

Научная статья

УДК 159.91

<https://doi.org/10.21702/rpj.2022.4.13>

Сравнение механизмов фонематического восприятия и внутреннего проговаривания фонем и слогов: ЭЭГ- и фМРТ-исследование

Андрей О. Шевченко¹✉, Александр В. Вартанов²

^{1,2} Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация

✉ andreyshevchenkomsu@gmail.com

Аннотация: Введение. Существующие схемы производства речи не полностью отражают взаимодействие систем восприятия речи и собственной внутренней речи. Исследование нацелено на сравнение с помощью психофизиологических методов связи между внутренним проговариванием и фонематическим восприятием. **Методы.** В ЭЭГ-исследовании приняли участие 25 человек. Испытуемым предлагались аудиальные стимулы, после чего необходимо было внутренне проговорить заданные фонемы или слоги, сохраняя интонацию и особенности произношения, как при внешней речи. Для обработки результатов использовался функциональный дисперсионный анализ. Также было проведено фМРТ-исследование, в нём приняли участие 30 здоровых праворуких испытуемых. Респондентам также предлагались аудиальные стимулы, записывались фон, прослушивание материала, прослушивание с последующим внутренним проговариванием заданного стимула. Результаты обрабатывались с помощью программы для статистического параметрического картирования, а затем подвергались анализу групповой статистики с помощью одновыборочного t-критерия Стьюдента. **Результаты.** В процессе ЭЭГ-исследования были обнаружены интервалы значимых различий в структуре вызванного потенциала внутреннего проговаривания и фонематического восприятия. В ходе фМРТ-исследования нами были получены данные, которые свидетельствуют как о процессе фонематического восприятия, так и о намеренном внутреннем проговаривании. **Обсуждение результатов.** Были проанализированы различия в активности мозговых структур при внутреннем проговаривании и восприятии. На основе полученных нами данных, а также проведенном теоретическом анализе была предложена схема фонематического восприятия и внутреннего проговаривания. Данная схема представляет не только взаимодействие процессов восприятия и порождения речи, но и показывает влияние артикуляций на процесс внутренней речи.

Ключевые слова: фМРТ речи, ЭЭГ речи, вызванные потенциалы, внутренняя речь, локализация, нейролингвистика, субвокализация, фонемы, слоги, фонематическое восприятие

Основные положения:

- при фонематическом восприятии происходят активации конвенциональных мозговых зон, которые связаны с производством речи;
- существуют различия во внутреннем проговаривании на уровне сопутствующих речевых зон, в частности мозжечка при проговаривании фонем и слогов;
- на основании работы представлена схема фонематического восприятия и проговаривания.

Финансирование: Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект No 20-18-00067.

Для цитирования: Шевченко, А. О., Вартанов, А. В. (2022). Сравнение механизмов фонематического восприятия и внутреннего проговаривания фонем и слогов: ЭЭГ- и фМРТ-исследование. *Российский психологический журнал*, 19(4), 185–210. <https://doi.org/10.21702/rpj.2022.4.13>

Введение

Внутренняя речь влечет мультимодальное пересечение образов. Одним из ключевых элементов внутренней речи является внутреннее проговаривание, которое наиболее схоже с внешней речью. Выделяя лишь фонематическую сторону внутренней речи, мы пытаемся перейти на уровень внутреннего проговаривания. Так, по мнению ряда авторов, порождение (производство) речи – это процесс, имеющий определенную иерархию. Процесс включает следующие этапы: идея или мотив речевого высказывания (мотив, оформленный в семантику), лексический подбор, грамматическое и синтаксическое построение фразы, артикуляция необходимых слов (Горелов, Седов, 2001; Levelt et al., 1999; Dell, 1986; Oppenheim & Dell, 2008, 2010). Модель Левелта состоит из стадий, на каждой из которых имеется своя характерная единица. Осуществляются переходы от концептуальной стадии к лексическому выбору слова, а затем к его грамматическому, фонологическому кодированию. Levelt et al. (1999) утверждают, что происходит процесс собирания слова через слоги. Как только слово разберется на слоги, происходит этап послогового фонетического кодирования. Слоги, полученные на прошлом этапе, превращаются в инструкции к артикуляционным движениям. Авторы пишут, что в памяти хранятся уже собранные артикуляционные характеристики наиболее частотных слогов, что позволяет не строить эти слоги каждый раз, а просто извлекать из памяти. В модели Левелта есть самоконтроль при производстве речи (Levelt et al., 1999), состоящий из двух систем: внешней – акустический контроль – и внутренней – контроль внутренних репрезентаций (Levelt et al., 1999). Внутренний контроль производится на фонологическом уровне, а не на фонетическом (Indefrey & Levelt, 2004). Другая модель, модель Делла, включает 4 уровня: семантический, синтаксический, морфемный и фонологический. Каждый из уровней имеет свои правила отбора необходимых элементов для производства речи (Dell, 1986). Данная модель имеет сетевое строение, каждый узел представляет отдельные единицы речи и взаимодействует с другими узлами на всех уровнях. Сеть, предложенная для фонологического кодирования, состоит из узлов для морфем, слогов, слоговых составляющих, фонем и признаков (артикуляционные характеристики звуков). Сеть имеет иерархию из этих узлов. Фонологические представления в модели состоят из помеченных узлов, обозначающих слоговые составляющие. Чаще всего эти составляющие являются одиночными фонемами.

Orpenheim & Dell (2010) исследовали ошибки фонематического сходства и лексической предвзятости в двух формах внутренней речи с разной степенью артикуляции и получили вывод, что артикуляция изменяет внутреннюю речь. Авторы констатируют, что во внутренней речи существует только фонологический уровень, на который может влиять артикуляция. Так, выбранные фонемы способны отражать различное количество активации за пределами уровня фонемы (Orpenheim & Dell, 2010). Scott et al. (2013) провели эксперименты с целью доказать предположение, что более активное участие артикуляции должно вызывать упреждающий разряд большей силы. Упреждающий (сопутствующий) разряд – моторная команда, схожая с командой моторного действия, однако не приводящая к действию непосредственно. Поведенческая особенность упреждающего разряда – перцептивный захват – задержка в восприятии. В результате исследования было доказано, что более сильное задействование артикуляционного аппарата вызывает более сильный упреждающий разряд. Кроме того, перцептивный захват не является простым вопросом фонемного прайминга, а внутренняя речь содержит информацию ниже уровня фонемы. Анализируя внутреннее проговаривание, можно прийти к выводу, что существует явная связь между артикуляторным актом и внутренним проговариванием, при этом возможно внутреннее проговаривание и без включения явного артикуляторного акта, ведь внутри внутреннего проговаривания существуют различные уровни артикуляторной активации. Исходя из этого, фонематическое восприятие становится процессом, крайне связанным с удержанием аудиального образа, его опознанием. Фонематическое восприятие также задействует детекцию – это реакция на внешний или внутренний стимул, причем артикуляторное и фонетическое сопровождение является вторичным относительно скорости опознавания стимула внутри системы речевой организации. Моторное внутреннее проговаривание имеет наиболее схожий вид с внешней речью. Так как во внутреннем плане сохраняется темп и интенсивность, представлено это внутренним аудиальным образом проговариваемых единиц. Можно предположить, что уровень артикуляторной активации выше. Так, эффективное построение ВСИ (интерфейс мозг–компьютер) в большей мере возможно именно на артикуляционном проговаривании (представлении артикуляции) за счет большего моторного компонента (Sarmiento et al., 2014).

