

УДК 612.821

МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ПРЕДЛОЖЕНИЙ У ВЗРОСЛЫХ И ДЕТЕЙ

© 2020 г. Е. П. Станкова^{1, *}, Д. М. Гийемар¹, Е. И. Гальперина^{1, 2}

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

²ФГБОУ ВО Санкт-Петербургский государственный педиатрический медицинский университет МЗ РФ,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: stankova.ekaterina@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.12.2019 г.

После доработки 18.01.2020 г.

Принята к публикации 03.02.2020 г.

Данный обзор посвящен описанию нейрофизиологических основ анализа сложных предложений, например таких, в которых присутствует пассивный залог или обратный порядок слов. Мы придерживаемся гипотезы о том, что обязательным этапом обработки сложных предложений является ре-анализ, в ходе которого происходит интеграция семантической и синтаксической информации с опорой на контекст. В статье сопоставляется характер активации мозга, связанной с анализом разных типов предложений. Мы приходим к выводу, что у взрослых в обработку синтаксически сложных предложений вовлечены те же зоны мозга, что и в обработку простых, отличия проявляются лишь в степени активации церебральных структур левого полушария мозга, прежде всего, средней височной извилины, нижней лобной извилины и угловой извилины. В обзоре рассматривается формирование в онтогенезе зон мозга, участвующих в анализе предложений, а также проводящих путей, связывающих эти зоны. Проанализированные данные демонстрируют, что механизмы обработки сложных предложений могут меняться с возрастом. Переход к более продуктивной стратегии анализа, основанной на выделении специфических синтаксических маркеров, по-видимому, становится доступным ребенку только после 6–7 лет, что связывают с формированием у него дорсального пути обработки речи.

Ключевые слова: речь, предложение, пассивный залог, обратный порядок слов, нейрофизиологические механизмы, онтогенез.

DOI: 10.31857/S0131164620030145

Предложение является минимальной речевой единицей, в рамках которой объединяются четыре уровня понимания языка: фонетический, семантический, синтаксический, и контекстный [1]. В соответствии с наиболее разработанной на сегодняшний день моделью анализа предложений *A. Friederici* [2], после первичной акустико-фонологической обработки слуховой информации у взрослых проходит еще три последовательных стадии анализа предложения. На **первой стадии** отдельные слова обрабатываются с точки зрения их принадлежности к той или иной части речи, и на основе этой информации строится начальное предположение о структуре предложения, иначе говоря, выбирается его шаблон (например, субъект–действие–объект), соответствие которому проверяется на последующих этапах анализа. *A. Friederici* утверждает, что данный процесс происходит автоматически и не связан с анализом значения слов, составляющих предложение. Во **второй стадии** обработки предложения параллельно происходит анализ семантики и синтаксиса, на основе чего выделяются тематические роли.

Как известно, в простейших предложениях присутствуют субъект и действие (предикат), в более сложных случаях выделяется субъект, объект и действие [3]. Еще в первой половине XX века А.Р. Лурия высказал идею, что для установления связи между словами в русском языке существует как минимум три основных вида признаков: 1) флексии, 2) положение слов в словосочетаниях и 3) служебные слова [3]. Следует учесть, что, поскольку одна и та же мысль может иметь различное грамматическое оформление, то и установление тематических ролей в свою очередь может основываться на разных языковых признаках. Первые две стадии анализа проходит практически любое предложение, состоящее более чем из двух слов, и этих двух стадий может быть достаточно для понимания предложения.

Например: “Папа пьет кофе”, “Кофе пьет папа”.

Поскольку кофе не может выпить папу, то для понимания данных предложений достаточно только анализа семантики составляющих их слов. Объект, субъект и действие трактуются однозначно, даже если морфосинтаксические признаки

слов не могут быть проанализированы, либо противоречивы (как в случае предложения с обратным порядком слов).

“Папа обнял сына”, “Папой обнят сын”.

В данном случае, как папа, так и сын могут быть субъектом. Для установления тематических ролей могут быть использованы такие признаки как флексии и порядок слов. Поскольку в русском языке субъект в предложении чаще всего стоит первым, то первое слово и воспринимается как действующее лицо [4, 5]. В данном случае морфо-синтаксические признаки предложения не противоречат правилу “первое слово-субъект”, поэтому тематические роли могут быть установлены уже на второй стадии анализа предложения.

Однако для понимания некоторых предложений недостаточно семантической или синтаксической информации, полученной в ходе первых двух стадий обработки, может потребоваться дополнительная **третья фаза** реанализа предложения, во время которой происходит интеграция различных типов информации, включая контекст и общие знания о мире, и принимается окончательное решение о смысле предложения [2]. К таким предложениям относятся логико-грамматические конструкции, например, предложения, содержащие пассивный залог, а также предложения, инвертированные по порядку слов:

“Сына обнял папа”, “Сын обнят папой”.

В данном примере первое предложение содержит обратный порядок слов, а второе – пассивный залог. Соответственно, морфосинтаксические признаки слов будут противоречить правилу “первое слово – субъект”. Существует мнение, что на начальных этапах анализа таких предложений первое слово воспринимается как субъект действия, но при дальнейшем анализе семантики и синтаксиса предложения выявляется несоответствие, которое запускает реанализ предложения исходя из новой парадигмы – первое слово – объект [6]. Если такого реанализа не произошло, то человек остановится на ошибочном первоначальном предположении о том, что первое существительное – субъект, это часто наблюдается у детей с общим недоразвитием речи [7]. Однако стратегия “первое слово – субъект” позволяет принимать правильное решение относительно значения инвертированных пассивных предложений [8]. Например, “Папой обнят сын” будет воспринято также как “Папа обнял сына”. Теоретически, если предложения с прямым и обратным порядком слов анализируются одинаково эффективно, можно заключить, что механизм реанализа на основе синтаксических маркеров у данного человека сформирован. По данным Т.В. Ахутиной у русскоговорящих детей способность понимать логико-грамматические конструкции формируется к 7–8 годам [8].

Таким образом, пассивные, а также активные инвертированные конструкции являются примером предложений, которые должны требовать третьей стадии – реанализа. Для выявления механизмов третьей стадии обработки предложений, как правило, сравнивают церебральную активность при анализе грамматической конструкции с прямым порядком слов (условно не требующей реанализа) и при анализе сложных предложений, например, содержащих пассивный залог, деепричастные обороты, придаточные предложения или предложения с инвертированным порядком слов. Однако вопрос о том, существуют ли отдельные нейрофизиологические механизмы реанализа, или реанализ обеспечивается теми же механизмами, что и первые две стадии обработки предложения, в настоящее время остается открытым: либо эта функция реализуется с помощью дополнительного цикла возбуждения, проходящего по тем же сетям, которые обеспечивают анализ простых предложений, либо реанализ осуществляется специальными морфофункциональными образованиями, с активацией дополнительных нервных центров.

На основе метаанализов мы попробуем описать зоны мозга, которые у взрослых вовлечены в обработку всех типов предложений, затем сравним у взрослых активацию мозга на простые и сложные предложения. Далее, рассмотрим, как анатомическое и физиологическое развитие мозга ребенка обуславливает совершенствование навыков анализа сложной грамматики.

