) Understanding of Active and Passive Constructions in 7- to 10-Year-Old Russian-Speaking Children: Reliance on Inflections or Word Order. *Psychology in Russia* 1: 3–20.
<https://doi.org/10.11621/pir.2019.0101>
 18. *Гвоздев АН* (2007) Вопросы изучения детской речи. СПб. Детство. [Gvozdev AN (2007) Issues in the Study of Children's Speech. SPb. Detstvo (In Russ)].
 19. *Slobin DI, Bever TG* (1982) Children use canonical sentence schemas: A crosslinguistic study of word order and inflections. *Cognition* 12 (3): 229–265.
[https://doi.org/10.1016/0010-0277\(82\)90033-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(82)90033-6)
 20. *Guillemard D, Galperina EI, Panasevich EA, Kats EE, Mekler AA, Nagornova ZhV, Shemyakina NV* (2016) EEG-correlates of complex syntactic constructions processing in russian-speaking children of 5–6 years old. *Clin Pathophysiol* 22 (1): 80–93.
 21. *Stankova EP, Guillemard DM, Galperina EI* (2020) Morpho-Functional Basis of Complex Sentence Processing in Adults and Children. *Hum Physiol* 46: 332–342.
<https://doi.org/10.1134/S0362119720030135>
 22. *Zhou X, Jiang X, Ye Z, Zhang Y, Lou K, Zhan W* (2010) Semantic integration processes at different levels of syntactic hierarchy during sentence comprehension: an ERP study. *Neuropsychologia* 48 (6): 1551–1562.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.02.001>
 23. *Gattei CA, Tabullo Á, París L, Wainseboim AJ* (2015) The role of prominence in Spanish sentence comprehension: An ERP study. *Brain Lang* 150: 22–35.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2015.08.001>
 24. *Szewczyk JM, Schriefers H* (2011) Is animacy special? ERP correlates of semantic violations and animacy violations in sentence processing. *Brain Res* 1368: 208–221.
<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.10.070>
 25. *Friederici AD, Brauer J, Lohmann G* (2011) Maturation of the language network: from inter- to intrahemispheric connectivities. *PLoS One* 6 (6): e20726.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020726>
 26. *Vigneau M, Beaucousin V, Hervé PY, Duffau H, Crivello F, Houdé O, Mazoyer B, Tzourio-Mazoyer N* (2006) Meta-analyzing left hemisphere language areas: phonology, semantics, and sentence processing. *Neuroimage* 30 (4): 1414–1432.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.11.002>
 27. *Vigneau M, Beaucousin V, Hervé PY, Jobard G, Petit L, Crivello F, Mellet E, Zago L, Mazoyer B, Tzourio-Mazoyer N* (2011) What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? Insights from a meta-analysis. *Neuroimage*. 54 (1): 577–593.
<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.07.036>
 28. *Walenski M, Europa E, Caplan D, Thompson CK* (2019) Neural networks for sentence comprehension and production: An ALE-based meta-analysis of neuroimaging studies. *Hum Brain Mapp* 40 (8): 2275–2304.
<https://doi.org/10.1002/hbm.24523>
 29. *Sonoda M, Silverstein BH, Jeong J-W, Sugiura A, Nakai Y, Mitsuhashi T, Rothmel R, Luat AF, Sood S, Asano E* (2021) Six-dimensional dynamic tractography atlas of language connectivity in the developing brain. *Brain* 144 (11): 3340–3354.
<https://doi.org/10.1093/brain/awab225>
 30. *Progovac L, Rakhlin N, Angell W, Liddane R, Tang L, Ofen N* (2018) Neural Correlates of Syntax and Proto-Syntax: Evolutionary Dimension. *Front Psychol* 9: 2415.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02415>