Целью нашего исследования является сравнение связи внутреннего проговаривания и фонематического восприятия при помощи психофизиологических методов.

Методы

Процедура ЭЭГ исследования

В исследовании принимали участие 25 испытуемых: пятнадцать девушек и десять юношей в возрасте от 17 до 28 лет. Все испытуемые не имели в анамнезе черепно-мозговых травм и психических заболеваний и были правшами. Был проведен следующий эксперимент. Запуск внутреннего проговаривания происходил на основе аудиального стимула (фонемы и слоги). Предъявлялись следующие стимулы:

7 фонем (А – [а], Б – [б], Ф – [ф], Г – [г], М – [м], Р – [р], У – [у]),

10 слогов (БА, ФА, ГА, МА, РА, БУ, РУ, МУ, ФУ, ГУ).

Стимулы предъявлялись в случайном порядке. Начало проговаривания задавалось специальным стимулом, сообщающим проговариваемую фонему. После появления задающего стимула создавалась пауза в 500 мс. После паузы на экране появлялся фиксационный крест и звуковой сигнал, который являлся стартовой командой внутреннего проговаривания.

Испытуемых во время команды на проговаривание просили повторить про себя фонему или слог с той же длительностью и интонацией, что и при внешней речи.

В качестве программы для записи и просмотра ЭЭГ, а также для предварительной очистки вызванных потенциалов использовалась BrainSys (BrainWin). Регистрация электрической активности мозга проводилась монополярно, с помощью 19-канального электроэнцефалографа «Нейро-КМ» (компания «Статокин», Россия). Electroды были расположены по международной системе 10–20 % с двумя мостоидами. Для предъявления стимулов использовалась программа Presentation (версия 18.0 фирмы NeurobehavioralSystems, Inc.).

Анализ полученных данных проводился с помощью языка статистического программирования R (версия 3.6.3) (RCoreTeam, 2019) в рамках интегрированной среды разработки RStudio (версия 1.2.5003) (RStudioTeam, 2019). В рамках данной работы использовались пакеты *data.table* для эффективной работы с данными. Основным методом, используемым в рамках анализа, – это функциональный дисперсионный. Данный метод имеет такую же интерпретацию и использование, как «классический» дисперсионный анализ – его основное отличие в том, что он оценивает различие не средних, а кривых. По этой причине функциональный дисперсионный анализ прекрасно подходил для вызванных потенциалов (вызванный потенциал является кривой) и был адаптирован с целью обнаружения значимых различий в пакете ERP (Benjamini & Hochberg, 1995).

Процедура фМРТ-исследования

В исследовании приняли участие 30 здоровых правши (9 мужчин и 21 женщина в возрасте от 20 до 30 лет, средний возраст = 24 года). Все участники не имели неврологических и психических отклонений, что подтверждается предварительным опросом. Все участники подписали информированное согласие после объяснения протокола эксперимента. Перед началом каждого этапа испытуемые слушали стандартизированную инструкцию. Серии были следующими: простое прослушивание стимульного материала, прослушивание с последующим повторением, также была записана фоновая серия, во время которой испытуемый спокойно лежал в томографе. Продолжительность каждой серии составляла 2 минуты (всего эксперимент занимал около 10 минут). Длительность каждого стимула составляла 1500 мс, затем после паузы (500 мс) следовал звуковой сигнал, который обозначал начало проговаривания. Стимулы были произнесены женским голосом. Для исследования особенностей внутреннего проговаривания были подготовлены серии, содержащие:

7 фонем (А – [а], Б – [б], Ф – [ф], Г – [г], М – [м], Р – [р], У – [у]),

10 слогов (БА, ФА, ГА, МА, РА, БУ, РУ, МУ, ФУ, ГУ).

Предъявление производилось через специальные наушники. Все этапы проводились в одну сессию. В течение всего эксперимента глаза испытуемых были закрыты.

Получение фМРТ-изображений

Функциональная МРТ выполнялась на Siemens MagnetomSkyra 3T MRI Machine (Siemens Medical Systems, Erlangen, Germany) для получения BOLD-контраста (зависящего от оксигенации крови). Для каждого субъекта было проведено T1-взвешенное структурное сканирование (TR = 2200 мс, TE = 2,48, msflipangle = 6, матрица = 256 × 256, 230 mmfieldofview, срезов = 176, толщина среза = 1 мм). Для функциональных сканов, мы использовали T2*-взвешенный, последовательность градиент-эхо EPI (TR = 3000 мс, TE = 30 мс, угол наклона = 90°,

матрица = 128 × 128, поле зрения 260 мм, срезы = 41, толщина среза = 3 мм). Движение головы было минимизировано с помощью специально подобранного подголовника.

Обработку изображений и анализ данных выполняли с использованием пакета программного обеспечения для статистического параметрического картирования SPM12 (The Wellcome Centre for Human Neuroimaging, UCL Queen Square Institute of Neurology, London, UK). Далее производился анализ групповой статистики с помощью одновыборочного t-критерия Стьюдента. После t-статистики были преобразованы в нормальное стандартное отклонение (z). Воксельный порог активации соответствовал $p_{FWEuncorr.} < 0.001$.

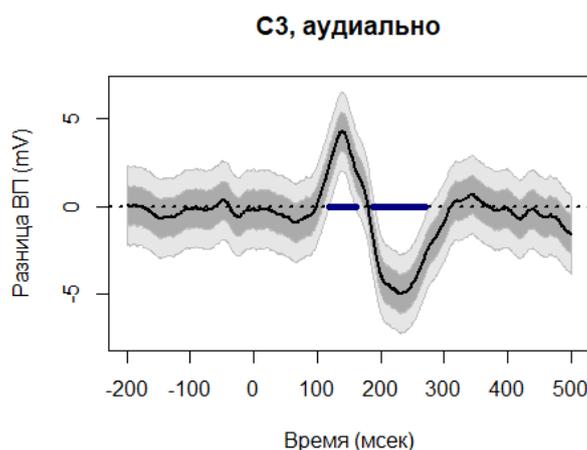
Результаты

Результаты ЭЭГ-исследования, выделение ВП на проговаривание

Проверка эффекта взаимодействия переменной канала отведения ЭЭГ и переменной этапа показала значимые различия для фонем ($p = 0,02$) и слогов ($p = 0,005$, соответственно). Что касается локализации различий, то наиболее значимые на уровне $p < 0,05$ различия обнаруживаются на каналах С3 и F3, а также F7. Что подтверждает наши результаты, полученные ранее на меньшей выборке (Вартанов и др., 2021). Они характеризуются позитивной волной в районе 120–170 мс и негативной волной (на С3 и F3) в районе 200–280 мс.

