

ФИЗИОЛОГИЯ ВЫСШЕЙ НЕРВНОЙ (КОГНИТИВНОЙ)
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

УДК 159.91

НЕЙРОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ КОРРЕЛЯТЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ
ОБРАБОТКИ НУЛЕВОЙ МОРФЕМЫ: ДАННЫЕ
ВЫЗВАННЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ

© 2022 г. М. А. Алексеева^{1, *}, А. В. Мячиков^{1, 2}, Ю. Ю. Штыров³

¹Центр нейроэкономики и когнитивных исследований, Институт когнитивных нейронаук,
НИУ “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

²Департамент психологии, Нортумбрийский университет, Ньюкасл-апон-Тайн, Великобритания

³Центр функционально-интегративной нейронауки, Департамент клинической медицины,
Орхусский университет, Орхус, Дания

*e-mail: alexeevamaru8@gmail.com

Поступила в редакцию 15.03.2022 г.

После доработки 09.06.2022 г.

Принята к публикации 27.06.2022 г.

Функционирование языка как системы коммуникации описывается множеством лингвистических теорий, которые не всегда согласуются между собой и зачастую не опираются на когнитивные и/или нейробиологические данные. Одним из наиболее ярких примеров является предложенная теорией универсальной грамматики “нулевая морфема” – концепт, имеющий лишь абстрактное значение при отсутствии фонологической реализации (например, нулевое окончание существительных в некоторых падежах: ср. *стол-Ø* (Им. п.) vs. *стол-а* (Род. п.)). Чтобы проверить обработку нулевой морфемы мозгом, мы провели ЭЭГ-эксперимент, в котором испытуемым аудиально предъявлялись фразы с нулевыми (напр., *он купил-Ø*) или выраженными (*она купил-а*) глагольными окончаниями, с правильным и неправильным согласованием по роду между местоимением и глаголом (напр., *он купил-Ø* vs. **она купил-Ø*) и одиночные глаголы (*купил-Ø*) в качестве контрольного условия. Результаты анализа вызванных потенциалов показали усиление ответа мозга в условиях нарушения согласования нулевого окончания. Латентность данного ответа составляла ~200 мс, что соответствует компоненту ELAN, отражающему раннюю автоматическую обработку (морфо)синтаксической информации. Данные результаты могут объясняться теорией морфосинтаксического прайминга и указывают на наличие репрезентации нулевой морфемы (окончания) и ее активацию в процессе речевого восприятия.

Ключевые слова: обработка речи, нейролингвистика, языковые теории, нулевая морфема, ЭЭГ

DOI: 10.31857/S0044467722050033

ВВЕДЕНИЕ

Языковая система – один из сложнейших функциональных механизмов, позволяющий людям понимать друг друга и взаимодействовать между собой. Несмотря на наличие множества лингвистических теорий, объясняющих природу языковой способности и законы функционирования языка, всеобъемлющее понимание и изучение особенностей языковой системы человека должно опираться на знания о роли головного мозга в процессах анализа/восприятия речевой информации. Однако большинство существующих лингвистиче-

ских теорий не имеют подобной доказательной базы. В результате мы наблюдаем ряд абстрактных подходов и теорий, не имеющих экспериментального подтверждения. Одним из примеров “белых пятен” в лингвистической теории является *нулевая морфема*, поиск нейрофизиологических коррелятов которой и является целью настоящего исследования.

Впервые конструкт нулевой морфемы появляется в структуре словоизменения, разработанной Ноамом Хомским в 1965 году для его теории “универсальной грамматики” (*Universal Grammar Theory*; Chomsky, 2014).

Один из ярких примеров использования нулевой морфемы связан с падежным склонением: например, для обозначения падежа в русском языке используется выраженное окончание (напр., *стол-а* (Род. п.), *стол-у* (Дат. п.) и т.д.), однако его отсутствие у некоторых существительных (*стол* (Им. п.)) трактуется не как отсутствие падежа и соответствующего падежного окончания, а как нулевое окончание (*стол-Ø*), закрепленное в данном случае за центральным падежом – именительным. Согласно Хомскому, человеческий мозг содержит ограниченный набор конструкторов для организации языковой системы (базис, на который опирается универсальная грамматика Хомского), что в свою очередь означает, что все языки имеют общую структурную основу (набор правил, собственно и названный универсальной грамматикой). В итоге для приведения всех языковых выражений к единому структурному виду в эту систему неизбежно включается элемент без звуковой и графемной репрезентации и без фактического значения (т.е. имеющий только абстрактную синтаксическую функцию; Dahl, Fabregas, 2018). Однако такой уровень абстрактности концепта не может не вызывать целый ряд вопросов, для ответа на которые необходимо исследовать его нейрофизиологические корреляты. Тем не менее, экспериментальная проверка реальности существования нулевых морфем сталкивается с рядом ограничений и сложностей, связанных с: (1) неоднородностью сфер появления нулевой морфемы в разных языках, (2) разнообразием соответствующих языковых свойств и (3) отсутствием подходящих методик исследования.

Совершенно очевидно, что грамматически языки устроены по-разному, однако в них принято выделять универсальные элементы. В английском – языке со слабой флективной системой – невыраженный “нулевой” аффикс (окончание) распространен шире, чем выраженный (напр., инфинитив с нулевым аффиксом, считающийся глагольной основой, к которой прикрепляется ограниченный набор аффиксов для получения определенных форм глагола: напр., *walk-Ø*, *walk-s*, *walk-ed*). С другой стороны, языки с богатой флективной системой (напр., русский) в большинстве случаев характеризуются выраженными аффиксами (окончаниями). Это выражается, например, в том, что русскоязычные дети редко создают формы без выраженного окончания, в то время как англоговорящие

дети производят больше глагольных форм с невыраженным окончанием (нулевым) и чаще используют ошибочные немаркированные глагольные формы (Huams, 1987; Marchman, 1997). Можем ли мы, опираясь на эти данные, утверждать, что в одном языке (напр., английском) нет нулевого окончания, а в другом (напр., русском) оно есть, так как примеры с ошибками словоизменения в разных языках отражают разный подход к проблеме “нулевого окончания”? Среди прочих и этот вопрос остается открытым.