Нейрофизиологические основы анализа предложений у взрослых

Обработка звука начинается в первичной слуховой коре, расположенной в верхней височной извилине обоих полушарий. Из этих зон информация передается в вентролатеральную префронтальную кору по двум группам проводящих путей, которые, в соответствии с описанной G. Hickok и D. Poeppel “моделью двойного потока”, получили название вентрального слухо-концептуального и дорсального слухо-моторного путей обработки речи [9, 10]. Вентральный путь объединяет зоны, расположенные в пределах верхней височной извилины и борозды, средней височной извилины, полюса височной доли, орбитофронтальной и вентролатеральной префронтальной коры. Структурной основой их объединения служат нижний продольный и крючковидный пучки, а также система проводящих путей наружной капсулы (*extreme capsule fiber system*) [11, 12]. Церебральные структуры, соотносимые с вентральным потоком, в основном обеспечивают преобразование фонологической информации в семантическую на основе взаимодействия с гиппокампом. Дорсальный путь соединяет заднюю часть верхней и средней височной извилины с зоной Брока через *planum temporale*, супрамарги-

нальную извилину и теменную ассоциативную кору посредством дугообразного и верхнего продольного пучков [11]. Церебральные структуры, относящиеся к дорзальному пути, тоже участвуют в преобразовании фонологической информации в семантическую, но на основе артикуляции [13, 14]. Кроме того, входящие в состав дорзального тракта структуры участвуют в обеспечении сегментарного сублексического анализа звуков речи (на основе временных характеристик) и определения местоположения источника звука [15].

В мозге здоровых взрослых при анализе всех типов предложений активация наблюдается в основном в трех областях: левой височно-теменно-затылочной области, левой фронтальной области и в правой височной, что было верифицировано несколькими метаанализами [2, 16–18]. Вышеуказанные области включают как зоны, специфически активирующиеся при анализе семантики и синтаксиса, так и зоны, неспецифически активирующиеся при анализе разных типов вербальной информации.

В левой лобной доле мозга в ходе анализа предложений возникают три кластера активации: первый — в нижней лобной извилине, второй — в прецентральной извилине и третий — в дополнительной моторной области [18]. **Нижняя лобная извилина**, как известно, делится на *pars opercularis*, *pars triangularis* и *pars orbitalis* (приблизительно соответствующие 44, 45 и 47 полям Бродмана). Передняя часть нижней лобной извилины (45 и 47 поля) активируется при выполнении заданий, содержащих семантические ограничения, связанные с одушевленностью/неодушевленностью (например, “папа пьет кофе”), а также, по-видимому, обеспечивает анализ семантической связи слов в предложении [2]. По данным *M. Vigneau* 45 и 44 поля Бродмана, вместе составляющие зону Брока, неспецифически активируются как при анализе семантики, так и при анализе синтаксиса [16]. Однако *A. Frederici* утверждает, что цитоархитектонически 44 поле Бродмана может быть разделено на две зоны, и задняя из них специфически вовлечена в анализ синтаксиса [2]. По нашему мнению, вовлечение зоны Брока в анализ как семантики, так и синтаксиса вполне соответствует представлениям о надмодальной функции этой области, которая состоит в осуществлении и анализе разнообразных иерархически организованных форм поведения независимо от типа обрабатываемой информации [19]. С другой стороны, участие зоны Брока в различных видах речевой деятельности, по крайней мере, отчасти может быть опосредована ролью этой зоны в обеспечении рабочей памяти [16, 20]. **Дополнительная моторная область** (*supplementary motor area*, *SMA*) традиционно рассматривается в контексте управления моторной функцией речи, однако, недавние исследования показали, что эта зона участвует и в восприятии речи, особенно в случае

повышенных требований к языковой задаче [18]. Передняя часть дополнительной моторной области, известная как *pre-SMA*, участвует в контроле различных когнитивных функций, в частности осуществляет переключение внимания, участвует в разрешении неоднозначности, обеспечивает интеграцию контекста и координацию процедурной и декларативной памяти [21, 22]. Применительно к речи дополнительная моторная область, вероятно, обеспечивает разрешение лексической неоднозначности, интеграцию синтаксиса и просодики, а также мониторинг контекста [22]. В области **прецентральной извилины** начинается пирамидный путь, в связи с чем эта зона также традиционно ассоциируется не с обработкой, а с продукцией речи. Однако существует мнение, что зоны мозга, связанные с продукцией движений, также в некоторой степени вовлекаются и в анализ слов, выражающих эти движения (гипотеза воплощенного познания — *embodied cognition*) [23, 24]. Таким образом, как дополнительная моторная область, так и моторная кора, могут вовлекаться в анализ семантики [24, 25]. Кроме того, области, отвечающие за движения языка и глотки, могут участвовать в распознавании фонем [16]. Наконец, активация левой прецентральной извилины часто отмечается при обработке метафор, что отражает вовлечение этой зоны в анализ связи между метафорическим и буквальным значением [26].

В левой височно-теменно-затылочной зоне кластеры активации включают: переднюю и заднюю часть верхней височной извилины, всю среднюю височную извилину, фузиформную и угловую извилины. Считается, что в **передней части верхней височной извилины** и в **полусе височной доли** находятся области, которые активируются как при анализе слов, так и при анализе предложений. Вероятно, в передней части височной доли происходит сопоставление семантики и синтаксиса, и, учитывая топографическую близость гиппокампальной формации к этой зоне, возможно, еще происходит сопоставление полученной информации с информацией, хранящейся в долговременной памяти [2, 16]. *A. Frederici* предположила, что именно передняя часть верхней височной извилины вместе с частью островка, известной как *frontal operculum*, обеспечивают первичный анализ структуры фразы. Однако, поскольку у взрослых процесс анализа структуры фразы происходит автоматически и требует очень мало ресурсов, в том случае, когда человек анализирует предложения на родном языке, активация *frontal operculum* очень мала [2]. Если передняя часть верхней височной извилины активируется как на слова, так и на предложения, то **задняя часть верхней височной извилины** специфически вовлечена в анализ фраз и текстов [16, 18]. Активность этой зоны также отмечается в задачах, когда испытуемым требуется анализировать предложения с нарушенной синтаксической или семанти-

ческой структурой, или когда необходимо подобрать последнее слово в предложении [16]. Предположительно, именно задняя часть верхней височной извилины (наряду с левой нижнелобной извилиной) обеспечивает обработку отношений между глаголом и его аргументом [2, 27], которая происходит на второй стадии анализа фразы. **Средняя височная извилина** активируется как при обработке списка слов [28, 29], так и при обработке простых и сложных предложений [18], при этом активность этой зоны выше, когда предъявляемые слова семантически связаны. Считается, что задняя часть средней височной извилины вовлечена в контролируемый семантический поиск и выбор между альтернативными интерпретациями [29–31]. Другой особенностью средней височной извилины является то, что эта область в большей мере активируется на глаголы, чем на существительные [32, 33]. *A. Frederici* на основании электрофизиологических данных предположила, что активация средней височной извилины и базальных ганглиев отражает процессы интеграции семантической и синтаксической информации и реанализ предложения в ходе третьего этапа обработки фразы. **Фузиформная извилина** чаще всего рассматривается как зона, обеспечивающая высокоуровневую обработку зрительной информации и соотнесение ее с информацией, хранящейся в долговременной памяти, например распознавание лиц или текста [34], часть фузиформной извилины хорошо известна как область зрительного образа слова — *visual word form area* [35]. Однако фузиформная извилина активируется даже в тех случаях, когда в заданиях слова предъявляются не в зрительной, а в слуховой форме [16, 18], а ее повреждение сопровождается нарушением понимания устной речи [36]. Вероятно, эту область можно рассматривать как надмодальный “семантический хаб” обработки речевого сообщения [16, 37]. Другим кросс-модальным центром обработки речи выступает **угловая извилина**. В этой области входящая мультисенсорная информация интегрируется для понимания и осмысления событий, манипулирования ментальными представлениями, решения знакомых проблем и переориентации на соответствующую информацию [38]. Поэтому считается, что угловая извилина может быть вовлечена в повторный тематический анализ фразы и интеграцию глагола и аргумента с учетом контекста, как это, например, происходит при анализе метафор [27, 39]. Однако, следует подчеркнуть, что угловая извилина имеет многочисленные структурные связи с супрамаргинальной извилиной и верхней теменной долькой, верхней височной извилиной, нижней и средней лобной извилиной [40] и включена в разные когнитивные сети [38, 41], поэтому во многом функциональная роль угловой извилины определяются характером ее взаимодействия с другими областями мозга.