Рисунок 1

Различия между вызванными потенциалами (проговаривание фонем минус фонематическое восприятие)

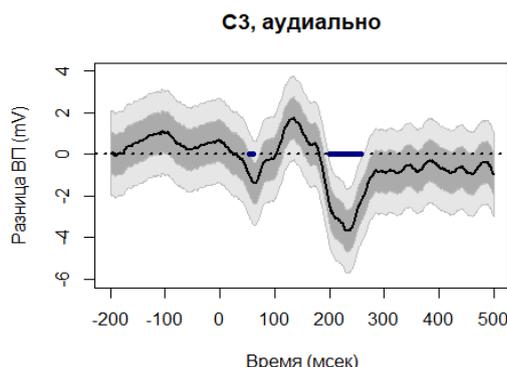


Моменты значимых различий помечены синим цветом.

При сравнении фонематического восприятия стимулов с их проговариванием существуют значимые различия на уровне $p < 0,001$, при этом, если смотреть по слогам в среднем, наиболее выраженными вновь являются каналы С3 и F3. Если анализировать компоненты ВП, то более выражена негативная волна с латенцией в 200 мс.

Рисунок 2

Различия между вызванными потенциалами (проговаривание слогов минус фонематическое восприятие)



Моменты значимых различий помечены синим цветом.

Функциональное МРТ-исследование фонематического восприятия и внутреннего проговаривания

В результате проведенного анализа были выделены структуры, значимо связанные с процессами фонематического восприятия и намеренного проговаривания. Координаты выявленных вокселей представлены в формате MNI. Воксельный порог активации соответствовал $p_{FWEuncorr} < 0,001$, однако наиболее значимые структуры с $p < 0,05$ выделены серым цветом. Так, в сравнении моторного внутреннего проговаривания с фонематическим восприятием играет важную роль мозжечок в сериях с моторным произнесением про себя слогов (табл. 1). При этом показателем вклада в описание модели являются T- и Z-значения, относительно которых и отфильтрована таблица 1. BA – номер цитоархитектонического поля по Бродману.

Таблица 1

Сравнение механизмов проговаривания фонем и слогов с их фонематическим восприятием

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	Y {mm}	Z {mm}
Внутреннее проговаривание слогов по сравнению с фонематическим восприятием									
L	Cerebellum	–	1	6,362920	4,993979	0,00000030	–24	–52	–46
L	Cerebellum exterior	–	1	6,337997	4,980898	0,00000032	–14	–56	–46
L	Cerebellum	–	575	6,362920	4,993979	0,00000030	–24	–52	–46

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	Y {mm}	Z {mm}
L	Subcallosal area	BA25	44	5,823698	4,701207	0,00000129	-2	14	-4
R	MP Temporal Pole	BA38	6	4,443623	3,848925	0,00005932	44	12	-40
R	SecVisual	BA18	19	4,339899	3,778314	0,00007895	20	-70	-1
R	Subcallosal area	BA25	4	4,289875	3,743913	0,00009059	2	14	-4
L	SecVisual	BA18	6	4,204751	3,684852	0,00011442	-18	-80	-4
R	Inferior occipital gyrus (SecVisual)	BA18	11	4,197034	3,679465	0,00011686	30	-92	2
R	Cerebellum exterior	-	3	4,156387	3,651	0,00013061	16	-82	-46
R	Superior frontal gyrus	BA6	1	3,92514	3,486165	0,000245	18	-6	77
R	Inferior occipital gyrus	BA18	3	3,918942	3,481679	0,00024914	34	-92	-1
L	Fusiform gyrus	BA37	10	3,862814	3,44089	0,00028990	-36	-58	-7

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	Y {mm}	Z {mm}
R	Cerebellum exterior	–	22	3,861920	3,440238	0,00029060	22	–82	–46
R	Fusiform gyrus	BA37	1	3,858072	3,43743	0,00029363	54	–68	–1
R	Medial frontal cortex (orbFrontal)	BA11	4	3,851278	3,43247	0,00029906	12	34	–13
L	Precentral gyrus	BA6	2	3,790266	3,387731	0,00035237	–36	–14	68
L	Medial frontal cortex (orbFrontal)	BA11	6	3,77112	3,37362	0,00037093	–8	30	–16
R	Cerebellum exterior	–	1	3,714886	3,331975	0,00043116	22	–60	–49
R	Inferior occipital gyrus (VisualAssoc)	BA19	3	3,711242	3,329267	0,00043538	52	–66	5
R	Inferior occipital gyrus	BA18	1	3,679365	3,305516	0,00047401	32	–84	–7
L	Orbital part of the inferior frontal gyrus	BA47	2	3,663915	3,293972	0,00049391	–42	30	–4
R	Cerebellum exterior	–	4	3,634835	3,27218	0,00053361	4	–74	–43

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	Y {mm}	Z {mm}
R	Lingual gyrus	BA19	1	3,604819	3,249604	0,00057783	16	-42	-10
R	Cerebellum exterior	-	1	3,572326	3,225069	0,00062971	18	-70	-46
L	Brain Stem (обл. пирамиды)	-	1	3,545394	3,204658	0,00067612	-10	-40	-43
R	Cerebellum exterior	-	2	3,542027	3,202101	0,00068215	24	-64	-49
R	Medial frontal cortex	BA11	1	3,541181	3,201458	0,00068367	12	38	-13
R	Fusiform gyrus	BA37	1	3,539396	3,200102	0,0006869	42	-56	-13
L	Lateral ventricle (ArgRetrolimb)	BA30	2	3,536704	3,198057	0,00069178	-26	-56	11
R	Cerebellum exterior	-	1	3,530372	3,193243	0,00070342	42	-72	-34
R	Cerebellum white matter	-	3	3,511992	3,179248	0,00073829	14	-42	-37
R	Occipital Pole	BA18	2	3,498797	3,169181	0,00076435	14	-100	11
L	Cerebral white matter (y lateral ventricle) Superior	-	1	3,493938	3,16547	0,00077416	-24	-38	26
R	occipital gyrus	BA18	2	3,492151	3,164105	0,00077780	22	-82	14