Несмотря на теоретически широкое использование нулевой морфемы, до сих пор нет надежных психолингвистических или нейролингвистических данных, подтверждающих факт реальной обработки этого элемента на уровне мозгового субстрата. Иван Саг и Жанет Фодор (Sag, Fodor, 1994) отмечают методологические трудности экспериментального изучения нулевой морфемы: до тех пор, пока мы не сможем отделить синтаксическую обработку от семантической, невозможно гарантировать даже *саму возможность наблюдения* нулевого элемента. То есть, даже если бы мы могли создать оптимальный синтаксический кросс-модальный эксперимент, его проведение не смогло бы обеспечить нас достаточной доказательной базой существования синтаксического пробела из-за включения общих *процессов синтаксического анализа*. Соответственно, из-за невозможности выделить обработку *непосредственно* нулевой морфемы (исходя из предпосылки, что она существует и обрабатывается) исследователям пока не удавалось найти подходящий экспериментальный метод.

Именно такие критические замечания можно высказать в отношении исследования грамматической обработки в зоне Брока, выполненного с использованием метода функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ; Sahin et al., 2006). В данной работе была рассмотрена роль зоны Брока в морфологической обработке разных видов словоизменения (регулярное, нерегулярное и нулевое) у существительных и глаголов. Условия включали повторение словоформы как контрольное условие, нулевое (*Every day they (to fade) fade; That is the (a fort) fort*) и выраженное словоизменение (*Yesterday they (to fade) faded; Those are the (a fort) forts*). Анализ данных эксперимента со скрытыми праймами при порождении речи (cued covert production task) выявил значимую акти-

вацию исследуемой зоны в условиях с нулевым словоизменением в ряде контрастов (выраженное > нулевое и исключение зон, связанных с фонологией, с помощью контрольного условия), вследствие чего данные результаты были представлены как доказательство обработки нулевого словоизменения. Однако, исходя из предположений Саг и Фодор (Sag, Fodor, 1994), полученным данным можно найти и другое объяснение: как указано выше, активация зоны головного мозга в определенный момент времени (в данном случае – после предъявления предполагаемой нулевой морфемы) не доказывает ее обработку как таковую, но может указывать на стандартный процесс морфологической обработки, который включает и другие уровни, такие как обработка основы слова, суффиксов и аффиксов, а также виды словоизменения – регулярное и нерегулярное, рассмотренные в статье. Кроме того, согласно моделям, постулирующим наличие двух путей морфосинтаксической обработки (dual route/dual system; см., напр., Pinker, 2015; Schremm et al., 2018, 2019), формы с нулевым словоизменением/словообразованием могут кодироваться целиком, в то время как выраженное словоизменение/словообразование разделяется на основу и соответствующий аффикс. Таким образом, обработка нулевых форм должна происходить автоматически по сравнению с выраженными формами, доступ к которым должен опираться на более глубокую морфосинтаксическую обработку.

Решению вопроса может помочь теория прайминга/преактивации, согласно которой при обработке предложения/фразы слово или морфема преактивирует (праймирует) дальнейшую обработку определенных морфосинтаксических характеристик последующих слов/морфем (Oltra-Massuet et al., 2017; Shtyrov et al., 2003). Например, местоимение женского рода *она* позволяет предсказать глагольное окончание женского рода (*она ходил-а*), но не среднего или мужского (*ходил-о, ходил-Ø* соответственно), что приводит к преактивации репрезентации соответствующей морфемы (-а) еще до ее появления и снижению необходимых ресурсов для ее активации в дальнейшем. Таким образом, появляется эффект преактивации/прайминга, который поддерживает и ускоряет процесс морфосинтаксической обработки. Этот эффект, как считается, лежит в основе ранней автоматической морфосинтаксической обработки, ко-

торая в ЭЭГ-экспериментах выражается появлением специфических компонентов вызванных потенциалов (ВП) уже на ранних этапах языковой обработки (начиная со 150 мс) – т.н. ранней левой фронтальной негативности (early left anterior negativity, ELAN) или синтаксической негативности рассогласования (syntactic mismatch negativity, sMMN; Fonteneau, 2013; Pulvermüller, Shtyrov, 2003; Shtyrov et al., 2003). Он выражается в более низкой амплитуде ELAN для согласованных морфем (*она ходил-а*) по сравнению с несогласованными (**он ходил-а*), где преактивация невозможна и ВП на “неожиданную” морфему достигает более высокой амплитуды, в то время как отсутствие преактивации какого-либо шаблона выражается в увеличении амплитуды из-за невозможности выбора правильного/неправильного согласования (Pulvermüller, Shtyrov, 2003). Следовательно, если нулевая морфема существует, факт ее обработки может быть доказан с помощью эффекта морфосинтаксического прайминга/пре-активации – если репрезентация нулевой морфемы имеет нейрофизиологические корреляты и активизируется в процессе морфосинтаксической обработки, это должно проявляться в модуляции ВП для нулевого окончания (*она *ходил-Ø*) точно так же, как и для выраженных окончаний (**он ходил-а*).

Помимо раннего эффекта ELAN/sMMN морфосинтаксическая обработка включает в себя и последующие компоненты ВП. Так, следующую за ELAN левую фронтальную негативность (left anterior negativity, LAN) с латентностью около 250–500 мс связывают со сложностями интеграции морфосинтаксической информации в рамках глобальной синтаксической структуры (Friederici, 2002; Porov et al., 2020). Одновременно с фронтальной негативностью морфосинтаксическая обработка также отражается в активности, регистрируемой в центральных и задних частях скальпа около 300–500 мс в виде компонента N400 (Hanna, Pulvermüller, 2018; Regel et al., 2017).

Беря во внимание возможную автоматичность обработки нулевого словоизменения, в данной работе мы сосредоточимся на ранних компонентах. На сегодняшний день уже исследованы основы ранней морфосинтаксической обработки на материале некоторых языков (английский: Fonteneau, 2013, Pulvermüller, Shtyrov, 2003; финский: Shtyrov et al., 2003; немецкий: Lucchese et al., 2017a, 2017b). Например, авторы исследования (Pulver-