Не вызывает сомнения тот факт, что **правое полушарие мозга** участвует в восприятии просодических компонентов речи [17]. Просодика обрабатывается на всех трех стадиях анализа предложения — для выделения границ слов, фраз, кроме того, просодика облегчает восприятие грамматической структуры [2]. В некоторых случаях обработка просодической информации становится критически важной для понимания смысла (“казнить нельзя, помиловать” или “казнить, нельзя помиловать”). Помимо анализа просодики структуры правого полушария вовлечены в обработку семантической и синтаксической информации на уровне предложений и текстов [18]. Большая часть этих структур находится в правой височной доле и включает среднюю височную извилину и заднюю часть верхней височной извилины [17, 18]. Кроме того, при анализе предложений активация наблюдается в правой лобной доле, в частности в области нижней лобной извилины и островка [17]. *M. Vigneau* отмечает, что **правая височная доля** активно участвует в семантической интеграции и анализе контекста, т.е. в осуществлении тех операций, при которых требуется выйти за пределы буквального значения слова и истолковать его исходя из информации, полученной ранее. Активация в **правой нижней лобной извилине** наблюдалась, когда испытуемый выполнял сложные задания, например, сравнение предложений. При этом важно учитывать, что активация правой нижней лобной извилины по данным *M. Vigneau*, является дополнительной по отношению к левой, и вероятно вызвана возрастанием сложности задания. Активация **островка в правом полушарии** наблюдалась при выполнении и фонологических, и семантических, и синтаксических задач, притом во всех типах заданий требовалось удерживать информацию в рабочей памяти. На основании этого *M. Vigneau* пришел к выводу, что, скорее всего, активация островка связана не с обработкой предложений как таковых, а с осуществлением управляющих функций мозга [17].

Таким образом, упрощая все вышесказанное, можно заключить, что обработку семантики на уровне предложения обеспечивают структуры мозга, расположенные в основном билатерально и связанные в рамках вентрального пути обработки звука [42]. Это фузиформная извилина, передняя часть верхней височной извилины, полюс височной доли и передняя часть нижней лобной извилины. Последняя, по-видимому, интегрирует семантическую информацию и устанавливает семантические соответствия, в том числе для выделения в предложении тематических ролей, если это возможно сделать, например, используя признаки одушевленности. Область задней части левой верхней височной извилины и борозды, а также задней части левой средневисочной извилины специфически активируются при анализе

синтаксиса [16]. Анализ отношений глагола и его аргумента обеспечивается взаимодействием вышеназванных структур с *pars opercularis* левой нижней лобной извилины [2, 43]. Связь задневисочных областей мозга с вендролатеральной корой обеспечивается проводящими путями, составляющими дорсальный путь обработки речи, в частности верхним продольным и дугообразными пучками [44]. Интересно, что дорсальный тракт асимметричен, у большинства взрослых большой объем белого вещества отмечается в левом полушарии [45, 46].

Следует обратить внимание на описание нервных сетей, поддерживающих процесс реанализа фразы. Для этого можно рассмотреть исследования, в которых сравнивается активность мозга при восприятии простых предложений с прямым порядком слов и сложных предложений, например таких, где присутствует обратный порядок слов, пассивный залог или деепричастные обороты. Метаанализ, проведенный *M. Walenski* [18], показал, что при восприятии сложных предложений наблюдается: повышенная активация в левой нижней лобной и частично средней и верхней лобной извилинах, в поясной извилине справа, в задней части левой средней височной извилины, а также в левой угловой извилине. Эти сведения во многом совпадают с данными статей, не вошедших в этот метаанализ [47–49], а также с результатами метаанализа, проведенного *M. Meyer* и *A. Friederici* [50] за исключением того, что последними авторами не было показано увеличения уровня активности левых верхней лобной и угловой извилин, а также поясной извилине справа. Судя по всему, области левой верхней лобной извилины и правой поясной извилины не связаны специфически с анализом предложений [17, 47], но обеспечивают процессы поддержания направленного внимания и подготовки двигательного ответа. Таким образом, можно заключить, что процессы дополнительного анализа фразы, составляющие по *A. Friederici* третью фазу анализа предложений, опираются на сеть, включающую в себя среднюю височную, нижнюю лобную и угловую извилины левого полушария. Выше, давая краткую характеристику каждой из зон, мы отмечали, что область нижнелобной и средней височной извилин активны как при обработке семантики, так и при обработке синтаксиса, и могут участвовать в интеграции этих двух аспектов речи, а угловая извилина обеспечивает подключение контекста к обработке информации. Важно, однако, что все эти области участвуют в анализе не только сложных, но и простых предложений. Эти данные согласуются с представлениями *E. Europa* о том, что 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]. Основываясь на

данных *A. Friederici* [2] о временном ходе анализа фразы, мы бы добавили к заключению *E. Europa*, что анализ сложных предложений требует прохождения дополнительного цикла возбуждения в языковых сетях, который может приводить к увеличению *BOLD*-сигнала. Однако напрашивается закономерный вопрос о том, какие структуры или какие нервные сети запускают этот дополнительный круг возбуждения. Если представить, что существует некий детектор, реагирующий на какое-либо несоответствие в анализируемом предложении (и запускает реанализ), время его срабатывания может быть настолько мало, что он не будет обнаруживаться методом фМРТ, и выявить его можно только методами, имеющими более высокое временное разрешение, такими как ЭЭГ и МЭГ. *A. Friederici* отмечает, что с анализом фразы связан особый компонент ВП, имеющий латентность в районе 600 мс и локализующийся в центро-париетальной области, но она же отмечает, что, по данным магнитоэнцефалографии, источником этого компонента является левая средневисочная извилина [2]. Таким образом, можно было бы предположить, что именно в области средней височной извилины запускается третья стадия анализа предложения. Другой подход для ответа на вопрос, какими структурами инициируется реанализ — изучение причинно-следственных связей активности разных зон мозга. *E. Europa et al.*, применив моделирование причинно-следственных связей для данных фМРТ методом *Dynamic Causal Modeling*, установили, что при анализе сложных предложений активность нижней лобной извилины модулирует активность других зон мозга [48]. Стоит отметить, что средняя височная извилина не была выбрана авторами как зона интереса для моделирования. Учитывая вышеописанные данные о вовлечении средней височной извилины в процессы контролируемого семантического поиска и выбор между альтернативами, можно было бы предположить, что если при обработке синтаксически сложного предложения первоначальная гипотеза о его смысле (например, первое слово — субъект) не подтвердилась, то в лобной коре наблюдается активация, связанная с детекцией несоответствия, а в области средней височной извилины происходит активация, связанная с генерацией новой гипотезы. Однако экспериментального подтверждения такого хода событий в литературе найти не удалось. Таким образом, данные о структурах, запускающих дополнительную итерацию анализа предложения еще очень малочисленны и противоречивы, и в то же время они крайне необходимы для понимания механизмов анализа сложных предложений. Поскольку разные структуры мозга и связи между ними созревают гетерохронно, изучение формирования навыка понимания сложных предложений у детей разного возраста, а также соотнесение этих данных с особенностями строе-

ния мозга может дать некоторые сведения относительно механизмов реанализа предложений.