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	Y {mm}	Z {mm}
R	Cerebellum exterior	–	1	3,451802	3,133195	0,00086457	16	–68	–43
L	Lingual gyrus (Visual-Associated)	BA19	1	3,444823	3,127833	0,00088050	–22	–62	–7
L	Cerebellum exterior	–	1	3,444173	3,127333	0,0008826	–16	–74	–43
L	Cerebellum exterior	–	1	3,422555	3,110694	0,00093324	–12	–68	–22
Внутреннее проговаривание фонем по сравнению с фонематическим восприятием									
L	Supramarginal gyrus	BA40	15	4,748875	3,870373	0,00005433	–52	–34	32
L	Precuneus (Dorsal)	BA31	3	4,15238	3,508109	0,00022565	–18	–54	38
L	Fusiform gyrus	BA37	7	4,126642	3,491703	0,00023996	–26	–54	–10
L	Superior parietal lobule (VisMotor)	BA7	3	3,973716	3,392849	0,00034585	–32	–48	65
L	Cuneus (visual associative)	BA19	2	3,948858	3,376556	0,000367	–6	–86	35

На основе полученных координат были построены изображения с выделенными цветом зонами активации намеренного внутреннего проговаривания в сравнении с фонематическим восприятием (рис. 3 и рис. 4), градиент изменяющейся динамики отражен справа от изображения.

Рисунок 3

Внутреннее проговаривание слогов по сравнению с фонематическим восприятием

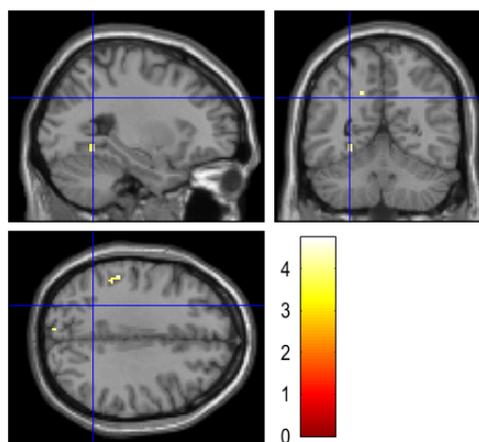
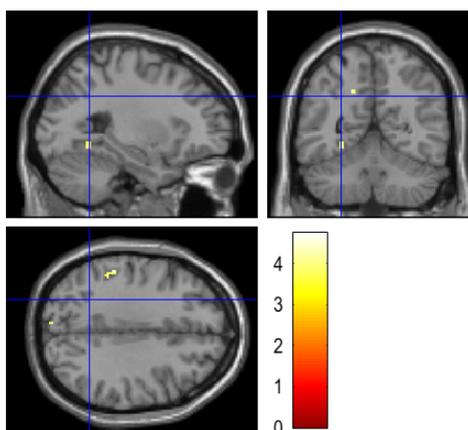


Рисунок 4

Внутреннее проговаривание фонем по сравнению с фонематическим восприятием



Также было проведено сравнение фонематического восприятия с фоном, наиболее выраженными структурами стали зона BA22 в левом и правом полушарии (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение механизмов фонематического восприятия с фоном

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	y {mm}	z {mm}
Фонематическое восприятие по сравнению с фоном									
R	STG (Superior temporal gyrus)	BA22	8	7,058488	5,34254	0,00000005	50	-38	11
L	STG (Superior temporal gyrus)	BA22	4	6,715026	5,17432	0,00000011	-36	-38	8
R	Cerebellum	-	1587	6,015718	4,807855	0,00000076	18	-36	-34
L	Posterior insula	BA13	61	5,648526	4,601521	0,00000021	-28	-22	17
R	Thalamus	-	44	5,30348	4,39823	0,00000546	12	-22	5
R	Agranular retrolimbic area	BA30	115	5,283346	4,386076	0,00000577	16	-40	2
L	Calcarine cortex	BA17	20	5,253253	4,367849	0,00000627	-18	-74	5
R	Insula	BA13	62	5,206018	4,339092	0,00000715	30	-12	20
L	Cerebellum	-	21	5,178558	4,32229	0,00000772	-2	-58	-10

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	y {mm}	z {mm}
L	Calcarine cortex	BA17	56	5,108249	4,278987	0,00000939	-12	-86	14
R	Calcarine cortex	BA1	55	5,085045	4,264607	0,00001001	22	-36	44
R	Lateral ventricle	-	22	5,026877	4,228361	0,00001177	16	-34	17
L	Lateral ventricle		14	5,013901	4,220236	0,00001220	-22	-36	17
R	Inferior temporal gyrus	BA20	46	4,986055	4,202754	0,00001318	38	-10	-28
R	Superior temporal gyrus	BA41	9	4,965448	4,189775	0,00001396	44	-24	-1
R	Lateral orbital gyrus	BA47	46	4,905086	4,151549	0,00001651	40	36	-4
R	Posteriorc ingulate gyrus	BA23	10	4,887183	4,140153	0,00001735	10	-14	29

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	y {mm}	z {mm}
L	Thalamus	–	78	4,730111	4,038985	0,00002684	–26	–24	2
R	Hippocampus	–	13	4,700709	4,019812	0,00002912	30	–24	–16
R	Posterior cingulate gyrus	BA31	13	4,651894	3,987812	0,00003334	4	–42	41
R	Calcarine cortex	BA17	25	4,587883	3,945534	0,00003981	4	–76	11
R	Fusiform gyrus	BA37	17	4,556784	3,924864	0,00004339	28	–32	–22
R	Lingual gyrus	BA18	25	4,501969	3,888222	0,00005049	14	–68	2
L	Amygdala	–	44	4,478426	3,872402	0,00005388	–28	–4	–19
L	Cuneus	BA18	5	4,359511	3,79174	0,0000748	–4	–76	32
L	Superior temporal gyrus	BA22	2	4,357996	3,790704	0,00007511	–50	6	–13
R	Middle frontal gyrus	BA9	14	4,347326	3,783403	0,00007735	38	22	26

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	y {mm}	z {mm}
L	Lateral ventricle	–	7	4,336168	3,775757	0,00007976	–8	–24	23
L	Visual assoc	BA19	9	4,335631	3,775389	0,00007988	–30	–70	–4
R	Visual assoc	BA19	6	4,317257	3,762772	0,00008402	34	–70	–7
R	Thalamus	–	5	4,312673	3,75962	0,00008509	2	–22	8
R	Precentral gyrus (Prim-Visual)	BA4	3	4,269074	3,729542	0,00009591	30	–20	38
R	Anterior orbital gyrus (Orbital Frontal)	BA11	4	4,255989	3,720481	0,00009942	24	40	–10
R	Postcentral gyrus (Prim-Sensory)	BA1	10	4,244459	3,712484	0,00010262	38	–28	41
L	Precentral gyrus medial segment	BA24	6	4,238666	3,708462	0,00010426	–20	–20	41
R	Precentral Gyrus (PreMot+-SuppMot)	BA6	13	4,211751	3,689733	0,00011224	28	–20	59
R	Precentral gyrus medial segment	BA24	8	4,18588	3,671668	0,00012049	18	–14	38

