

УДК: 159.91

doi: 10.11621/vsp.2022.01.09

ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ВНУТРЕННЕГО ПРОГОВАРИВАНИЯ ФОНЕМ

А.В. Вартанов*¹, А.О. Шевченко²

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, a_v_vartanov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8844-9643>

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия, andreyshevchenkomsu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9118-2617>

* Автор, ответственный за переписку: a_v_vartanov@mail.ru

Актуальность. Проблема выявления мозговых механизмов внутренней речи (проговариваемых мысленно слов или даже отдельных звуков — фонем) на основе электрической активности мозга актуальна и значима для ряда практических приложений, в частности для усовершенствования построений интерфейсов мозг-компьютер.

Цель. Электроэнцефалографическое исследование направлено на выявление мозговых механизмов внутренней речи с учетом модальности ее инициализации.

Методика. В исследовании на 25 испытуемых регистрировалась 19-канальная ЭЭГ в процессе выполнения трех задач на восприятие и внутреннее проговаривание семи фонем русского языка: А, Б, Ф, Г, М, Р, У, которые предъявлялись визуально и аудиально. Анализ полученных ЭЭГ данных проводился с помощью нового авторского способа локализации мозговой активности «виртуально вживленный электрод» (разработчик А.В. Вартанов), который позволяет по данным скальповой ЭЭГ реконструировать электрическую активность, источник которой располагается в определенном месте внутри головы (исследовалась активность в 33 различных точках мозга).

Результаты. Получены усредненные вызванные потенциалы для всех исследуемых областей мозга и выявлены функциональные связи этих структур в виде графов связности для соответствующих условий.

Выводы. Обнаружено, что процессы проговаривания, выраженные в ВП, различаются в зависимости от модальности исходной формы производимого образа — при зрительном восприятии в большей степени участвует супромаргинальная извилина. Выявлена синхронизированная активность ряда мозговых зон, обеспечивающих внутреннюю речь. Особую роль играет активность гиппокампа и бледного шара (Gl. Palidus). Форма ВП при восприятии во многом схожа с его формой при проговаривании.

Активация при зрительном входе почти всегда значительно выше, чем при аудиальном.

Ключевые слова: внутреннее проговаривание, внутренняя речь, вызванные потенциалы, функциональная связность.

Для цитирования: Вартанов А.В., Шевченко А.О. Психофизиологические механизмы внутреннего проговаривания фонем // Вестник Московского университета. Серия 14. Психология. 2022. № 1. С. 201–220. doi: 10.11621/vsp.2022.01.09

PSYCHOPHYSIOLOGICAL MECHANISMS OF INTERNAL PRONUNCIATION OF PHONEMES

Aleksander V. Vartanov^{*1}, Andrey O. Shevchenko²

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, a_v_vartanov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8844-9643>

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, andreyshevchenkomsu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9118-2617>

*Corresponding author: a_v_vartanov@mail.ru

Relevance. The problem of identifying the cerebral mechanisms of internal speech (spoken words or even individual sounds — phonemes) based on the electrical activity of the brain is relevant and significant for a number of practical applications, in particular for improving the construction of brain-computer interfaces.

Target. Electroencephalographic research is aimed at identifying the cerebral mechanisms of internal speech, taking into account the modality of its initialization.

Methodology. In a study on 25 subjects, a 19-channel EEG was recorded in the process of performing three tasks on perception and internal pronunciation of seven phonemes of the Russian language: A, B, F, G, M, R, U, which were presented visually (in the form of letters) and audibly. The analysis of the obtained EEG data was carried out using a new author's method of localizing brain activity "virtually implanted electrode" (developed by A.V. Vartanov), which allows, according to scalp EEG data, to reconstruct electrical activity, the source of which is located in a certain place inside the head (activity was studied in 33 different points of the brain).

Results. The averaged evoked potentials were obtained for all the studied areas of the brain and the functional connections of these structures were revealed in the form of connectivity graphs for the corresponding conditions.

Conclusions. It was found that the processes of pronunciation, expressed in EP, differ depending on the modality of the initial form of the reproduced image — in visual perception, the supromarginal gyrus is more involved. The synchronized

activity of a number of cerebral zones providing internal speech was revealed. A special role is played by the activity of the hippocampus and the pallidus (Gl. Palidus). The form of the EP when perceived is in many ways similar to its form when pronouncing. Activation at visual input is almost always significantly higher than at auditory input.