31. *Zaccarella E, Schell M, Friederici AD* (2017) Reviewing the functional basis of the syntactic Merge mechanism for language: A coordinate-based activation likelihood stimulation meta-analysis. *Neurosci Biobehav Rev* 80: 646–656. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.06.011>
32. *Annett M* (1967) The binomial distribution of right, mixed and left handedness. *Quart J Exp Psychol* 19 (4): 327.
33. *Нищева НВ* (2018) Комплексная образовательная программа дошкольного образования для детей с тяжелыми нарушениями речи (общим недоразвитием речи) с 3 до 7 лет. Издание 3-е. СПб. [Nishcheva NV (2018) A comprehensive preschool educational program for children with severe speech disorders (general underdevelopment of speech) from ages 3 to 7. Izдание 3-e. SPb. (In Russ)].
34. *Зайцева ЕС, Шептунова ВК* (2012) Тестовая методика обследования речи детей в возрасте 4–7 лет. СПб. КАРО. [Zajceva ES, Sheptynova VK (2012) Test methodology of speech examination of children aged 4–7 years. SPb. КАРО (In Russ)].
35. Равен Дж, Равен ДжК, Корт ДжХ (2012) Руководство к Прогрессивным Матрицам Равена и Словарным Шкалам. Раздел 3. Стандартные Прогрессивные Матрицы (включая Параллельные и Плюс версии). [Raven Dzh, Raven DzhK, Kort DzhKH (2012) Guide to Raven's Progressive Matrices and Dictionary Scales. Section 3: Standard Progressive Matrices (including Parallel and Plus versions). М. (In Russ)].
36. *Панасюк АЮ* (1973) Адаптированный вариант методики Векслера (WISC). М. [Panasyuk AY (1973) Adapted version of the Wechsler method (WISC). М. (In Russ)].
37. *Chaumon M, Bishop DV, Busch NA* (2015) A practical guide to the selection of independent components of the electroencephalogram for artifact correction. *J Neurosci Methods* 250: 47–63.
38. *Kutas M, Federmeier KD* (2011) Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annu Rev Psychol* 62: 621–647. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.093008.131123>
39. *Holcomb PJ, Coffey SA, Neville HJ* (1992) Visual and auditory sentence processing: a developmental analysis using event related brain potentials. *Dev Neuropsychol* 8: 203–241.
40. *Bornkessel-Schlesewsky I, Schlesewsky M* (2008) An alternative perspective on “semantic P600” effects in language comprehension. *Brain Res Rev* 59 (1): 55–73. <https://doi.org/10.1016/j.brainresrev.2008.05.003>
41. *Friederici AD* (2011) The Brain Basis of Language Processing: From Structure to function. *Physiol Rev* 91 (4): 1357–1393. <https://doi.org/10.1152/physrev.00006.2011>
42. *Canseco-Gonzalez E* (2000) Using the recording of event-related brain potentials in the study of sentence processing. In: *Foundations of Neuropsychology, Language and the Brain*. *Grodzinsky Y, Shapiro LP, Swinney D* (Eds) San Diego. Acad. Press. 229–266. <https://doi.org/10.1016/B978-012304260-6/50014-1>
43. *Aurnhammer C, Delogu F, Schulz M, Brouwer H, Crocker MW* (2021) Retrieval (N400) and integration (P600) in expectation-based comprehension. *PLoS One* 16 (9): e0257430. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0257430>
44. *Schmithorst VJ, Holland SK, Plante E* (2006) Cognitive modules utilized for narrative comprehension in children: a functional magnetic resonance imaging study. *Neuroimage* 29 (1): 254–266. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2005.07.020>
45. *Lidzba K, Schwilling E, Grodd W, Krägeloh-Mann I, Wilke M* (2011) Language comprehension vs. language production: age effects on fMRI activation. *Brain Lang* 119: 6–15. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.02.003>
46. *Vissienon K, Friederici AD, Brauer J, Wu CY* (2017) Functional organization of the language network in three- and six-year-old children. *Neuropsychologia* 98: 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2016.08.014>
47. *Wu CY, Vissienon K, Friederici AD, Brauer J* (2016) Preschoolers' brains rely on semantic cues prior to the mastery of syntax during sentence comprehension. *Neuroimage* 126: 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.10.036>
48. *Europa E, Gitelman DR, Kiran S, Thompson CK* (2019) Neural Connectivity in Syntactic Movement Processing. *Front Hum Neurosci* 13: 27. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00027>
49. *Cowan N* (2010) The Magical Mystery Four: How is Working Memory Capacity Limited, and Why? *Curr Dir Psychol Sci* 19 (1): 51–57. <https://doi.org/10.1177/0963721409359277>
50. *Adams EJ, Nguyen AT, Cowan N* (2018) Theories of Working Memory: Differences in Definition, Degree of Modularity, Role of Attention, and Purpose. *Lang Speech Hear Serv Sch* 49 (3): 340–355. https://doi.org/10.1044/2018_LSHSS-17-0114
51. *Victorino KR, Schwartz RG* (2015) Control of auditory attention in children with specific language impairment. *J Speech Lang Hear Res* 58: 245–257. https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-L-14-0181
52. *Arutiunian V, Lopukhina A, Minnigulova A, Shlyakhova A, Davydova E, Pereverzeva D, Sorokin A, Tyushkevich S, Mamokhina U, Danilina K, Dragoy O* (2021) Language Abilities of Russian Primary-School-Aged Children with Autism Spectrum Disorder: Evidence from Comprehensive Assessment. *J Autism Dev Disord*. Epub ahead of print. <https://doi.org/10.1007/s10803-021-04967-0>
53. *Гальперина ЕИ, Кручинина ОВ, Рожков ВП* (2014) Общее и индивидуальное в организации пространственных взаимосвязей корковых процессов у подростков при вербально-мнестической деятельности. Сенсорные системы 28 (3): 16–27. [Gal'perina EI, Kruchinina OV, Rozhkov VP (2014) Common and individual in cortical spatial interactions during verbal-mnemonic activity in adolescents. Sensory systems 28 (3): 16–27 (In Russ)].
54. *Гальперина ЕИ, Кручинина ОВ, Станкова ЕП, Корнев АН* (2021) Поздние компоненты связанных с событиями потенциалов у детей, подростков и взрослых при чтении слов. Ж высш нервн деятельности им ИП Павлова 71 (4): 500–514. [Gal'perina EI, Kruchinina OV, Stankova EP, Kornev AN (2021) Late ERP