müller, Shtyrov, 2003) рассматривали согласование глаголов по числу на примере множественного (нулевого, напр., *we walk-Ø*) и единственного (выраженного; *he walk-s*) суффикса в грамматически согласованных/несогласованных фразах с использованием пассивного экспериментального дизайна (т.е. с отвлечением внимания от аудиальных речевых стимулов), во время которого записывались данные электрической активности мозга при помощи электроэнцефалографии (ЭЭГ). Подобный пассивный дизайн широко используется в исследованиях ранней автоматической обработки (Hyder et al., 2020, 2021) и т.о. может быть применен и при анализе обработки нулевой морфемы на примере глагольного согласования по роду в русском языке (мужской — нулевой, женский — выраженный). В приведенном выше исследовании экспериментальный материал на английском языке основывался на глагольном изменении по числу, которое не идентично русскому (в русской грамматике маркируется множественное число, а единственное остается без изменений). Более того, изучение нулевых морфем не было целью эксперимента, в котором основной акцент был сделан на (рас)согласовании выраженных морфем числа (*he walk-s* vs. *we *walk-s*); при этом стимулы различались не только числом, но и лицом. Поэтому для оптимизации парадигмы изучения обработки нулевых морфем мы приняли решение отойти от словоизменения по числу и использовать согласование по роду, где выбор — мужское нулевое (*ходил-Ø*) или женское/среднее выраженное окончание (*ходила-а/ходила-о*) — аналогично присутствует и в других частях речи, например, у существительных и кратких прилагательных, что позволит в дальнейшем расширить стимульный материал. На основании статьи Pulvermüller, Shtyrov (2003) в настоящем исследовании нулевой гипотезой для глагольного согласования по роду было взято отсутствие обработки нулевого окончания. В таком случае мы не должны обнаружить разницу в нейронных ответах между условиями с нулевым окончанием — с правильным и неправильным согласованием — в раннем временном окне обработки лингвистической информации, что будет свидетельством неавтоматичности обработки нулевой морфемы или ее отсутствия и неотделимости от основы глагола. С другой стороны, согласно теории преактивации морфосинтаксической информации, наличие значимой разли-

цы между условиями внутри группы с нулевым окончанием (правильное, неправильное и контрольный одиночный глагол), где наблюдается уменьшение амплитуды для согласованных окончаний, а не увеличение ответа на ошибку рассогласования, стало бы подтверждением рабочей гипотезы о наличии нейрофизиологических коррелятов морфосинтаксической обработки нулевой морфемы. Такой результат явится подтверждением того, что нулевое окончание обрабатывается как отдельный элемент и, следовательно, действительно наличествует в ментальной языковой системе.

МЕТОДИКА

Участники

Выборка включала 23 человека — праворуких носителей русского языка как родного (возраст 18–30 лет, средний возраст = 20.25, ст. отклонение = 2.5, 11 девушек), не имеющих неврологических или психологических расстройств, с нормальным или скорректированным до нормального зрением и нормальным слухом. Все участники заполнили и подписали согласие на добровольное участие в исследовании. Исследовательский проект был одобрен этической комиссией университета (НИУ ВШЭ).

Материалы

Эксперимент задействовал два типа глагольных окончаний с изменением по роду согласования — мужское (-Ø) и женское (-а). Стимульный материал состоял из фраз типа “местоимение + глагол” с использованием местоимений “он” и “она” и 10 различных глаголов (*купить, велеть, запеть, надеть, побить, засесть, полить, попасть, пожать, суметь*) в формах мужского и женского рода прошедшего времени. Согласование глагола по роду с местоимением было правильным (50%) или неправильным (50%). Кроме того, в качестве контрольных стимулов было включено условие с одиночным глаголом без предшествующего местоимения. Ниже приведены примеры всех трех условий:

- 1) купил-Ø, купил-а (одиночный глагол без местоимения);
- 2) он купил-Ø, она купил-а (правильное согласование);
- 3) *он купил-а, *она купил-Ø (неправильное согласование).

Все стимулы были синтезированы в двух голосах – женском и мужском – с помощью программы Voice Reader Home 15: Test voices (Linguatex). Для контроля акустической вариативности между стимулами мы объединили синтезированные глагольные формы и местоимения во фразы вручную (средняя длительность одиночных глаголов: 663.65 мс; средняя длительность фраз с местоимением “он”: 1064.65; средняя длительность фраз с местоимением “она”: 1094.65) и записали в моно-формате .wav с помощью программы Audacity (Audacity Team) версии 2.3.0. Таким образом, следуя этой процедуре, мы обеспечили использование физически идентичных глагольных форм во всех условиях эксперимента, которые отличались между собой только комбинированием этих форм с местоимениями. Важно отметить, что после балансировки как лингвистических (морфология, длина, частота глагольных форм и биграмм, фонология), так и экстралингвистических характеристик (физические акустические особенности и голосовое сопровождение), экспериментальные стимулы отличались согласованием между субъектом и глаголом, индексированным по роду местоимения и маркированной глагольной форме.

Дизайн и процедура

Экспериментальные стимулы предъявлялись аудиально в псевдослучайном порядке с межстимульным интервалом, варьируемым в диапазоне 1000–1050 мс (с шагом в 10 мс). Каждая фраза, составленная с каждым из 10 разных глаголов, повторялась 10 раз двумя голосами – женским или мужским (всего 1200 предъявлений). Стимулы предъявлялись через наушники бинаурально на приемлемом для участников уровне громкости параллельно с предъявлением беззвучного отвлекающего видеоряда (мультфильма). Во время эксперимента записывалась электрическая активность головного мозга при помощи ЭЭГ. Эксперимент состоял из четырех 10-минутных блоков, между которыми у участников было время отдохнуть и ответить на вопросы по сюжету мультфильма. Аналогично дизайну, использовавшемуся в предыдущих исследованиях (напр., Pulvermüller et al., 2008), мы проинструктировали участников о необходимости следить за сюжетом мультфильма и не обращать внимания на аудио и ввели дополнительный контроль за соблюдением испы-

туемыми пассивного режима прослушивания экспериментального аудиоряда, в виде вопросов о содержимом видеоряда. Более того, помимо вопросов о содержании отвлекающего видеоряда после эксперимента участников просили отметить в списке, какие из форм глаголов они услышали и запомнили.

ЭЭГ запись и предобработка данных

Запись электрической активности мозга проводилась с помощью 128-канальной ЭЭГ-системы actiChamp (Brain Products GmbH, Германия) и 128 активных электродов, установленных в ЭЭГ-шлеме (EasyCap, Brain Products GmbH, Германия), с электродом Cz в качестве референта и заземляющим электродом на лобной части лица (10% от общей длины от инициатора до назисона), частотой дискретизации 1000 Гц и с использованием узкополосного режекторного фильтра для удаления помех электросети (50 Гц). Дополнительные электроды были установлены по бокам обоих глаз и под правым глазом для фиксации горизонтальной и вертикальной электроокулографической (ЭОГ) активности. Сопротивление сохранялось меньше 10 кΩ на протяжении всей записи.