Key words: internal pronunciation, internal speech, evoked potentials, functional connectivity.

For citation: Vartanov, A.V., Shevchenko, A.O. (2022) Psychophysiological mechanisms of internal pronunciation of phonemes. *Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya 14. Psikhologiya* [Moscow University Psychology Bulletin], 1, P. 201–220. doi: 10.11621/vsp.2022.01.09

Введение

Внутренняя речь — универсальный механизм, благодаря которому происходит не только логическая обработка чувственных данных, но и их осознание в индивидуальной системе суждений. Элементы беззвучных речевых процессов проявляются как в произвольных, так и в сознательных действиях в виде самоинструкций, вербальной интерпретации восприятий или речевых установках (Соколов, 1984). В соответствии с теорией Л.С. Выготского (Выготский, 2019), внешняя речь посредством механизма интериоризации усваивается ребенком и превращается во внутренний «диалог». В дальнейшем такое словесное опосредование используется ребенком в саморегуляции и реализации других когнитивных функций. «Речь для себя» отражает переходную стадию, когда социализированная речь еще не полностью трансформировалась во внутреннюю речь. Л.С. Выготский впервые подметил, что «речь для себя» является основой вербального мышления. В современных исследованиях в области когнитивных наук к функциям внутренней речи стали относить функции самосознания, памяти, эмоциональной рефлексии и др. (Alderson-Day et al., 2016). В настоящее время также признается тот факт, что «речь для себя» не исчезает, а трансформируется во внутреннюю речь и сохраняется не только у детей, но и у взрослых.

Внутренняя речь характеризуется беззвучностью, ситуативностью, обобщенностью, а также фрагментарностью. Особенности, являющиеся специфическими для внутренней речи, в зависимости от условий могут проявляться во внешней речи. Субвокализация — это мысленное проговаривание, которое позволяет вообразить звучание слов.

Для произношения фонем вслух необходимо выдохнуть из легких воздух с целью создания воздушного потока через голосовой тракт и посредством голосовых органов сформировать звучание. При производстве звонких и фрикативных звуков (например, «С») задействуются голосовые связки (гортань), зубы, язык и губы. Для гласных звуков, как и в случае со звонкими и фрикативными, необходимо выпустить воздух из легких, однако, если объем воздуха будет недостаточным для возбуждения голосовых связок, звук будет произнесен шепотом. Колебание голосовых связок происходит только при определенном количестве выдыхаемого воздуха, таким способом задается громкость речи. При этом имеется специфическая мозговая активность, связанная с артикуляцией отдельных фонем. Фонема является базовой единицей речи, из элементов фонем формируются слоги и слова. Поскольку внутренняя и внешняя речь генетически связаны, можно ожидать, что подобная мозговая активность будет выявляться и для мысленного проговаривания фонем. В результате сопоставления электромиограммы (ЭМГ), используемой в качестве контроля артикуляторных движений, и ЭЭГ удалось показать (Бахтин, Кривко, Киroy, 2020), что в ситуации мысленного произнесения слов средние значения максимумов кросскорреляции между ЭЭГ и ЭМГ в целом выше, однако из-за артефактов результаты оказались не столь обнадеживающими. Как и ожидалось, мощность ЭМГ при реальном проговаривании слов была статистически значимо выше, чем при мысленном.

Нейрофизиологические корреляты внутреннего проговаривания

Основу в области исследования физиологических механизмов речи составляют труды Вернике и Брока, написанные еще XIX веке. Ими были зафиксированы изменения в понимании речи, а также моторные нарушения речи при повреждении определенных участков левого полушария головного мозга. В науке сложилось мнение о том, что за работу конкретного органа отвечают отдельные центры, находящийся в коре головного мозга. Также, существовала идея о «двигательном центре», отвечающем за функционирование речевого аппарата, однако данная точка зрения не получила дальнейшего развития, поскольку была скорректирована в ряде дальнейших исследований, которые проводились в том числе и А.Р. Лурией.

Некоторые отделы коры мозга играют особую, главенствующую роль в процессе речеобразования:

- Лобные извилины — образование устной речи (центр Брока);
- Височные извилины (центр Вернике) теменная доля коры головного мозга — восприятие и понимание чужой речи;
- Подкорковые ядра — ритм, темп и выразительность речи.
- Затылочная доля — восприятие письменной речи.

Но в этот сложный процесс вовлекаются и другие области мозга, которые являются функциональными единицами. В целом когнитивная обработка определяется сложным функциональным взаимодействием между сетями корковых и подкорковых областей.