Основы формирования компонентов языковой системы в онтогенезе

Известно, что освоение ребенком родного языка представляет собой сложный процесс, включающий формирование всех компонентов языковой системы: фонологического, лексического, морфологического, синтаксического, дискурсивного, — и фактически предполагает развитие речи ребенка от нуля к обретению языковой способности в том объеме, в котором располагает ею взрослый носитель языка [51]. По мнению многих психологов, лингвистов и онтолингвистов, освоение языковой системы ребенком происходит в процессе самостоятельного конструирования с опорой на речевую продукцию взрослых, подвергаемую бессознательному анализу [52–57]. В результате самостоятельного конструирования появляется ряд временных систем, последовательно сменяющих одна другую, что впервые было показано *R. Brown* [59]. При этом, гетерохронное созревание церебральных структур и связей между ними, обеспечивающих разные виды вербальной деятельности, определяет качественные преобразования языковых навыков ребенка. На каждом временном отрезке развития компоненты языковой системы формируются параллельно, хотя и с разной скоростью у разных детей [59]. При этом, было показано, что освоение языковых правил на разных уровнях языковой системы происходит от основных, самых общих, к более частным [57, 61–63], в последнюю очередь осваиваются единичные исключения [54]. На каждом этапе развития временной системы, ее компоненты могут обеспечиваться разными механизмами.

Считается, что основные этапы развития грамматического уровня языка совпадают с изменениями в развитии значения и формы грамматических категорий глагола. За глаголом признается доминирующее положение в структуре предложения [64] (вербоцентристская позиция), а также роль катализатора в становлении всей грамматической системы ребенка [65]. *Н.В. Гагариной*, на основе анализа уровня развития глагольного формообразования и лексики, была выстроена периодизация развития грамматической системы. Автор установила, что развитие грамматической системы в речи ребенка происходит на протяжении четырех периодов: 1) доглагольный период; 2) период аналогий (формовоспроизводство); 3) период развития продуктивности (формопроизводство); 4) период усвоения грамматической нормы и периферийных правил. Было показано, что усвоение глагольного вида тесно связано со становлением когнитивных представлений “процесс-результат”, развитием лексики, уточнением лексического значения глаголов

и появлением способов действия [66]. Известно, что уже к началу школьного обучения дети осваивают большинство лексических и грамматических структур, которые присутствуют как на уровне понимания речи, так и на уровне речепродукции [67]. Однако, такие сложные структуры, как пассивный залог, транзитивные или падежные конструкции с местоимениями до 8–9 лет используются не полностью [67]. Несмотря на то, что возраст полного освоения пассивного залога на уровне взрослого человека до конца не определен, показано, что понимание таких конструкций наступает раньше, чем собственная продукция пассивного залога [53, 68, 69]. В наших исследованиях было установлено, что русскоговорящие дети 5–6 лет практически полностью справляются с распознаванием пассивных конструкций как при прямом, так и при обратном порядке слов [70]. В то же время *Т.В. Ахутиной* показано, что даже в первом классе общеобразовательной школы далеко не все дети могли правильно понимать предложения, содержащие пассивный залог [8]. *D. Guillemard et al.* сопоставили успешность выполнения теста Векслера (*WISC*) и задач на выявление субъекта действия в синтаксических конструкциях: были выявлены положительные корреляции общего количества правильных ответов со словарным запасом детей, объемом оперативной памяти и качеством активного внимания. Кроме того, обнаружилась прямая зависимость между уровнем развития вербального интеллекта и правильностью понимания конструкций с прямым порядком слов в активном залоге и обратная зависимость между общим показателем уровня развития интеллекта и количеством ошибок в конструкциях с обратным порядком слов в пассивном залоге [70].

Одним из главных движущих факторов развития языковой системы является прагматическая роль речи. Прагматическая роль пассивных конструкций в значительной степени влияет на возраст, в котором ребенок начинает их использовать [69, 71, 72].

Другой движущий фактор языкового развития — ситуативность речевого высказывания, т.к. наглядность и понятность ситуации обеспечивает правильное (или почти правильное) понимание ребенком речи взрослого [57, 73]. До определенного возраста, такие грамматические маркеры как флексии, суффиксы и другие способы маркировки морфологических значений, не анализируются ребенком, однако, благодаря ситуативности речи и ограниченности ее тематики семантически однотипные высказывания осмысливаются, закрепляются в сознании ребенка, а их ключевые элементы, интонационно выделяемые взрослыми, встраиваются в индивидуальную языковую систему, запоминаются [73]. По мнению *С.Н. Цейтлин* [73] на первом-втором году жизни ребенок воспринимает речь взрослых людей, но

еще не может полностью уловить ее содержание. Таким образом, даже давая правильные ответы на правильные посылки взрослых, ребенок может продуцировать эти правильные ответы, используя накопленную статистику, не всегда подтверждая полное овладение тем или иным языковым инструментом.

Третьим важным фактором развития речи является частотность языковых единиц в речевом окружении ребенка. Например, возраст освоения пассивного залога сильно различается в разных языках, поскольку частота встречаемости соответствующих конструкций влияет на их усвоение [74–76]. Дети, говорящие на языках, в которых пассивный залог встречается чаще, усваивают его раньше [72, 77, 78]. Так, например, представители инуитской языковой группы (говорящие на инуктитуте) начинают использовать пассивные конструкции в возрасте двух лет [77]. В русском языке показано использование пассивных конструкций на случайном уровне от четырех до пяти лет [79, 80], тогда как в иврите — в восемь лет [81].

Таким образом, на каждом временном отрезке развития компоненты языковой системы формируются параллельно, хотя и с разной скоростью и могут обеспечиваться разными нейрофизиологическими механизмами. Так, при анализе сложных конструкций в ситуации несформированности дефинитивного уровня обработки синтаксических маркеров ребенок может адекватно реагировать на высказывание, опираясь на наглядные образы. Это приводит к мысли, что существуют разные стратегии анализа сложных грамматических конструкций, которые обеспечиваются разными нейрофизиологическими механизмами и отличающиеся вероятностью правильного понимания высказывания. Смена стратегии на более эффективную обусловлена, с одной стороны, морфо-функциональным развитием мозга, а с другой — накоплением языкового опыта.

Развитие анатомо-физиологических основ понимания речи в онтогенезе

Речь является самой филогенетически молодой когнитивной функцией человека. Это позволяет предположить, что физиологические механизмы, обеспечивающие вербальную деятельность, отличаются высокой вариативностью, т.е. один и тот же результат деятельности может быть достигнут разными путями, с опорой на разные нервные сети. Существует как минимум две гипотезы, относительно того как при восприятии сложных предложений может разрешаться ситуация неоднозначности относительно определения субъекта действия. 1) Решение о смысле предложения выносится на основе анализа синтаксических маркеров. 2) Неоднозначность устраняется с помощью общих механизмов управляющего контроля, которые регулируют разрешение конфликтов восприятия не только язы-

ковой, но и любой другой информации [47]. Последний механизм, по-видимому, позволяет анализировать как семантику (например, признаки одушевленности), так и контекст ситуации в целом, апеллировать к наглядным образам и т.п. Вероятно, эти два процесса не конкурируют, а взаимодополняют друг друга. Мы показали, что навык понимания пассивного залога формируется в разное время у детей, говорящих на разных языках, в то время как темпы развития их мозга, скорее всего, не слишком отличаются. Таким образом, один и тот же навык — анализ пассивного залога — у детей, которые осваивают его в разном возрасте, реализуется мозговыми системами, находящимися на разном уровне развития. Кроме того, с возрастом происходит переключение с одного механизма реанализа предложения на другой [82], что косвенно подтверждается данными поведенческих исследований: при вынесении суждения о смысле предложения дошкольники опираются на семантические маркеры, такие как признаки одушевленности, а с возрастом происходит переключение на анализ синтаксических маркеров [83, 84]. Далее мы попробуем рассмотреть, с какими перестройками анатомии и физиологии мозга это может быть связано.