Предобработка данных была произведена в программе BrainVision Analyzer 2.1.2 (Brain Products GmbH, Германия). Данные были отфильтрованы широкополосным фильтром в диапазоне 0.1–30 Гц. Для предварительной оценки качества данных использовались пороговые критерии отклонения амплитуды за пределы ± 100 мкВ и разницы более 100 мкВ между максимальным и минимальным значением. Для подавления окулографических артефактов использовался метод анализа независимых компонентов (ICA). Каналы с множественными артефактами, обнаруженные при первоначальной проверке данных, не включались в ICA и затем интерполировались методом триангуляции. Во время обработки данные перереферировались по отношению к общему среднему референту, посчитанному по всем ЭЭГ-каналам (без учета ЭОГ). Полученные ЭЭГ-данные были нарезаны для каждого из 12 под-условий (3 условия с 2 окончаниями в 2-х голосах) на эпохи и усреднены в интервале от –100 до 800 мс относительно начала глагольного суффикса прошедшего времени. Перед дальнейшим анализом проводилась отбраковка артефактов с использованием тех же критериев, что и при первоначальной

проверке. Итоговое количество эпох, усредненных для каждого условия у каждого испытуемого, составляло не менее 180 (то есть не менее 90% предъявлений).

Анализ

Для статистического анализа данных мы применили кластерный метод со случайными перестановками (cluster-based random permutation analysis; Maris, Oostenveld, 2007), чтобы определить, какие компоненты в каком временном окне были чувствительны к исследуемым эффектам. С помощью данного метода мы выявили пространственные кластеры электродов со статистически значимыми различиями в амплитуде между синтаксически правильными и неправильными фразами (как с мужским нулевым, так и с женским выраженным окончанием) взятыми как показатели зависимых переменных. Этот метод позволил нам определить кластеры значимых различий между условиями с учетом всех отведений на всей эпохе (450 временных отсчетов \times 124 электрода = 55800 точек выборки), при этом эффективно контролируя вероятность ошибки первого рода.

Процедура, используемая в рамках данного подхода, начинается с количественной оценки для каждой выборки (время по электродам) разницы между условиями с помощью зависимого выборочного *t*-теста (условия с правильным и неправильным согласованием и единичный глагол). Затем на основе пространственной и временной смежности формируются кластеры из всех точек выборки, уровень значимости на которых ниже или равен $\alpha = 0.05$. Для тех кластеров, которые имели минимум три смежные точки выборки, рассчитывалась статистика кластерного уровня (сумма всех *t*-значений внутри него). После этого с помощью процедуры случайной разбивки (в данной работе: количество случайно назначенных сегментов компонент = 1000) рассчитывалось нулевое распределение статистики кластерного уровня. После каждой рандомизации в нулевое распределение вносилась статистика кластерного уровня с наибольшим размером эффекта. Кластер считался значимым, если вероятность нулевой гипотезы была меньше или равна 0.05. Затем на втором этапе мы усредняли активность в течение установленного временного окна значимого кластера и снова делали попарные

сравнения, чтобы исследовать топографию эффектов.

В рамках данной работы мы проводили сравнения условий по родовому окончанию (мужскому и женскому): сравнения проводились попарно для сопоставимых условий. Мы провели анализ непосредственно в группе условий с ключевым для данного эксперимента мужским нулевым окончанием, а также в группе с женским окончанием, сравнив ВП в правильном, неправильном и контрольном условиях. Для анализа мы объединили данные двух голосов – мужского и женского, получив в итоге 6 условий для сравнения. В качестве контроля использовались сравнения с одиночным глаголом.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты поведенческих данных опросников по сюжету отвлекающего видеоряда и по выбору услышанных глаголов показали, что участники успешно соблюдали условия эксперимента. Так, участники сосредоточились на сюжете видеоряда (среднее знач. правильных ответов = 0.91; std. отклонение = 0.05; одновыборочный *t*-тест: *t*-статистика = 2.12; $p = 0.04$) и в целом не обращали внимание на аудиальную экспериментальную стимуляцию (среднее знач. правильных глагольных форм = 0.68; std. отклонение = 0.21; одновыборочный *t*-тест: *t*-статистика = 2.08; $p = 0.04$; среднее знач. выбранных филлеров = 0.07; std. отклонение = 0.07; одновыборочный *t*-тест: *t*-статистика = 2.5; $p = 0.01$).

Кластерный анализ с целью сравнения ВП, вызванных глаголами с мужским и женским окончаниями (правильного, неправильного и одиночного глагола), выявил статистически значимую разницу между женским и мужским окончаниями на протяжении всей эпохи (мужское правильное vs. женское правильное: $p = 0.002$; мужское неправильное vs. женское неправильное: $p = 0.002$; мужское одиночное vs. женское одиночное: $p < 0.0001$) во всей фронтально-центральной зоне скальпа, вызванную акустическими различиями между выраженным окончанием у женских глагольных форм (-а) и нулевым мужским. Данные результаты показали, что необходимо рассматривать эти два типа окончаний отдельно.

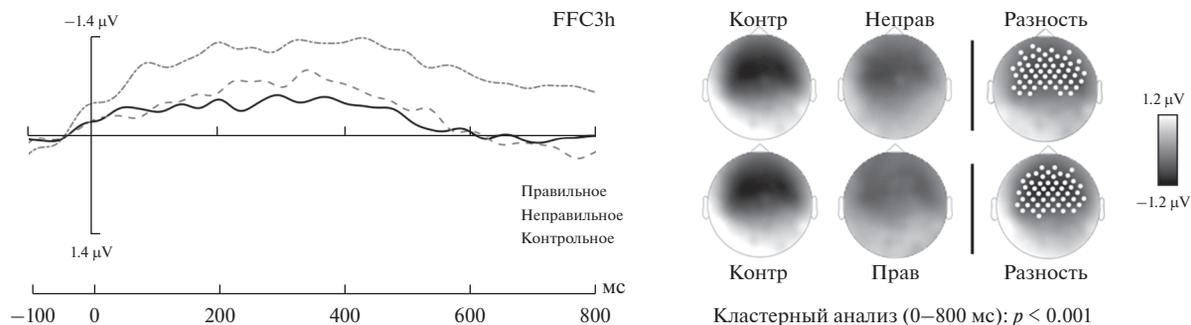


Рис. 1. Усредненная по группе динамика ВП по всем условиям, топограммы и результаты кластерного анализа, в котором сравнивались контрольное условие (единичный глагол) и правильное/неправильное условия с нулевым мужским окончанием. Полученные данные основаны на статистике, проведенной по всей длине эпохи. Кластеры каналов со значимыми попарными различиями отмечены на разностной топограмме (справа) белыми точками.