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	y {mm}	z {mm}
R	Calcarine cortex (SecVisual)	BA18	17	4,176546	3,665136	0,00012360	18	-84	17
R	Thalamus	-	2	4,148016	3,645119	0,00013363	6	-26	-13
R	Parahipp	BA36	10	4,147383	3,644674	0,00013387	16	-38	-10
R	Precuneus (VisMotor)	BA7	11	4,143725	3,642102	0,00013521	12	-68	47
R	Thalamus	-	8	4,028056	3,560136	0,00018533	4	-18	5
L	Postcentral gyurs (Prim-Sensory)	BA1	5	4,022578	3,556223	0,00018811	-62	-16	20
L	Cerebellum	-	13	3,98835	3,531713	0,00020644	-34	-68	-31
R	Cerebellum	-	4	3,944522	3,500171	0,00023248	24	-62	-49
L	Occipital fusiform gyrus (Visual-Assoc)	BA19	2	3,944196	3,499936	0,00023268	-26	-76	-4
L	Anterior cingulate gyrus	BA24	1	3,940487	3,497258	0,00023503	-14	-4	41
L	Agranular retrolimbic area	BA30	2	3,93505	3,493331	0,00023852	-22	-52	11
R	Cerebellum	-	2	3,918813	3,481586	0,00024923	32	-58	-43

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	y {mm}	z {mm}
R	Middle frontal gyrus (Front-EyeFields)	BA8	19	3,913408	3,47767	0,0002529	42	8	53
R	Brain Stem	–	3	3,909098	3,474547	0,00025586	6	–26	–7
R	Angular Gyrus	BA39	1	3,892334	3,462379	0,00026771	46	–64	23
R	Temporal pole	BA38	5	3,874402	3,449335	0,00028098	54	2	–31
R	Precentral gyrus (PreMot+-SuppMot)	BA6	7	3,866411	3,443513	0,00028710	30	4	41
L	Cerebellum	–	4	3,849235	3,430977	0,0003007	–28	–76	–25
R	Anterior frontal gyrus (Orbital Frontal)	BA11	1	3,835686	3,42107	0,00031188	20	46	–7
L	Insula	BA13	2	3,827527	3,415095	0,00031880	–34	–4	2
R	Anterior prefrontal cortex	BA10	3	3,817274	3,407578	0,00032771	26	50	–1
R	Globus pallidum	–	5	3,809014	3,401515	0,00033507	24	–6	–7

L / R	Структура	BA	Cluster	T	Z	P (FWE)	X {mm}	y {mm}	z {mm}
L	Supramarginal gyrus	BA40	1	3,801684	3,39613	0,00034173	-30	-32	32
R	Posterior cingulate cortex	BA31	7	3,792591	3,389443	0,00035017	0	-36	41
L	Middle occipital gyrus (Visual- Assoc)	BA19	2	3,772275	3,374472	0,00036979	-36	-68	11
R	Inferior temporal gyrus (Prim- Sensory)	BA1	1	3,764789	3,368946	0,00037728	46	-16	-25
L	Cerebellum	-	5	3,759167	3,364793	0,00038301	-44	-60	-40
R	Cerebellum	-	4	3,758329	3,364174	0,00038387	50	-56	38
L	Calcarine cortex	BA17	6	3,74434	3,353825	0,00039851	-2	-74	11
L	Frontal operculum (Broca- Operc)	BA44	1	3,739974	3,350591	0,00040320	-42	12	14

Обсуждение результатов

В результате проведенного исследования, на основе анализа вызванных потенциалов на височных электродах (рис. 1 и рис. 2) можно предположить, что основным различием между внутренним проговариванием и восприятием являются более ранние компоненты вызванного потенциала (100–200 мс). Это может свидетельствовать как о процессе запуска команды на проговаривание (которой не должно было бы быть при пассивном восприятии), так и об эффекте ожидания стартового стимула (лучше всего это видно на серии со слогами). Отсутствия выявленных различий поздних компонентов является показателем схожести процесса реагирования и при фонематическом восприятии, и при внутреннем проговаривании. Так, при восприятии фонематического стимула, по-видимому, возникает подобное внутреннее аудиальное представление.

Анализируя полученные фМРТ-данные, можно выявить ряд общих закономерностей в фонематическом прослушивании и во внутреннем проговаривании. Так, зона Вернике (BA22L и гомологичная ей BA22R) активирована и при фонематическом восприятии, и при внутреннем проговаривании. Ряд авторов заявляют о наличии двух различных систем для восприятия и производства речи. Например, при поражении зоны Брока может пострадать производство речи, но при этом восприятие и понимание речи останутся сохраненными, а при поражении зоны Вернике может произойти обратное, что и говорит нам о разности систем для этих двух процессов (Morais & Kolinsky, 1994). Однако мы предполагаем, что эти системы более чем взаимосвязаны.

В серии сравнения механизмов проговаривания фонем и слогов с их фонематическим восприятием (табл. 1) была обнаружена активация зоны BA37L. Известно, что данная зона связана с произнесением на визуальный стимул, и существует предположение, что данная зона отвечает за фонематическое восприятие (Devlin et al., 2003). Возможно, это актуально для исследований с визуальным предъявлением стимула (Ardila et al., 2015; Flowers et al., 2004). Также существует гипотеза о роли данной зоны в процессе ритмического построения речи (Booth et al., 2002a, 2002b), что подтверждает иную роль темпа при моторном проговаривании в сравнении с фонематическим восприятием.

Проговаривание про себя слогов включает зону BA6L, данную зону связывают с речевым моторным планированием и фонологическим планированием (Shuster & Lemieux, 2005; Fox et al., 2000), что хорошо видно и в нашем исследовании. Кроме того, в исследовании Shuster & Lemieux (2005) активация этой зоны была представлена при произнесении односложных слов. Еще одна активированная зона при проговаривании слогов – BA47L, ее связывают с семантическим кодированием, а также с процессами вспоминания и извлечения из памяти (Robinson et al., 2015; Demb et al., 1995; De Carli et al., 2007). Из этого можно сделать вывод о том, что активация этой зоны при проговаривании слогов связана с извлечением из памяти образов звуков в слог. В серии на проговаривание слогов была выявлена активность зоны BA30L, данную зону (Posterior cingulated BA30L) связывают с семантическим кодированием (Patel et al., 2006). Однако полученные нами данные ставят это под сомнение, т.к. в рамках исследуемой экспериментальной модели не предполагалось наличия семантического кодирования. Возможно, эта зона может быть связана еще и с фонологическим кодированием, и с процессами памяти, которые запускаются на поиск слова с таким же слогом и схожим значением.