Известно, что динамика изменений объема серого вещества у человека напоминает перевернутую букву “U” [85]: он резко увеличивается до 6 лет, достигая к этому возрасту около 90% от максимальных показателей, затем постепенно нарастает до 9–12 лет, а после подросткового возраста объем серого вещества начинает снижаться [85–88]. Увеличение объема серого вещества обусловлено ростом тел нейронов, дендритов, и увеличением количества синапсов, а снижение — синаптическим прунингом, а также прогрессирующей миелинизацией [88, 89]. В разных долях мозга максимальный объем серого вещества достигается в разное время: в теменной и лобной долях существенно раньше, чем в височной. Кроме того, существует зональная специфика созревания коры мозга. Области, обеспечивающие сенсорные и моторные функции, созревают раньше, чем ассоциативная кора [89, 90]. В теменной доле позже всего созревает нижняя теменная доля, расположенная на границе с височной и затылочной долями (приблизительно в 9 лет), в лобной доле позже всего формируется дорзолатеральная префронтальная и поясная кора (приблизительно в 10.5 лет), а в височной доле — верхняя височная извилина, борозда (в 15 лет) и кора островка (до 18 лет) [89, 90]. Стоит отметить, что у девочек пик объема серого вещества достигается приблизительно на 1–2 года раньше, чем у мальчиков [85, 86]. Кроме того, как минимум, начиная с 7 лет толщина вентро-латеральной префронтальной, задневисочной и теменной-височной (*lateral parietal*) коры правого полушария у мальчиков достоверно больше, чем у девочек [91]. Таким образом, несмотря на то, что объем серого

вещества мозга к 6 годам достигает уже 90% от своего максимума, развитие областей коры, обеспечивающих обработку речи, таких как нижняя теменная и префронтальная кора, и особенно верхняя височная извилина, продолжается и в школьном возрасте.

Наряду с созреванием коры мозга меняется и связанный с анализом предложений характер нейрональной активации. *L.J. Weiss-Croft* и *T. Baldeweg* на основе систематического анализа онтогенетических фМРТ-исследований пришли к выводу, что с возрастом повышается активация в области средней височной и верхней височной извилины как слева, так и справа и снижается активация в области поясной коры [92]. При более дифференцированном исследовании активации мозга, связанной с анализом семантических и синтаксических характеристик предложений, обнаружено, что у детей 3–4 лет при выполнении обоих типов заданий активировались одни и те же зоны средней и задней части левой верхней височной извилины. В возрасте 6–7 лет в ответ на анализ синтаксически сложных предложений начинает специфически активироваться задняя часть верхней височной извилины, а в ответ на анализ семантической информации — средняя часть верхней височной извилины. В то же время, существуют зоны, активирующиеся при выполнении обоих видов деятельности — средняя часть верхней височной борозды и извилины [93]. Наличие вышеописанной специфической активации при анализе синтаксиса, позволяет предположить использование морфосинтаксической информации для анализа предложений уже в возрасте 6–7 лет. Более того, уровень активации в задней части верхневисочной извилины коррелирует с успешностью анализа синтаксических признаков [83]. У детей 9–10 лет зоны анализа семантики “смещаются” в область передней части верхней височной извилины и борозды [93]. Активация в области левой нижней лобной извилины при анализе синтаксиса обнаруживается по разным данным с либо с 7 [94], или с 9–10 лет [93]. Это соотносится с данными морфологии о том, что формирование цитоархитектоники *pars opercularis* и *pars triangularis* заканчивается только к 7 годам [95]. Однако у младших школьников при анализе предложений активируются как *pars opercularis*, так и *pars triangularis* [93, 94]. Во взрослом возрасте активация в процессе анализа синтаксиса обнаруживается преимущественно *pars opercularis* [2, 94] левого полушария, а при анализе семантики — в *pars triangularis* и *pars orbitalis* левого полушария, а также в *pars orbitalis* [92]. Такая дифференциация областей активации в нижней лобной извилине может быть обусловлена развитием проводящих путей мозга [94].

Динамика изменений объема белого вещества также напоминает перевернутую букву “U”, однако пиковые показатели объема белого вещества достигаются гораздо позже, чем серого, приблизительно к 30 годам [96, 97]. Известно, что сначала миелинизируются сенсорные пути, затем дви-

гательные и позже всего ассоциативные [89]. В данном обзоре можно ограничиться рассмотрением ассоциативных проводящих путей, осуществляющих связь речевых зон в височных, лобных и теменных долях мозга. Данные диффузионно-тензорной МРТ (*DTI*) показали, что развитие дорсального и вентрального путей обработки речи происходит в разные периоды онтогенеза. Основными проводящими путями вентрального тракта являются система проводящих путей наружной капсулы (*extreme capsule fiber system*) и крючковидный (унцинатный) пучок. Оба этих тракта, соединяющих височную кору с нижней лобной извилиной, присутствует уже у новорожденных [98, 99]. Однако количество пучков белого вещества, которые оканчиваются в зоне Брока, у новорожденных существенно меньше, чем у семилетних детей, а у семилетних детей, в свою очередь, существенно меньше, чем у взрослых. Кроме того, если у новорожденных система проводящих путей наружной капсулы связывает височную кору только со средней лобной извилиной, то у семилетних детей и взрослых ее терминали распространяются существенно дальше, вплоть до премоторной коры [100]. Дорсальный путь, как известно, имеет две терминали в лобной доле мозга: первая — в премоторной коре, которая, по-видимому, обеспечивает аудиомоторную интеграцию, необходимую для овладения языком [2], вторая — в *pars opercularis* нижней лобной извилины, которая поддерживает сложные лингвистические функции [94]. Часть верхнего продольного пучка, соединяющая височную и премоторную кору, детектируется уже у новорожденных детей, в то время как дугообразный пучок, соединяющий височную кору с 44 полем Бродмана, т.е. с зоной Брока, у новорожденных еще не детектируется методом *DTI* [99]. Показано, что дугообразный пучок обнаруживается у шестилетних детей, однако в этом возрасте объем белого вещества дугообразного и верхнего продольного пучков все еще существенно меньше, чем у взрослых, особенно тех их частей, которые находятся ближе к задневисочной коре [94, 101].

Неполная сформированность взаимосвязи языковых зон лобной и височных долей левого полушария мозга обнаруживается у детей и при анализе функциональной коннективности [102, 103]. Показано, что в состоянии покоя у пяти- и шестилетних детей преобладают межполушарные связи между областями мозга, тогда как у взрослых — внутримушарные связи, особенно между нижней лобной извилиной и задней частью верхней височной извилины. При этом интересно, что уровень корреляции активности задневисочной и нижней лобной коры у детей положительно связан с успешностью понимания ими синтаксически сложных предложений [102, 103]. Аналогичные результаты относительно изменения функциональной коннективности с возрастом были получены для вербальной деятельности. Если у взрослых во время

анализа предложений выявляется сильная связь между нижней лобной извилиной с задней частью верхней височной извилины левого полушария, то у шестилетних детей преобладают межполушарные функциональные связи, в основном между верхними височными областями [104]. Тем не менее, с возрастом от 3 трех до 6 лет возрастает сила связи между задней частью левой верхней височной извилины и левой нижней лобной извилиной, кроме того, если у трехлетних детей выявлена функциональная связь левой верхней височной извилины в основном с 45 полем Бродмана, то у детей шести лет сила связи с 44 полем Бродмана уже больше, чем с 45 [82]. Все эти данные указывают на то, что с возрастом усиливается функциональное взаимодействие между лобной и височной областями в левом полушарии.