Fig. 1. Grand-average ERP dynamics, topographic maps, and cluster analysis results for the comparison of control condition (single verb) vs. correct/incorrect conditions with zero masculine ending. The obtained data are based on statistical comparisons carried out over the entire length of the epoch. Channel clusters with significant pairwise differences are marked as white dots on the difference map (on the right).

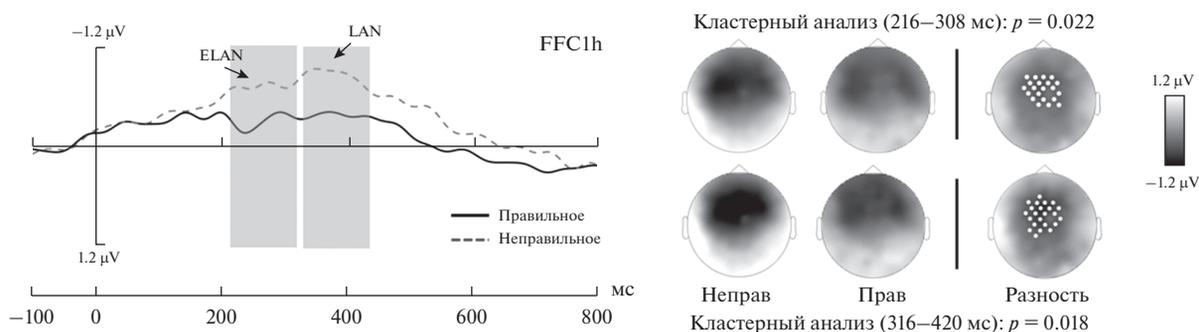


Рис. 2. Усредненная по группе динамика ВП по всем условиям, топограммы и результаты кластерного анализа, в котором сравнивались правильное и неправильное условия с нулевым мужским окончанием. Полученные данные основаны на статистике, проведенной по всей длине эпохи. Кластеры каналов со значимыми попарными различиями отмечены на разностной топограмме (справа) белыми точками.

Fig. 2. Grand-average ERP dynamics, topographic maps, and cluster analysis results for the comparison of correct vs. incorrect conditions with zero masculine ending. The obtained data are based on statistical comparisons carried out over the entire length of the epoch. Channel clusters with significant pairwise differences are marked as white dots on the difference map (on the right).

Мужское нулевое окончание

Условия с правильным, неправильным согласованием и условие с одиночным глаголом в мужском роде попарно сравнивались с помощью кластерного метода. Сравнение контрольного одиночного условия отдельно с правильным и неправильным условиями в обоих случаях выявило статистически значимые различия ($p < 0.001$) с центрально-фронтальной локализацией. Для обоих сравнений характерно повышение амплитуды потенциала в контрольном условии (рис. 1). Сравнение синтаксически правильных и неправиль-

ных условий показало ранние статистически значимые различия между условиями на интервале 216–308 мс после начала суффикса прошедшего времени ($p = 0.022$). Ответ на неправильное условие имел бóльшую амплитуду, чем на правильное. Наблюдаемый эффект имел центрально-фронтальное топографическое распределение, со сдвигом в левое полушарие, что сопоставимо с ранним компонентом ELAN (рис. 2). Этот эффект сохранился ($p = 0.018$) и на более позднем интервале 316–420 мс, сопоставимом с компонентом LAN с аналогичной локализацией.

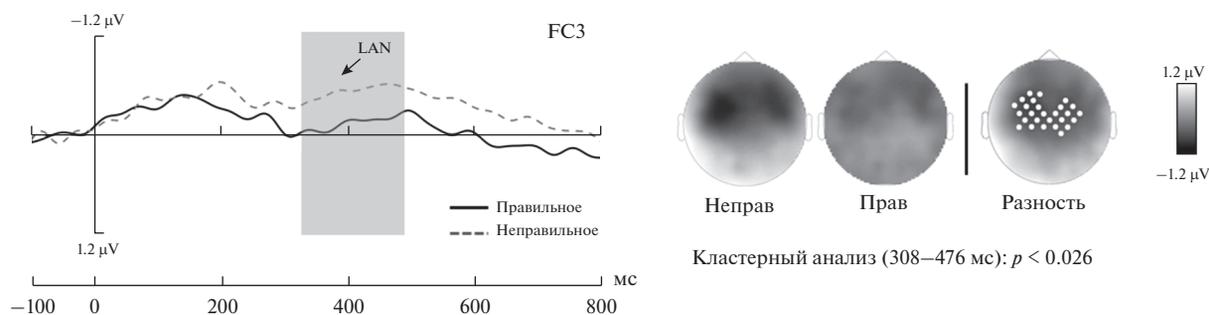


Рис. 3. Усредненная по группе динамика ВП по всем условиям, топограммы и результаты кластерного анализа, в котором сравнивались правильное и неправильное условия с выраженным женским окончанием. Полученные данные основаны на статистике, проведенной по всей длине эпохи. Кластеры каналов со значимыми попарными различиями отмечены на разностной топограмме (справа) белыми точками.
Fig. 3. Grand-average ERP dynamics, topographic maps, and cluster analysis results for the comparison of correct vs. incorrect conditions with overt feminine ending. The obtained data are based on statistical comparisons carried out over the entire length of the epoch. Channel clusters with significant pairwise differences are marked as white dots on the difference map (on the right).

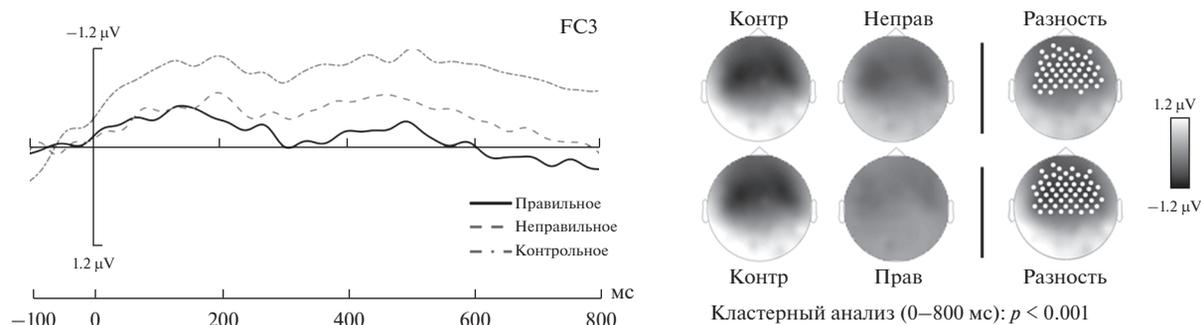


Рис. 4. Усредненная по группе динамика ВП по всем условиям, топограммы и результаты кластерного анализа, в котором сравнивались контрольное условие (единичный глагол) и правильное/неправильное условия с выраженным женским окончанием. Полученные данные основаны на статистике, проведенной по всей длине эпохи. Кластеры каналов со значимыми попарными различиями отмечены на разностной топограмме (справа) белыми точками.
Fig. 4. Grand-average ERP dynamics, topographic maps, and cluster analysis results for the comparison of control condition (single verb) vs. correct/incorrect conditions with overt feminine ending. The obtained data are based on statistical comparisons carried out over the entire length of the epoch. Channel clusters with significant pairwise differences are marked as white dots on the difference map (on the right).