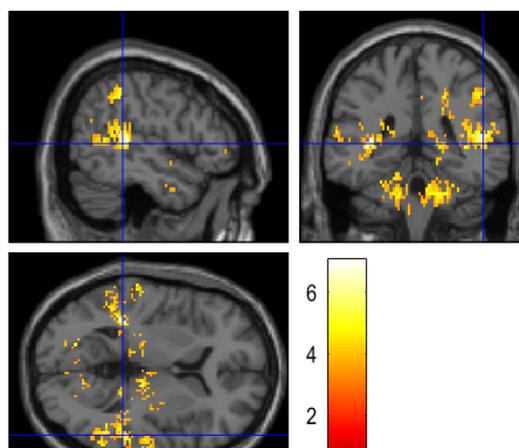
Одним из самых интересных результатов, полученных в данном исследовании, стало обнаружение различия в активации мозжечка между проговариванием фонем и слогов. По-видимому, мозжечок содержит модель «обратной динамики» (по Ziegler, 2016). В поддержку этой версии можно отметить, что мозжечок участвует в обучении новым паттернам, оценке и компенсаторной реакции на слуховые и соматосенсорные ошибки. По этой причине некоторые исследователи включают мозжечок в модели производства речи как вспомогательный компонент. Известно, что после поражения мозжечка возможна моторная атаксия, приводящая к нарушению звукопроизношения (Ziegler, 2016). В исследованиях Indefrey & Levelt (2004) говорится, что области, вовлеченные в планирование артикуляционных движений, чаще активируются при внешнем произношении, по сравнению с внутренним произношением. При этом области, участвующие в процессе слогаобразования, должны активироваться вне зависимости от внешнего или внутреннего произношения. Indefrey & Levelt (2004) отмечают, что вентральные билатеральные моторные зоны и сенсорные зоны, правая дорсальная моторная

зона, правая дополнительная моторная область (SMA), левый и правый медиальные части мозжечка, билатеральный таламус и средний мозг вероятнее всего участвуют в планировании и выполнении артикуляционных движений. Кроме того, левая вентральная прецентральная извилина (ventral precentral gyrus), двусторонние средние передние темпоральные извилины, левая фузиформная извилина, левый таламус и правый медиальный мозжечок чаще обнаруживались в заданиях с внешней артикуляцией, чем в заданиях внутреннем произношением. Однако в нашем исследовании была отмечена активация как правых, так и левых областей мозжечка в проговаривании слогов и фонем при внутреннем произношении. Кроме того, мозжечок активировался в заданиях на прослушивание по сравнению с фоном. Так, можно сделать вывод, что вспомогательная роль мозжечка проявляется на уровне не только внешней речи, но и внутренней и дифференцируется на уровне фонематических единиц (фонемы, слоги и т. д.): чем сложнее единица, тем больше проявляется роль мозжечка.

В проговаривании фонем в сравнении с прослушиванием была активна зона BA40L, которую связывают с фонологическими операциями и с семантической обработкой (McDermott et al., 2003; Chou et al., 2006). Интересным также является тот факт, что эта зона в целом была активна и при моторном проговаривании фонем, и при фонематическом восприятии (хотя имелась разница в пространственной локализации максимума различий). На основе этого мы можем предположить, что в этой зоне существуют подзоны, отвечающие за разные аспекты фонологических операций. Кроме того, продемонстрированный факт может свидетельствовать о том, что сознательное и бессознательное представление фонем опирается на разные, но близкие области мозга (Morais & Kolinsky, 1994). Фонематическое восприятие предположительно связано с процессом детектирования и непосредственно с производством речи. Исходя из этого, можно констатировать, что существует тесная связь между структурами, отвечающими за фонематическое слушание и внутреннее проговаривание, однако есть и различия. Традиционно зоны BA44, BA22, BA17, BA 39 связывают с восприятием, производством речи и чтением. Эти зоны также были представлены в нашем исследовании при фонематическом восприятии, в сравнении с фоном (рис. 5).