Таким образом, структурные и функциональные связи, составляющие вентральный путь обработки речи, присутствуют уже у новорожденных, в то время как связи, составляющие дорсальный тракт формируются несколько позже. Поскольку считается, что обработка синтаксиса, особенно в сложных предложениях, обеспечивается именно дорсальным трактом [11], можно предположить, что интенсивное развитие этих связей после 6–7 лет делает возможным переход ребенка на новый, более продуктивный уровень функционирования языковой системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с моделью анализа предложений, сформулированной А. Friederici, сложные грамматические конструкции, например такие, где содержится пассивный залог или обратный порядок слов, требуют реанализа информации, в ходе которого происходит интеграция семантической и синтаксической информации с опорой на контекст. В ходе анализа данных о нейрофизиологических механизмах реанализа мы описали зоны мозга, которые у взрослых вовлечены в обработку всех типов предложений, затем сравнили у взрослых активацию мозга при анализе синтаксически простых и сложных конструкций. Оказалось, что при анализе синтаксически сложных предложений активация наблюдается в тех же зонах мозга, что и при анализе простых, отличия проявляются лишь в степени активации структур левого полушария мозга, прежде всего, средней височной извилины, нижней лобной извилины и угловой извилины. Поэтому мы выдвинули гипотезу, что процессы реанализа связаны с прохождением дополнительного цикла возбуждения по тем же сетям, которые осуществляют анализ семантики и синтаксиса. Однако, до сих пор, остается невыясненным вопрос, каким образом или какими структурами запускается дополнительный цикл возбуждения в нейронных сетях. Также мы рассмотрели возраст формирования навыка понимания пассивного залога, и выяснили, что он отличается у детей, говорящих на разных язы-

ках, и зависит от таких параметров, как прагматическая роль, ситуативность речевого высказывания, а также частотность употребления данных конструкций. Поскольку навык понимания пассивного залога у детей, говорящих на разных языках, формируется в разное время, а темповые характеристики развития мозга универсальны для вида *Homo sapiens*, мы предположили, что в разном возрасте нервные сети, обеспечивающие анализ, различаются. Установлено, что, если связи между церебральными структурами, поддерживающими анализ семантики, присутствуют уже при рождении, то сети, отвечающие за анализ синтаксиса, формируются существенно позже, после 6–7 лет. Поэтому можно предположить, что в более раннем возрасте анализ предложений, содержащих пассивный залог, основывается на общих механизмах когнитивного контроля, позволяющих анализировать как семантику (например, признаки одушевленности, размер персонажа и пр.), так и контекст ситуации в целом, а способность выделять и анализировать синтаксические маркеры появляется лишь после 6–7 лет, когда у детей формируется дорсальный путь обработки речи.

Финансирование работы. Работа поддержана РФФИ (грант А 19-013-00923).

Благодарности. Авторы выражают благодарность О.В. Кручининой за помощь в работе над статьей.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирвиш М. Насколько линейно упорядоченной является языковая обработка? Новое в зарубежной лингвистике. Вып XXIII. М.: Прогресс, 1988. С. 93.
2. Friederici A.D. The Brain Basis of Language Processing: From Structure to function // *Physiological Reviews*. 2011. V. 91. № 4. P. 1357.
3. Лурия А.П. Язык и сознание / Под редакцией Хомской Е.Д. Ростов н/Д.: Феникс, 1998. 461 с.
4. Ахутина Т.В., Величковский Б.М., Кемпе В. Семантический синтаксис и ориентация на порядок слов в онтогенезе / Семантика речевой деятельности. М.: Наука, 1988. С. 5.
5. Ахутина Т.В. Порождение речи. Нейролингвистический анализ синтаксиса. М.: Изд-во МГУ, 1989. 218 с.
6. Abbot-Smith K., Chang F., Rowland C. et al. Do two and three year old children use an incremental first-NP-as-agent bias to process active transitive and passive sentences?: A permutation analysis // *PLoS One*. 2017. V. 12. № 10. P. e0186129.
7. Статников А.И. Синдромный анализ трудностей в понимании детьми логико-грамматических конструкций // *Национальный психологический журнал*. 2015. № 2(18). С. 77.
8. Ахутина Т.В., Корнеев А.А., Матвеева Е.Ю. Возрастная динамика понимания логико-граммати-

- ческих конструкций у младших школьников и ее мозговые механизмы // Специальное образование. 2017. № 3(47). С. 15.
9. *Hickok G., Poeppel D.* Dorsal and ventral streams: a framework for understanding aspects of the functional anatomy of language // *Cognition*. 2004. V. 92. № 1–2. P. 67.
 10. *Hickok G., Poeppel D.* The cortical organization of speech processing // *Nat. Rev. Neurosci.* 2007. V. 8. № 5. P. 393.
 11. *Friederici A.D.* White-matter pathways for speech and language processing // *Handb. Clin. Neurol.* 2015. V. 129. P. 177.
 12. *Nasios G., Dardiotis E., Messinis L.* From Broca and Wernicke to the Neuromodulation Era: Insights of Brain Language Networks for Neurorehabilitation // *Behav. Neurol.* 2019. V. 2019. Article ID 9894571. 10 p.
 13. *Gow D.W., Jr.* The cortical organization of lexical knowledge: a dual lexicon model of spoken language processing // *Brain Lang.* 2012. V. 121. № 3. P. 273.
 14. *Hickok G., Poeppel D.* Neural basis of speech perception // *Handb. Clin. Neurol.* 2015. V. 129. P. 149.
 15. *Zaehle T., Geiser E., Alter K. et al.* Segmental processing in the human auditory dorsal stream // *Brain Res.* 2008. V. 1220. P. 179.
 16. *Vigneau M., Beaucousin V., Hervé P.Y. et al.* Meta-analyzing left hemisphere language areas: Phonology, semantics, and sentence processing // *NeuroImage*. 2005. V. 30. № 4. P. 1414.
 17. *Vigneau M., Beaucousin V., Hervé P.-Y. et al.* What is right-hemisphere contribution to phonological, lexico-semantic, and sentence processing? // *NeuroImage*. 2011. V. 54. № 1. P. 577.
 18. *Walenski M., Europa E., Caplan D. et al.* Neural networks for sentence comprehension and production: An ALE-based meta-analysis of neuroimaging studies // *Human Brain Mapping*. 2019. <https://doi.org/10.1002/hbm.24523>
 19. *Koechlin E., Jubault T.* Broca's area and the hierarchical organization of human behavior // *Neuron*. 2006. V. 50. № 6. P. 963.
 20. *Rogalsky C., Hickok G.* The role of Broca's area in sentence comprehension // *J. Cogn. Neurosci.* 2011. V. 23. № 7. P. 1664.
 21. *Adank P.* Design choices in imaging speech comprehension: An activation likelihood estimation (ALE) meta-analysis // *NeuroImage*. 2012. V. 63. № 3. P. 1601.
 22. *Hertrich I., Dietrich S., Ackermann H.* The role of the supplementary motor area for speech and language processing // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2016. V. 68. P. 602.
 23. *Pulvermüller F.* Semantic embodiment, disembedding or misembedding? In search of meaning in modules and neuron circuits // *Brain Lang.* 2013. V. 127. № 1. P. 86.
 24. *Jirak D., Menz M.M., Buccino G. et al.* Grasping language – A short story on embodiment // *Conscious Cogn.* 2010. V. 19. № 3. P. 711.
 25. *Sakreida K., Scorolli C., Menz M.M. et al.* Are abstract action words embodied? An fMRI investigation at the interface between language and motor cognition // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. V. 7. P. 125.
 26. *Yang J., Shu H.* Involvement of the Motor System in Comprehension of Non-Literal Action Language: A Meta-Analysis Study // *Brain Topogr.* 2016. V. 29. № 1. P. 94.
 27. *Thompson C.K., Meltzer-Asscher A.* Neurocognitive mechanisms of verb argument structure processing / Structuring the Argument: Multidisciplinary Research on Verb Argument Structure // Eds. Bachrach A., Roy I., Stockall L. Amsterdam: John Benjamins, 2014. P. 141.
 28. *Humphries C., Binder J.R., Medler D.A. et al.* Syntactic and semantic modulation of neural activity during auditory sentence comprehension // *J. Cogn. Neurosci.* 2006. V. 18. № 4. P. 665.
 29. *Mollo G., Jefferies E., Cornelissen P., Gennari S.P.* Context-dependent lexical ambiguity resolution: MEG evidence for the time-course of activity in left inferior frontal gyrus and posterior middle temporal gyrus // *Brain Lang.* 2018. V. 177–178. P. 23.
 30. *Davey J., Thompson H.E., Hallam G. et al.* Exploring the role of the posterior middle temporal gyrus in semantic cognition: Integration of anterior temporal lobe with executive processes // *Neuroimage*. 2016. V. 137. P. 165.
 31. *Jefferies E.* The neural basis of semantic cognition: converging evidence from neuropsychology, neuroimaging and TMS // *Cortex*. 2013. V. 49. № 3. P. 611.
 32. *Tyler L.K., Randall B., Stamatakis E.A.* Cortical differentiation for nouns and verbs depends on grammatical markers // *J. Cogn. Neurosci.* 2008. V. 20. № 8. P. 1381.
 33. *Elli G.V., Lane C., Bedny M.A.* Double Dissociation in Sensitivity to Verb and Noun Semantics Across Cortical Networks // *Cereb. Cortex*. 2019. V. 29. № 11. P. 4803.
 34. *Weiner K.S., Zilles K.* The anatomical and functional specialization of the fusiform gyrus // *Neuropsychologia*. 2016. V. 83. P. 48.
 35. *Cohen L., Lehericy S., Chochon F. et al.* Language-specific tuning of visual cortex? Functional properties of the Visual Word Form Area // *Brain*. 2002. V. 125. Pt. 5. P. 1054.
 36. *Bonilha L., Hillis A.E., Hickok G. et al.* Temporal Lobe Networks Supporting the Comprehension of Spoken Words // *Brain*. 2017. V. 140. № 9. P. 2370.
 37. *Forseth K.J., Kadipasaoglu C.M., Conner C.R. et al.* A lexical semantic hub for heteromodal naming in middle fusiform gyrus // *Brain*. 2018. V. 141. № 7. P. 2112.
 38. *Seghier M.L.* The angular gyrus: multiple functions and multiple subdivisions // *Neuroscientist*. 2013. V. 19. № 1. P. 43.
 39. *Obert A., Gierski F., Calmus A. et al.* Differential bilateral involvement of the parietal gyrus during predicative metaphor processing: an auditory fMRI study // *Brain Lang.* 2014. V. 137. P. 112.
 40. *Burks J.D., Boettcher L.B., Conner A.K. et al.* White matter connections of the inferior parietal lobule: A study of surgical anatomy // *Brain Behav.* 2017. V. 7. № 4. P. e00640.
 41. *Rosselli M., Ardila A., Bernal B.* Angular gyrus connectivity model for language: a functional neuroimaging meta-analysis // *Rev. Neurol.* 2015. V. 60. № 11. P. 495.
 42. *Yue Q., Zhang L., Xu G. et al.* Task-modulated activation and functional connectivity of the temporal and frontal areas during speech comprehension // *Neuroscience*. 2013. V. 237. P. 87.