Женское выраженное окончание

Аналогично анализу ВП на мужское окончание мы провели сравнения условий с женским правильным, неправильным согласованием и с одиночным глаголом попарно. Кластерный анализ правильного и неправильного условий показал статистически значимые различия на интервале 308–476 мс ($p = 0.026$). Ответ на неправильное условие имел бóльшую амплитуду, чем на правильное. Наблюдаемый эффект имел центрально-фронтальное топографическое распределение, со сдвигом в левое полушарие и продолжительной негатив-

ностью, сопоставимой с компонентом LAN (рис. 3).

Дополнительный попарный анализ правильного и неправильного условий с контрольным одиночным глаголом показал значимые различия по всей длине эпохи ($p < 0.001$ в обоих случаях) во фронтальных и фронтально-центральных областях. Амплитуда ответа у контрольного условия была выше неправильного и правильного условий (рис. 4).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В данной работе мы исследовали вопрос о нейрофизиологических коррелятах нулевой

морфемы и попытались найти доказательств, подтверждающие либо опровергающие ее морфосинтаксическую обработку мозгом. Мы проанализировали активность головного мозга, полученную в ответ на предъявление коротких фраз со структурой “местоимение + глагол”, содержащих мужские нулевые и женские выраженные глагольные окончания, согласованные по роду с местоимением либо нарушающие грамматические нормы согласования.

Общий анализ условий с мужским и женским окончанием показал значительное влияние акустики на амплитуду вызванного потенциала – выраженное женское окончание (-а) акустически отличается от невыраженного мужского (нулевое окончание), что привело к различиям в амплитудах ВП. В связи с этим условия с мужским и женским окончаниями рассматривались отдельно. В каждой из двух групп окончаний мы сравнили между собой синтаксически правильные и неправильные условия, с использованием одиночных глаголов в качестве контроля. Наличие морфосинтаксической связи (в данном случае – между местоимением “он” и окончанием мужского рода, или местоимением “она” и окончанием “-а”) привело к преактивации (Fonteneau, 2013, Pulvermüller, Shtyrov, 2003; Shtyrov et al., 2003) репрезентации связанной морфемы в соответствии с теорией “предсказующего кодирования” (predictive coding; Bornkessel-Schlesewsky, Schlesewsky, 2019; Friston, 2019), что, в свою очередь, снизило амплитуду ВП на предъявление последней (так как необходимый уровень активации уже частично достигнут заранее) уже на ранних этапах морфосинтаксической обработки.

Полученные данные показывают следующее распределение амплитуд по условиям (для обоих окончаний – мужского и женского): наблюдается низкая амплитуда ответов на правильные условия по сравнению как с одиночными глаголами, так и с нарушениями согласования. Условия с одиночным глаголом показали наибольшую амплитуду среди всех условий. Это может быть связано с дополнительными трудностями при поиске правильных родовых сопоставлений, так как при отсутствии определяющего местоимения не формируется шаблон для согласования по роду (Pulvermüller, Shtyrov, 2003). Однако, с другой стороны, имеющееся в нашем распоряжении контрольное условие – единичный глагол – из-за отсутствия местоимения перед

ним заметно выделяется из стимульного ряда не только с лингвистической точки зрения, но и акустически (по длительности), что само по себе могло вызвать отличие в амплитуде. Кроме того, это условие существенно выделялось в дизайне эксперимента – число одиночных условий было меньше, чем фразовых, что могло вызвать ранний эффект негативности рассогласования, выражающийся в повышении амплитуды аналогично MMN. В будущем для более качественного контроля акустических параметров стимулов представляется необходимым использовать дополнительные контрольные стимулы. Такие стимулы могли бы включать в себя звуковую составляющую перед единичным глаголом, похожую на языковую единицу, например, неречевые акустические сигналы, синтаксически нейтральные речевые звуки, такие как заполненная пауза хезитации и т.п. Это позволит достигнуть лучшего акустического баланса между различными типами стимулов и нивелирования потенциальных нежелательных эффектов в контрольном условии, которые гипотетически могут иметь место в данной работе.

Мужское нулевое vs. женское выраженное окончание

Полученные для мужского окончания данные показали статистически значимые различия между правильными и неправильными условиями в раннем интервале 216–308 мс. При этом для правильных условий наблюдалась более низкая амплитуда, что подтверждает теорию преактивации морфосинтаксической информации (Shtyrov et al., 2003) и соответственно гипотезу о существовании репрезентации нулевой морфемы как таковой. Ранний морфосинтаксический эффект сопоставим с компонентом ELAN/sMMN и наблюдается в центрально-фронтальной части со сдвигом в левое полушарие, что согласуется с предыдущими исследованиями (Bakker et al., 2013; Halmetoja et al., 2021; Kimppa et al., 2019; Kubota et al., 2018; Leminen et al., 2013; Pulvermüller, Shtyrov, 2003). Связь данного компонента с ранней автоматической обработкой морфосинтаксической информации указывает на быструю автоматическую активацию репрезентации нулевого глагольного окончания.