Рисунок 5

Фонематическое восприятие по сравнению с фоном

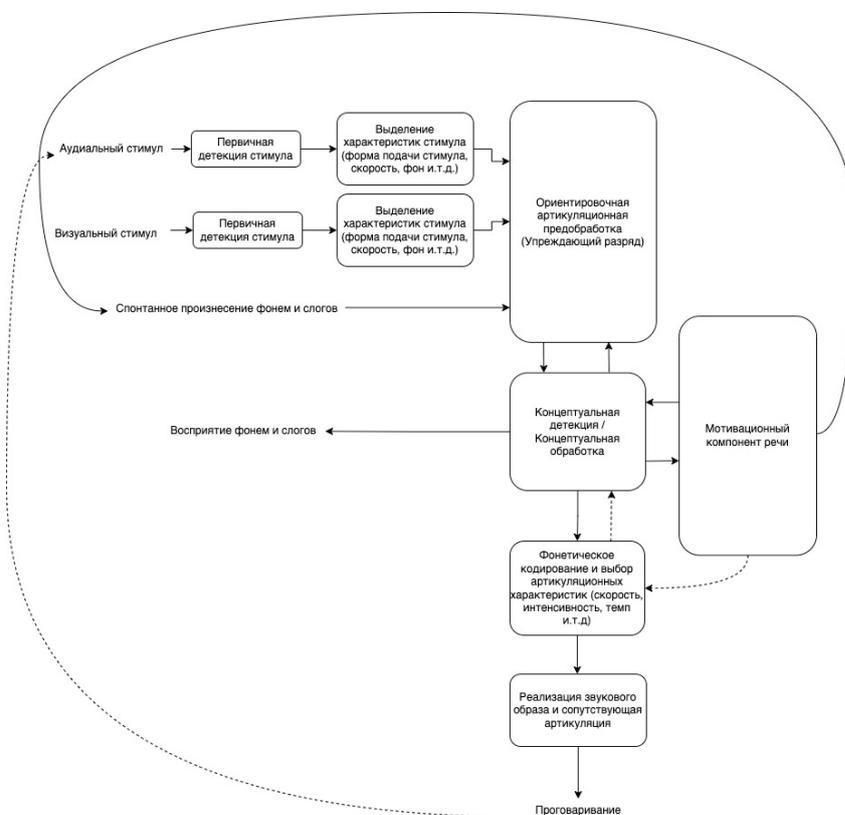


Кроме того, следует отметить зону BA24L, которая была активна при фонематическом восприятии. Исследователи связывают данную зону с названием объектов (Garn et al., 2009; Kiyosawa et al., 1996) и с семантической и фонологической беглостью (Whitney et al., 2009). Необходимо обратить внимание на зону BA38R, которая проявила активацию в серии фонематического восприятия. В исследовании Nakamura et al. (2001) эта зона была активна в процессе распознавания знакомых голосов. Возможно, активация данной зоны в нашем исследовании вызвана предъявлением аудиальных стимулов. Фонематическое слушание включает в себя внутреннюю репрезентацию аудиального стимула через активацию конвенциональных зон, связанных с речью. Прослушивание речевых, даже фонематических стимулов, связано с процессами детекции и повторения, однако ритмическая составляющая может отличаться. Кроме того, в процессе общения постоянно взаимодействуют системы производства и восприятия речи. Эти две системы не только работают согласованно, но и взаимовлияют особым образом на разных уровнях обработки. Данные факты стоит использовать при поиске общего в нейронных сетях восприятия и производства речи (Indefrey & Levelt, 2004).

Исходя из полученных результатов и на основании проведенного теоретического анализа, можно представить следующую схему фонематического восприятия и проговаривания, которая вдохновлена моделью Левелта (рис. 6).

Рисунок 6

Схема взаимосвязи фонематического восприятия и проговаривания



В отличие от схемы Левелта (Indefrey & Levelt, 2004), мы рассматриваем план лишь на уровне фонематических единиц. В данном случае мы полагаем, что важным условием даже фонематического плана является мотивационный компонент речи, т. к. на данном уровне происходят оценка и планирование потенциального результата. Детекция фонем и слогов, воспринимаемых на основе зрительного или слухового входа, кодируется в восприятии по-разному, что было показано в других проведенных нами исследованиях (Вартанов и др., 2021), что также согласуется с моделью Левелта. Этап ориентировочной артикуляционной предобработки осуществляет процесс распада фонемы на составляющие (субфонемные кванты) или команды к моторному действию (кинакемы) (Плоткин, 1993) и запускает упреждающий разряд на определенные мозговые зоны, что отличает нашу модель от модели Левелта. На этапе концептуальной детекции происходит сбор из отдельных перцептивных признаков в единый образ фонематической единицы и включает в себя то, что описывалось В. Левелтом как концептуализатор (Levelt et al., 1999). На данный образ влияют форма подачи стимула, его тоновые характеристики, а также мотивация, существующая у человека в момент получения стимула. На этапе фонетического кодирования осуществляется построение программы для артикуляторных действий, связанных с будущим слуховым образом, который должен получиться в результате произношения, а также закладываются характеристики к произношению фонем или слогов с учетом влияния мотивационного компонента и образа, сформированного на уровне концептуальной детекции. Например, голос диктора может задавать интонацию в задаче проговаривания на основе аудиального стимула. Кроме того, на этом этапе происходит сравнение полученной программы с тем образом, который сформировался в буфере концептуальной детекции для проверки точности. В случае ошибки происходит коррекция программы моторных действий. При реализации команды на проговаривание полученный образ попадает на блок первичной детекции стимула с целью корректировки целостного образа. При мысленном проговаривании (при торможении внешней речи) сигнал с уровня фонетического кодирования поступает обратно на блок концептуальной детекции, что обеспечивает процесс возникновения звукового образа фонемы или слога в отсутствии внешнего стимула.

Заключение

1. Продемонстрировано, что запуск команды на проговаривание в сравнении с фонематическим слушанием отражается в ранних компонентах вызванного потенциала, однако в поздних компонентах (от 300 до 500 мс) амплитуды не было найдено различий, что можно объяснить в терминах упреждающего разряда.
2. Фонематическое восприятие связано с внутренним проговариванием, при фонематическом восприятии происходит активация конвенциональных зон, связанных также и с производством речи.
3. Существуют различия в моторном проговаривании на уровне сопутствующих речевых зон, в частности мозжечка при проговаривании фонем и слогов. Подобное обнаруживается и при восприятии в сравнении с фоном. Одним из возможных объяснений служит эмуляция данной зоной существующих функциональных корковых связей. Данные результаты дополняют модель Левелта. Полагаем, что выраженность артикуляционных (мышечных) команд отражается и на уровне сопутствующих речевых зон.
4. Активация зоны BA38R говорит нам о влиянии интонационных характеристик (в частности,

параметры голоса диктора) на фонематическое проговаривание и восприятие, что во многом подтверждает идею о влиянии задающего стимула на речевой процесс.

5. На основании полученных результатов и теоретического обзора была предложена схема (рис. 6) фонематического восприятия и проговаривания, вдохновленная моделью Левелта.

Литература

- Вартанов, А. В., Суюнчева, А. Р., Шевченко, А. О. (2021). Механизмы внутреннего проговаривания и восприятия при разных типах внешней инициации. *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*, 25(4), 302–306.
- Горелов, И. Н., Седов, К. Ф. (2001). *Основы психолингвистики. Учебное пособие* (3-е изд., перераб. и доп.). Лабиринт.
- Плоткин, В. Я. (1993). *Фонологические кванты*. Сибирская издательская фирма ВО «Наука».
- Ardila, A., Bernal, B., & Rosselli, M. (2015). Language and visual perception associations: Meta-analytic connectivity modeling of Brodmann area 37. *Behavioural Neurology*, 2015. <https://doi.org/10.1155/2015/565871>
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: A practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 57(1), 289–300. <https://doi.org/10.1111/J.2517-6161.1995.TB02031.X>
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2002a). Modality independence of word comprehension. *Human Brain Mapping*, 16(4), 251–261. <https://doi.org/10.1002/hbm.10054>
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2002b). Functional anatomy of intra- and cross-modal lexical tasks. *NeuroImage*, 16(1), 7–22. <https://doi.org/10.1006/nimg.2002.1081>
- Chou, T.-L., Booth, J. R., Bitan, T., Burman, D. D., Bigio, J. D., Cone, N. E., Lu, D. & Cao, F. (2006). Developmental and skill effects on the neural correlates of semantic processing to visually presented words. *Human Brain Mapping*, 27(11), 915–924. <https://doi.org/10.1002/hbm.20231>
- De Carli, D., Garreffa, G., Colonnese, C., Giuliotti, G., Labruna, L., Briselli, E., Ken, S., Macrì, M. A., & Maraviglia, B. (2007). Identification of activated regions during a language task. *Magnetic Resonance Imaging*, 25(6), 933–938. <https://doi.org/10.1016/j.mri.2007.03.031>
- Dell, G. S. (1986). A spreading-activation theory of retrieval in sentence production. *Psychological Review*, 93(3), 283–321. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.93.3.283>
- Demb, J. B., Desmond, J. E., Wagner, A. D., Vaidya, C. J., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1995). Semantic encoding and retrieval in the left inferior prefrontal cortex: A functional MRI study of task difficulty and process specificity. *The Journal of Neuroscience*, 15(9), 5870–5878. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.15-09-05870.1995>
- Devlin, J. T., Matthews, P. M., & Rushworth, M. F. S. (2003). Semantic processing in the left inferior prefrontal cortex: A combined functional magnetic resonance imaging and transcranial magnetic stimulation study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(1), 71–84. <https://doi.org/10.1162/089892903321107837>
- Flowers, D. L., Jones, K., Noble, K., VanMeter, J., Zeffiro, T. A., Wood, F. B., & Eden, G. F. (2004). Attention to single letters activates left extrastriate cortex. *NeuroImage*, 21(3), 829–839. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2003.10.002>
- Fox, P. T., Ingham, R. J., Ingham, J. C., Zamarripa, F., Xiong, J.-H., & Lancaster, J. L. (2000). Brain