43. *Progovac L., Rakhlin N., Angell W. et al.* Neural Correlates of Syntax and Proto-Syntax: Evolutionary Dimension // *Front. Psychol.* 2018. V. 9. P. 2415.
44. *Zaccarella E., Schell M., Friederici A.D.* Reviewing the functional basis of the syntactic Merge mechanism for language: A coordinate-based activation likelihood estimation meta-analysis // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2017. V. 80. P. 646.
45. *Catani M., Forkel S., Thiebaut de Schotten M.* Asymmetry of White Matter Pathways / *The Two Halves of the Brain.* Cambridge: MIT Press, 2009. Chap. 7. P. 177.
46. *Panesar S.S., Yeh F.C., Jacquesson T. et al.* A Quantitative Tractography Study Into the Connectivity, Segmentation and Laterality of the Human Inferior Longitudinal Fasciculus // *Front. Neuroanat.* 2018. V. 12. P. 47.
47. *Zheng Y., Xiaolin Zh.* Conflict control during sentence comprehension: fMRI evidence // *NeuroImage.* 2009. V. 48. № 1. P. 280.
48. *Europa E., Gitelman D.R., Kiran S. et al.* Neural Connectivity in Syntactic Movement Processing // *Front. Hum. Neurosci.* 2019. V. 13. P. 27.
49. *Yokoyama S., Watanabe J., Iwata K. et al.* Is Broca's area involved in the processing of passive sentences? An event-related fMRI study // *Neuropsychologia.* 2007. V. 45. № 5. P. 989.
50. *Meyer L., Friederici A.D.* Neural systems underlying the processing of complex sentences / *Neurobiology of Language* // Eds. Hickok G., Small S. Amsterdam (The Netherlands) and Boston (Massachusetts): Academic Press, 2015. P. 597.
51. *Цейтлин С.Н.* К вопросу о формировании промежуточной языковой системы ребенка: наблюдения над освоением отрицательных конструкций // *Acta Linguistica Petropolitana. Труды института лингвистических исследований.* 2017. Т. 13. Ч. 3. С. 623.
52. *Выготский Л.С.* Развитие активного внимания в детском возрасте / *Хрестоматия по вниманию.* М.: МГУ, 1976. С. 184.
53. *Гвоздев А.Н.* Вопросы изучения детской речи. СПб.: Детство, 2007. 472 с.
54. *Цейтлин С.Н.* Очерки по словообразованию и формообразованию в детской речи М.: Знак, 2009. 592 с.
55. *Бодуэн де Куртенэ И.А.* Опыт теории фонетических альтернатив / *Избранные труды по общему языкознанию.* М.: Изд-во АН СССР, 1963. Т. 1. 384 с.
56. *Дресслер В.* Об объяснительной силе естественной морфологии // *Вопросы языкознания.* 1986. № 5. С. 33.
57. *Слобин Д.* Когнитивные предпосылки развития грамматики / *Психолингвистика: Сб. стат. Сост. А. Шахнарович.* М.: Прогресс, 1984. 293 с.
58. *Tomasello M.* Constructing a Language / *A Used-Based Theory of Language Acquisition.* Cambridge, MA: Harvard University Press, 2003. P. 408.
59. *Brown R.* A first language: the early stages. Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 1973. P. 437.
60. *Елисеева М.Б.* Становление индивидуальной языковой системы ребенка. М.: Языки славянской культуры, 2014. 344 с. *Eliseeva M.B.* [Stanovlenie individual'noi iazykovoi sistemy rebenka. The development of the individual language system of a child.] М.: Iazyki slavianskoi kul'tury, 2014. 344 p.
61. *Касевич В.Б.* Онтолингвистика: типология и языковые правила // *Язык и речевая деятельность.* 1998. Т. 1. С. 31.
62. *Леонтьев А.А.* Основы психолингвистики. М.: Смысл, 1997. 287 с.
63. *Шахнарович А.М.* Психолингвистические проблемы овладения общением в онтогенезе / *Сорокин Ю.А., Тарасов Е.Ф., Шахнарович А.М.* Теоретические и прикладные проблемы речевого общения. М.: Наука, 1979. 328 с.
64. *Дмитриевский А.А.* Практические заметки о русском синтаксисе // *Филологические записки.* 1877. Т. IV. С. 3.
65. *Tesnière L.* *Eléments de syntaxe structurale.* Paris: Klincksieck, 1959. 690 p.
66. *Гагарина Н.В.* Становление грамматических категорий русского глагола в детской речи. СПб.: Наука, 2008. 275 с.
67. *Tomasello M.* Do young children have adult syntactic competence? // *Cognition.* 2000. V. 74. № 3. P. 209.
68. *Слобин Д., Грин Дж.* Психолингвистика. М.: Прогресс, 1976. 336 с.
69. *Цейтлин С.Н.* Язык и ребенок: Лингвистика детской речи: учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений. М.: ВЛАДОС, 2000. 240 с.
70. *Guillemard D., Galperina E., Panasevich E. et al.* EEG-correlates of complex syntactic constructions processing in Russian-speaking children of 5–6 years old // *Clinical Pathophysiology.* 2016. V. 22. № 1. P. 80.
71. *Эльконин Д.Б.* Детская психология: учебное пособие для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2004. 366 с.
72. *Hoff E., Shatz M.* *Blackwell Handbook of Language Development.* Oxford: Blackwell, 2007. 520 p.
73. *Цейтлин С.Н.* Очерки по словообразованию и формообразованию в детской речи М.: Знак, 2009. 592 с.
74. *Ostvik L., Eikeseth S., Klintwall L.* Grammatical constructions in typical developing children: effects of explicit reinforcement, automatic reinforcement and parity // *Anal. Verbal. Behav.* 2012. V. 28. № 1. P. 73.
75. *Vasilyeva M., Waterfall H.* Beyond syntactic priming: evidence for activation of alternative syntactic structures // *J. Child Lang.* 2012. V. 39. № 2. P. 258.
76. *Wright A.N.* The role of modeling and automatic reinforcement in the construction of the passive voice // *Anal. Verbal. Behav.* 2006. V. 22. P. 153.
77. *Allen S.E.M., Crago M.B.* Early passive acquisition in Inuktitut // *J. Child Lang.* 1996. V. 23. № 1. P. 129.
78. *Demuth K.* Subject, topic and Sesotho passive // *J. Child. Lang.* 1990. V. 17. № 1. P. 67.
79. *Fox D., Grodzinsky Y.* Children's Passive: A View from the By-Phrase // *Linguistic Inquiry.* 1998. V. 29. № 2. P. 311.
80. *Vasilyeva M., Huttenlocher J., Waterfall H.* Effects of language intervention on syntactic skill levels of pre-schoolers // *Dev. Psychol.* 2006. V. 42. № 1. P. 164.
81. *Berman R.A.* The acquisition of Hebrew / *The cross-linguistic study of language acquisition* // Ed. Slobin D.I. N.J.: Hillsdale Erlbaum, 1985. V. 1. P. 255.
82. *Vissiennon K., Friederici A.D., Brauer J. et al.* Functional organization of the language network in three- and six-year-old children // *Neuropsychologia.* 2017. V. 98. P. 24.