- components elicited by written words processing in children, adolescents and adults. *ZH Vyssh Nervn Deyatel'nosti im IP Pavlova* 71 (4): 500–514 (In Russ)]. <https://doi.org/10.31857/S0044467721040031>
55. *Kruchinina OV, Galperina EI, Kats EE, Shepovval'nikov AN* (2012) Factors affecting the variability of the central mechanisms for maintaining bilingualism. *Human Physiol* 38 (6): 571–585. <https://doi.org/10.1134/S0362119712060084>
56. *Kruchinina OV, Stankova EP, Galperina EI* (2020) Development of spatiotemporal eeg organization in males and females aged 8–30 years during comprehension of oral and written texts. *Human Physiol* 46 (3): 244–256. <https://doi.org/10.1134/S036211972003010X>
57. *Stankova EP, Kruchinina OV, Shepovvalnikov AN, Galperina EI* (2020) Evolution of the Central Mechanisms of Oral Speech. *J Evol Biochem Physiol* 56 (3): 179–194. <https://doi.org/10.1134/S0022093020030011>
58. *Xiao Y, Friederici AD, Margulies DS, Brauer J* (2016) Development of a selective left-hemispheric fronto-temporal network for processing syntactic complexity in language comprehension. *Neuropsychologia* 83: 274–282. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.09.003>
59. *Xiao Y, Friederici AD, Margulies DS, Brauer J* (2016) Longitudinal changes in resting-state fMRI from age 5 to age 6 years covary with language development. *Neuroimage* 128: 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.12.008>
60. *Weiss-Croft LJ, Baldeweg T* (2015) Maturation of language networks in children: A systematic review of 22 years of functional MRI. *NeuroImage* 123: 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.07.046>
61. *Ахутина ТВ* (1989) Порождение речи. Нейролингвистический анализ синтаксиса. М. Изд-во МГУ. [Ahutina TV (1989) Speech generation. Neurolinguistic Analysis of Syntax. M. MGU (In Russ)].
62. *Dragoy O, Bergelson M, Iskra E, Laurinavichyute A, Mananova E, Skvortsov A, Statnikov A* (2015) Comprehension of reversible constructions in Semantic Aphasia. *Aphasiology*. <https://doi.org/10.1080/02687038.2015.1063582#>
63. Goodglass H (1976) Agrammatism. *Studies in neurolinguistics*. H Whitaker, HA Whitaker (Eds) 1: 237–260.
64. *Rodd JM, Longe OA, Randall B, Tyler LK* (2010) The functional organization of the fronto-temporal language system: Evidence from syntactic and semantic ambiguity. *Neuropsychologia* 58 (5): 1324–1335. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.12.035>
65. *Grodzinsky Y, Friederici AD* (2006) Neuroimaging of syntax and syntactic processing. *Current Opinion in Neurobiology* 16 (2): 240–246. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.03.007>
66. *Den Ouden DB, Saur D, Mader W, Schelter B, Lukic S, Wali E, Timmer J, Thompson CK* (2012) Network modulation during complex syntactic processing. *Neuroimage* 59 (1): 815–823.

The Level of Passive Voice Comprehension in the 4–5 Years Old Russian Children Reflects in the ERP'S

O. V. Kruchinina^a, E. P. Stankova^a, D. M. Guillemard^a, and E. I. Galperina^{a, #}

^a*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

[#]*e-mail: galperina-e@yandex.ru*

The passive voice acquisition and thematic-role assignment is the key point in the process of complex grammar comprehension. The same semantic situation can be expressed in Russian using different grammatical instruments, the mastering of which continues throughout preschool age and depends on their frequency in the language. Brain mechanisms of passive voice processing in 4-5 years old children are poorly understood. In our study, 46 4–5-years-old children with normal speech development and 26 adults performed sentence-picture matching tasks (active/passive voice) during EEG recording using 3-words sentences (NP1-V-NP2). According to the results of the thematic roles assignment in the passive voice direct word order sentences, two subgroups of children were formed: high (>80% of correct answers, $n = 17$) and low (<60%, $n = 19$) levels of comprehension. Between groups, differences were revealed in the event related potentials (ERP's) on the 3d word comprehension (NP2), as well as in verbal memory and the phonological awareness and lexical competence. The ERP's were obtained for frontocentral, left and right temporoparietal regions of interest (ROI) for each word in a sentence separately. In both adults and children cerebral sensitivity to syntactical markers of grammar voice (nouns flexions) was shown: a greater amplitude in the passive vs active voice. In adults and children with high levels of passive voice comprehension, this sensitivity was found in all ROIs, while in children with low comprehension level, there was no sensitivity in the left temporoparietal areas. Children with high comprehension level showed positivity at 200–600 ms, with the beginning in frontocentral areas spreading to the temporoparietal areas bilaterally, while children with low comprehension level showed significantly fewer significant differences. The sensitivity of the frontocentral and temporoparietal cortical areas bilaterally, especially the left hemisphere, to the grammatical markers of the voice could be the brain mechanism that ensures effective comprehension of complex grammar in children as early as 4–5 years of age.

Keywords: ERP, children, thematic-role assignment, passive voice acquisition, fronto-central positivity, NP2