Для окончания мужского рода также наблюдалась значимая разница в позднем временном окне 316–420 мс – аналогично ран-

нему интервалу, так как условие с рассогласованием показало повышенную амплитуду по сравнению с правильным согласованием. Данный морфосинтаксический эффект сопоставим с компонентом LAN и наблюдался в центрально-фронтальной части скальпа со сдвигом в левое полушарие, что согласуется с предыдущими исследованиями (Friederici, 2002; Tanner, Van Hell, 2014). Смещение локализации во фронтальную и фронтально-центральную область для эффекта LAN было показано также в ряде других исследований морфосинтаксических и синтаксических нарушений и связано с участием фронтальных областей коры (в первую очередь – нижне-лобной извилины) в обработке речевой информации в целом (Nagoort et al., 2003; Molinaro et al., 2011). Регистрация следующего за ранней автоматической обработкой более позднего эффекта подтверждает существование нескольких уровней морфосинтаксической обработки, включающих в себя как ранние, так и поздние этапы (Pulvermüller, Shtyrov, 2003; Tanner, Van Hell, 2014), отличающиеся по степени вовлечения систем внимания и когнитивного контроля.

В полученных нами данных эффект обработки окончания женского рода не наблюдался в раннем интервале и проявился позднее – разница между правильным и неправильным условиями наблюдалась в интервале 308–476 мс, что сопоставимо с компонентом LAN (Friederici, 2002; Tanner, Van Hell, 2014) со смещением во фронтально-центральную область, как и в случае с мужским окончанием. Появление компонента LAN указывает на морфосинтаксическую обработку женского окончания у глаголов в прошедшем времени (см. LAN и согласование по роду в Popov et al., 2020). Таким образом, при сравнении мужского нулевого и женского выраженного окончания наблюдалось отсутствие статистически значимых признаков ранней автоматической обработки женского окончания. С одной стороны, это может свидетельствовать о кодировании форм с нулевым словоизменением целиком, в то время как морфосинтаксическая обработка форм с выраженным словоизменением подразумевает дополнительное время для обработки акустической/фонетической составляющей, занимающей несколько десятков или даже сотен миллисекунд, и/или выбор выраженного маркера (Pinker, 2015), что приводит к позднему началу морфосинтаксической обработки, тогда как формы с

нулевым окончанием начинают обрабатываться сразу, как только становится очевидным отсутствие дополнительных морфем. С другой стороны, данное предположение не учитывает необходимость обработки других морфем, включенных в словоформы (Flick et al., 2018; Leminen et al., 2013; Marslen-Wilson, Tyler, 2007; см. также обзор Fiorentino, 2019; Gwilliams, 2020; Leminen et al., 2019). Глагольные формы, используемые в нашем эксперименте, включали несколько морфем (глагольный суффикс после корня и суффикс прошедшего времени помимо родового маркера), чьи характеристики требуют поморфемной обработки не только глагольных форм с женским окончанием, но и с мужским нулевым. Таким образом, выделение обработки нулевого окончания от обработки остальных морфем так или иначе подтверждает реальность нулевой морфемы и ее активации в процессе морфосинтаксической обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный эксперимент направлен на проверку универсальных грамматических подходов к пониманию языковой системы, в особенности к ее флективной (словоизменяющей) части. Постулирование существования абстрактных элементов в языковой системе не всегда бесспорно, так как зачастую оно не базируется на эмпирических данных, подтверждающих активацию соответствующих нейрокогнитивных процессов. Представленные в настоящей статье данные позволили проверить гипотезу о наличии изменений в нейронной активности отделов головного мозга, связанных с обработкой нулевой морфемы. Результаты исследования показали, что на примере глагольного словоизменения по роду нулевая морфема обрабатывается нашим мозгом наряду с выраженными морфемами.

Несмотря на полученные данные, представляется необходимым дальнейшее исследование данного вопроса. Будущие эксперименты потребуют усовершенствования (расширения и дополнения) стимульного материала с большим контролем акустики, а также смогут уточнить полученные результаты с помощью других методов, таких, как магнитоэнцефалография (МЭГ) или фМРТ, позволяющих провести нейроанатомическую локализацию процесса активации нулевой морфемы в моз-

ге. Таким образом, нейрокогнитивные исследования языковых процессов позволят в будущем решить проблему отсутствия когнитивных доказательств объективности отдельных составляющих современной лингвистической теории и построить научно-исследовательский мост между двумя науками. Дальнейшая проверка постулатов лингвистической теории с помощью методов когнитивной нейронауки может привести к ее более объективному развитию и расширению, что приведет к лучшему пониманию нейролингвистических процессов, а также расширит сферу применения лингвистической теории в области смежных наук.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование было проведено с использованием Уникальной научной установки НИУ ВШЭ «Автоматизированная система неинвазивной стимуляции мозга с возможностью синхронной регистрации биотоков мозга и отслеживания глазодвижения при финансовой поддержке Российской Федерацией, грант № 075-15-2021-673.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bakker I., MacGregor L. J., Pulvermüller F., Shtyrov Y.* Past tense in the brain's time: Neurophysiological evidence for dual-route processing of past-tense verbs. *NeuroImage*. 2013. 71: 187–195.
- Bornkessel-Schlesewsky I., Schlesewsky M.* Toward a neurobiologically plausible model of language-related, negative event-related potentials. *Frontiers in psychology*. 2019. 10: 298.
- Chomsky N.* Aspects of the Theory of Syntax. MIT press. 2014. 11.
- Dahl E., Fábregas A.* Zero morphemes. *Oxford Research Encyclopedia of Linguistics*. 2018.
- Fiorentino R.* Issues in neurolinguistic studies of morphology. *Oxford Research Encyclopedia of Linguistics*. 2019.
- Flick G., Oseki Y., Kaczmarek A. R., Al Kaabi M., Marantz A., Pylkkänen L.* Building words and phrases in the left temporal lobe. *Cortex*. 2018. 106: 213–236.
- Friederici A.D.* Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in cognitive sciences*. 2002. 6(2): 78–84.
- Friston K.J.* Waves of prediction. *PLoS biology*. 2019. 17(10): e3000426.
- Fonteneau E.* Structural syntactic prediction measured with ELAN: Evidence from ERPs. *Neuroscience letters*. 2013. 534: 211–216.
- Gwilliams L.* How the brain composes morphemes into meaning. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. 2020. 375(1791): 20190311.
- Hagoort P., Wassenaar M., Brown C.M.* Syntax-related ERP-effects in Dutch. *Cognitive Brain Research*. 2003. 16(1): 38–50.
- Halmetoja S.* The processing of inflected spoken words in mono- and bilinguals: an event-related potential study. 2021.
- Hanna J., Pulvermüller F.* Congruency of Separable Affix Verb Combinations Is Linearly Indexed by the N400. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2018. 12: 219.
- Hyams N.* The effects of core and peripheral grammar on grammatical development in children. UCLA, unpublished ms. 1987.
- Hyder R., Højlund A., Jensen M., Johnsen E.L., Østergaard K., Shtyrov Y.* STN-DBS affects language processing differentially in Parkinson's disease: Multiple case MEG study. *Acta Neurologica Scandinavica*. 2021. 144(2): 132–141.
- Hyder R., Højlund A., Jensen M., Johnsen E.L., Østergaard K., Shtyrov Y.* Objective assessment of automatic language comprehension mechanisms in the brain: Novel E/MEG paradigm. *Psychophysiology*. 2020. 57(5): e13543.
- Kimppa L., Shtyrov Y., Hut S.C., Hedlund L., Leminen M., Leminen A.* Acquisition of L2 morphology by adult language learners. *Cortex*. 2019. 116: 74–90.
- Kubota M., Ono Y., Ishiyama A., Zouridakis G., Papanicolaou A.C.* Magnetoencephalography reveals mismatch field enhancement from unexpected syntactic category errors in English sentences. *Neuroscience Letters*. 2018. 662: 195–204.
- Leminen A., Smolka E., Dunabeitia J.A., Pliatsikas C.* Morphological processing in the brain: The good (inflection), the bad (derivation) and the ugly (compounding). *Cortex*. 2019. 116: 4–44.
- Leminen A., Leminen M., Kujala T., Shtyrov Y.* Neural dynamics of inflectional and derivational morphology processing in the human brain. *Cortex*. 2013. 49(10): 2758–2771.
- Lucchese G., Hanna J., Autenrieb A., Miller T.M., Pulvermüller F.* Electrophysiological evidence for early and interactive symbol access and rule processing in retrieving and combining language constructions. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2017a. 29(2): 254–266.
- Lucchese G., Pulvermüller F., Stahl B., Dreyer F.R., Mohr B.* Therapy-induced neuroplasticity of language in chronic post stroke aphasia: a mismatch negativity study of (A) Grammatical and meaningful/less mini-constructions. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2017b. 10: 669.
- Marchman V.A.* Children's productivity in the English past tense: The role of frequency, phonology, and neighborhood structure. *Cognitive science*. 1997. 21(3): 283–303.
- Maris E., Oostenveld R.* Nonparametric statistical testing of EEG- and MEG-data. *Journal of neuroscience methods*. 2007. 164(1): 177–190.