- correlates of stuttering and syllable production: A PET performance-correlation analysis. *Brain*, 123(10), 1985–2004. <https://doi.org/10.1093/brain/123.10.1985>
- Garn, C. L., Allen, M. D., & Larsen, J. D. (2009). An fMRI study of sex differences in brain activation during object naming. *Cortex*, 45(5), 610–618. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.02.004>
- Indefrey, P., & Levelt, W. J. M. (2004). The spatial and temporal signatures of word production components. *Cognition*, 92(1–2), 101–144. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2002.06.001>
- Kiyosawa, M., Inoue, C., Kawasaki, T., Tokoro, T., Ishii, K., Ohyama, M., Senda, M., & Soma, Y. (1996). Functional neuroanatomy of visual object naming: A PET study. *Graefes Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 234, 110–115. <https://doi.org/10.1007/BF00695250>
- Levelt, W. J. M., Roelofs, A., & Meyer, A. S. (1999). A theory of lexical access in speech production. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(1), 1–38. <https://doi.org/10.1017/S0140525X99001776>
- McDermott, K. B., Petersen, S. E., Watson, J. M., & Ojemann, J. G. (2003). A procedure for identifying regions preferentially activated by attention to semantic and phonological relations using functional magnetic resonance imaging. *Neuropsychologia*, 41(3), 293–303. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(02\)00162-8](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(02)00162-8)
- Morais, J., & Kolinsky, R. (1994). Perception and awareness in phonological processing: The case of the phoneme. *Cognition*, 50(1–3), 287–297. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90032-9](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90032-9)
- Nakamura, K., Kawashima, R., Sugiura, M., Kato, T., Nakamura, A., Hatano, K., Nagumo, S., Kubota, K., Fukuda, H., Ito, K., & Kojima, S. (2001). Neural substrates for recognition of familiar voices: A PET study. *Neuropsychologia*, 39(10), 1047–1054. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(01\)00037-9](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(01)00037-9)
- Oppenheim, G. M., & Dell, G. S. (2008). Inner speech slips exhibit lexical bias, but not the phonemic similarity effect. *Cognition*, 106(1), 528–537. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.02.006>
- Oppenheim, G. M., & Dell, G. S. (2010). Motor movement matters: The flexible abstractness of inner speech. *Memory & Cognition*, 38, 1147–1160. <https://doi.org/10.3758/MC.38.8.1147>
- Patel, R. S., Bowman, F. D., & Rilling, J. K. (2006). Determining hierarchical functional networks from auditory stimuli fMRI. *Human Brain Mapping*, 27(5), 462–470. <https://doi.org/10.1002/hbm.20245>
- Robinson, J. L., Barron, D. S., Kirby, L. A. J., Bottenhorn, K. L., Hill, A. C., Murphy, J. E., Katz, J. S., Salibi, N., Eickhoff, S. B., & Fox, P. T. (2015). Neurofunctional topography of the human hippocampus. *Human Brain Mapping*, 36(12), 5018–5037. <https://doi.org/10.1002/hbm.22987>
- Sarmiento, L. C., Lorenzana, P., Cortes, C. J., Arcos, W. J., Bacca, J. A., & Tovar, A. (2014). Brain computer interface (BCI) with EEG signals for automatic vowel recognition based on articulation mode. In *5th ISSNIP-IEEE Biosignals and Biorobotics Conference (2014): Biosignals and Robotics for Better and Safer Living (BRC)* (pp. 1–4). <https://doi.org/10.1109/brc.2014.6880997>
- Scott, M., Yeung, H. H., Gick, B., & Werker, J. F. (2013). Inner speech captures the perception of external speech. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4). <https://doi.org/10.1121/1.4794932>
- Shuster, L. I., & Lemieux, S. K. (2005). An fMRI investigation of covertly and overtly produced mono- and multisyllabic words. *Brain and Language*, 93(1), 20–31. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2004.07.007>
- Whitney, C., Weis, S., Krings, T., Huber, W., Grossman, M., & Kircher, T. (2009). Task-dependent modulations of prefrontal and hippocampal activity during intrinsic word production. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21(4), 697–712. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21056>
- Ziegler, W. (2016). Chapter 1 – The Phonetic Cerebellum: Cerebellar Involvement in Speech Sound Production. *The Linguistic Cerebellum*, 1–32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801608-4.00001-3>

Шевченко А. О., Вартанов А. В.

СРАВНЕНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОНЕМАТИЧЕСКОГО ВОСПРИЯТИЯ И ВНУТРЕННЕГО ПРОГОВАРИВАНИЯ ФОНЕМ И СЛОГОВ...

Российский психологический журнал, 2022, Т. 19, № 4, 186–210. doi: 10.21702/rpj.2022.4.13

ПСИХОФИЗИОЛОГИЯ

Поступила в редакцию: 03.11.2022

Поступила после рецензирования: 12.12.2022

Принята к публикации: 20.12.2022

Заявленный вклад авторов

Андрей Олегович Шевченко – разработка исследования, обработка результатов исследования, написание текста статьи.

Александр Валентинович Вартанов – разработка исследования, обработка результатов исследования, написание текста статьи.

Информация об авторах

Андрей Олегович Шевченко – аспирант, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва, Российская Федерация; ResearcherID: GLQ-7645-2022, SPIN-код: 9970-3878, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9118-2617>, e-mail: andreyshevchenkomsu@gmail.com

Александр Валентинович Вартанов – кандидат психологических наук, доцент по специальности, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», г. Москва, Российская Федерация; Scopus Author ID: 6603018783, ResearcherID: D-9907-2012, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8844-9643>, e-mail: a_v_vartanov@mail.ru

Информация о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.