83. Wu C.Y., Vissienon K., Friederici A.D. et al. Preschoolers' brains rely on semantic cues prior to the mastery of syntax during sentence comprehension // *NeuroImage*. 2016. V. 126. P. 256.
84. Strotseva-Feinschmidt A., Schipke C.S., Gunter T.C. et al. Young children's sentence comprehension: Neural correlates of syntax-semantic competition // *Brain Cogn.* 2019. V. 134. P. 110.
85. Giedd J.N., Raznahan A., Alexander-Bloch A. et al. Child Psychiatry Branch of the National Institute of Mental Health Longitudinal Structural Magnetic Resonance Imaging Study of Human Brain Development // *Neuropsychopharmacology*. 2015. V. 40. № 1. P. 43.
86. Tanaka C., Matsui M., Uematsu A. et al. Developmental Trajectories of the Fronto-Temporal Lobes from Infancy to Early Adulthood in Healthy Individuals // *Dev. Neurosci.* 2012. V. 34. № 6. P. 477.
87. Courchesne E., Chisum H.J., Townsend J. et al. Normal brain development and aging: quantitative analysis at *in vivo* MR imaging in healthy volunteers // *Radiology*. 2000. V. 216. № 3. P. 672.
88. Taki Y., Kawashima R. Brain development in childhood // *Open Neuroimag. J.* 2012. V. 6. P. 103.
89. Lenroot R.K., Giedd J.N. Brain development in children and adolescents: Insights from anatomical magnetic resonance imaging // *Neurosci. Biobehav. Rev.* 2006. V. 30. № 6. P. 718.
90. Shaw P., Kabani N.J., Lerch J.P. et al. Neurodevelopmental trajectories of the human cerebral cortex // *J. Neurosci.* 2008. V. 28. № 14. P. 3586.
91. Sowell E.R., Peterson B.S., Kan E. et al. Sex differences in cortical thickness mapped in 176 healthy individuals between 7 and 87 years of age // *Cereb. Cortex*. 2007. V. 17. № 7. P. 1550.
92. Weiss-Croft L.J., Baldeweg T. Maturation of language networks in children: A systematic review of 22 years of functional MRI // *NeuroImage*. 2015. V. 123 P. 269.
93. Skeide M.A., Brauer J., Friederici A.D. Syntax gradually segregates from semantics in the developing brain // *NeuroImage*. 2014. V. 100. P. 106.
94. Brauer J., Anwander A., Friederici A. Neuroanatomical Prerequisites for Language Functions in the Maturing Brain // *Cereb. Cortex*. 2011. V. 21. № 2. P. 459.
95. Judaš M., Ceganec M. Adult structure and development of the human fronto-opercular cerebral cortex (Broca's region) // *Clin. Linguist. Phon.* 2007. V. 21. № 11–12. P. 975.
96. Imperati D., Colcombe S., Kelly C. et al. Differential development of human brain white matter tracts // *PLoS One*. 2011. V. 6. № 8. P. e23437.
97. Lebel C., Beaulieu C. Longitudinal development of human brain wiring continues from childhood into adulthood // *J. Neurosci.* 2011. V. 31. № 30. P. 10937.
98. Dubois J., Hertz-Pannier L., Dehaene-Lambertz G. et al. Assessment of the early organization and maturation of infants' cerebral white matter fiber bundles: A feasibility study using quantitative diffusion tensor imaging and tractography // *NeuroImage*. 2006. V. 30. № 4. P. 1121.
99. Perani D., Saccuman M.C., Scifo P. et al. Neural language networks at birth // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 2011. V. 108. № 38. P. 16056.
100. Brauer J., Anwander A., Perani D. et al. Dorsal and ventral pathways in language development // *Brain Lang.* 2013. V. 127. № 2. P. 289.
101. Eluvathingal T.J., Hasan K.M., Kramer L. et al. Quantitative diffusion tensor tractography of association and projection fibers in normally developing children and adolescents // *Cereb. Cortex*. 2007. V. 17. № 12. P. 2760.
102. Xiao Y., Friederici A.D., Margulies D.S. et al. Development of a selective left-hemispheric fronto-temporal network for processing syntactic complexity in language comprehension // *Neuropsychologia*. 2016. V. 83. P. 274.
103. Xiao Y., Friederici A.D., Margulies D.S. et al. Longitudinal changes in resting-state fMRI from age 5 to age 6 years covary with language development // *Neuroimage*. 2016. V. 128. P. 116.
104. Friederici A.D., Brauer J., Lohmann G. Maturation of the language network: from inter- to intrahemispheric connectivities // *PLoS One*. 2011. V. 6. № 6. P. e20726.

Morpho-Functional Basis for Complex Sentence Processing in Adults and Children

E. P. Stankova^{a, *}, D. M. Guillemard^a, E. I. Galperina^{a, b}

^a*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry RAS, St. Petersburg, Russia*

^b*Saint Petersburg State Pediatric Medical University, St. Petersburg, Russia*

*E-mail: stankova.ekaterina@yandex.ru

This review discusses the neurophysiological basis of the analysis of complex sentence, such as passives or reverse word order sentences. We adhere to the hypothesis that the obligatory stage of complex sentence processing is based on the context analysis and integration of semantic and syntactic sentence features. The article compares brain activation during the analysis of complex sentences. We suppose that in adults the same brain regions are involved in the processing of syntactically complex and simple sentences, and only the degree of activation of cerebral structures is different (mostly of the left middle temporal gyrus, the left inferior frontal gyrus, and the left angular gyrus). The review describes the ontogenesis of brain zones involved in the sentence analysis, as well as the pathways connecting these zones. It was found that complex sentences processing mechanisms can change with age. The transition to a more productive reanalysis strategy based on the ability to use syntactic markers develops only after 6–7 years of age when the dorsal pathway of speech processing is formed.

Keywords: speech, sentence, passive voice, reverse word order, neurophysiological mechanisms, ontogenesis.