- Marslen-Wilson W.D., Tyler L.K.* Morphology, language and the brain: the decompositional substrate for language comprehension. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2007. 362(1481): 823–836.
- Molinaro N., Barber H.A., Carreiras M.* Grammatical agreement processing in reading: ERP findings and future directions. *Cortex*. 2011. 47(8): 908–930.
- Oltra-Massuet I., Sharpe V., Neophytou K., Marantz A.* Syntactic priming as a test of argument structure: A self-paced reading experiment. *Frontiers in psychology*. 2017. 8: 1311.
- Pinker S.* Words and rules: The ingredients of language. Basic Books. 2015.
- Popov S., Miceli G., Ćurčić-Blake B., Bastiaanse R.* The role of semantics and repair processes in article-noun gender disagreement in Italian: An ERP study. *Brain and Language*. 2020. 206: 104787.
- Pulvermüller F., Shtyrov Y., Hasting A.S., Carlyon R.P.* Syntax as a reflex: Neurophysiological evidence for early automaticity of grammatical processing. *Brain and language*. 2008. 104(3): 244–253.
- Pulvermüller F., Shtyrov Y.* Automatic processing of grammar in the human brain as revealed by the mismatch negativity. *Neuroimage*. 2003. 20(1): 159–172.
- Regel S., Kotz S.A., Henseler I., Friederici A.D.* Left inferior frontal gyrus mediates morphosyntax: ERP evidence from verb processing in left-hemisphere damaged patients. *Cortex*. 2017. 86: 156–171.
- Sag I.A., Fodor J.D.* Extraction without traces. *West coast conference on formal linguistics*. 1994. 13: 365–384.
- Sahin N.T., Pinker S., Halgren E.* Abstract grammatical processing of nouns and verbs in Broca's area: evidence from fMRI. *Cortex*. 2006. 42(4): 540–562.
- Schremm A., Novén M., Horne M., Roll M.* Brain responses to morphologically complex verbs: An electrophysiological study of Swedish regular and irregular past tense forms. *Journal of Neurolinguistics*. 2019. 51: 76–83.
- Schremm A., Novén M., Horne M.* Cortical thickness of planum temporale and pars opercularis in native language tone processing. *Brain and Language*. 2018. 176: 42–47.
- Shtyrov Y., Pulvermüller F., Näätänen R., Ilmoniemi R.J.* Grammar processing outside the focus of attention: an MEG study. *Journal of Cognitive Neuroscience*. 2003. 15(8): 1195–1206.
- Tanner D., Van Hell J.G.* ERPs reveal individual differences in morphosyntactic processing. *Neuropsychologia*. 2014. 56: 289–301.

NEUROPHYSIOLOGICAL CORRELATES OF ZERO MORPHEME PROCESSING: ERP DATA

Maria Alekseeva^{a, #}, Andriy Myachykov^{a, b}, Yury Shtyrov^c

^aCentre for Cognition and Decision Making, Institute for Cognitive Neuroscience, Higher School of Economics, Moscow, Russia

^bDepartment of Psychology, Northumbria University Newcastle, Newcastle-upon-Tyne, UK

^cCenter of Functionally Integrative Neuroscience (CFIN), Department of Clinical Medicine, Aarhus University, Aarhus, Denmark

[#]e-mail: alexeevamarly8@gmail.com

Language functioning as a communicative system is described by a multitude of linguistic theories, which are not always consistent with each other and do not have strong cognitive and/or neurobiological bases. One of the most striking examples is the “zero morpheme” proposed by the Universal Grammar theory, which has only an abstract meaning and no phonological representation (for example, null case affix: *stol-Ø* (Nominative; *table_{NOM}}*) vs. *stol-a* (Accusative; *table_{ACC}}*). To address the question of neurocognitive processing of the zero morpheme, we ran an EEG experiment with passive non-attend design. Experimental stimuli included phrases with correct and incorrect pronoun-verb gender agreement (null: *he bought-Ø*, filled: **he bought-FEM*) and single verbs as a control. During the ERP analysis we found higher activation for the conditions of zero morpheme agreement violations ($p = 0.036$) started from ~200 ms (ELAN), reflecting an early automatic syntactic processing of the zero morpheme. Results support the priming hypothesis for conditions with zero morpheme and its activation during language processing.

Keywords: speech processing, neurolinguistics, language theories, zero morpheme, EEG