Не меньшую роль в процессе внутренней речи играет обработка слуховой информации, которая осуществляется в ряде областей коры, обнаруженных в нижней части боковой борозды и прилежащих к верхней височной извилине. Первичная слуховая кора, которая находится в центральной части извилины Хешли, имеет типичный кортикальный вид всех первичных сенсорных областей.

Однако до настоящего времени нет полного системного представления о мозговых механизмах, включая не только роль отдельных структур, но и их функциональную связность. Цель настоящего исследования: на основе нового способа локализации по данным ЭЭГ выявить систему активности и функциональной связности 33 структур, включая все подкорковые образования, а также области коры, тем или иным образом вовлеченных в процесс внутреннего проговаривания.

Методика

Испытуемые

В исследовании принимали участие 25 испытуемых: пятнадцать девушек и десять юношей в возрасте от 17 до 28 лет. Образование испытуемых — неоконченное высшее или высшее. Все испытуемые не имели в анамнезе черепно-мозговых травм, психических заболеваний и были правшами.

Оборудование

Для записи и редактирования ЭЭГ с целью исключения артефактов использовалась программа 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 Neurobehavioral Systems, Inc.).

Стимулы

При выборе стимулов за основу была взята классификация В.Я. Плоткина (1993), в соответствии с которой были взяты по одному примеру для каждой из семи выделяемых им для русского языка подгрупп:

- 1) А — [(а)] — Широкорастворность
- 2) Б — [б] — Шумность и смычность
- 3) Ф — [эф] — Палатализация для твердых согласных
- 4) Г — [г] — Зацентральность
- 5) М — [эм] — Предцентральность
- 6) Р — [р] — Сонорность
- 7) У — [у] — Гласная заднего ряда лабилизированная

Данные стимулы были представлены в двух вариантах — аудиально и зрительно. При аудиальном предъявлении использовались записи, наговоренные мужским голосом, в которых данные фонемы представлены короткими звуками, без дополнительных звуков и возможности образования слогов. При визуальном предъявлении использовались соответствующие буквы, которые, конечно, могли читаться с дополнительными звуками (например, в виде слогов), однако испытуемые были проинструктированы, что должны читаться только фонемы в виде одного основного звука.

Процедура эксперимента

Стимулы предъявлялись в случайном порядке. Начало проговаривания задавалось специальным сигналом (коротким звуком), который давался после предъявления стимула, задающего, какую именно фонему необходимо проговорить. Аудиальные стимулы предъявлялись через наушники. При этом в центре экрана предъявлялся крестик, на котором требовалось фиксировать взгляд.

Были проведены следующие серии эксперимента:

Контрольная серия — испытуемому демонстрировались фонемы в случайном порядке зрительно и аудиально, его задачей было вспомнить, что он делал в течение недели (но не произносить про себя).

Эксперимент с инициализацией внутреннего проговаривания на основе визуального стимула (задающего фонему). Испытуемому нужно было построить звуковой образ (прочитать фонему). Данная серия проводится с открытыми глазами.

Эксперимент с инициализацией внутреннего проговаривания на основе аудиального стимула (фоном). В этой серии звуковой образ уже существует, его надо только повторить. Данная серия проводилась с закрытыми глазами.

Анализ данных

Для исключения артефактов проводился визуальный анализ ЭЭГ, а дальнейший анализ проводился с помощью авторского способа определения локализации мозговой активности «виртуально вживленный электрод» (разработчик А.В. Вартанов, метод находится в стадии патентования в РФ). Эта технология позволяет по данным скальповой ЭЭГ реконструировать электрическую активность, источник которой располагается в определенном месте внутри головы, заранее заданными координатами относительно скальповых электродов. Способ базируется на анализе динамики и коррелированности изменений сигнала по отведениям, но с добавлением искусственно сгенерированных данных, рассчитанных на основе расстояний от исследуемой точки до скальповых электродов. Используется более адекватная модель источника низкочастотной (до 32 Гц) ЭЭГ и закон линейного убывания электрического потенциала от расстояния. С помощью факторного анализа главных компонент (РСА) и ортогонального вращения однозначно находится один фактор, который заведомо существует в объединенном массиве экспериментальных и искусственно сгенерированных данных. Каждый потенциальный источник находится независимо от других, поэтому предложенный способ не требует оценки возможного числа источников. Полученные и денормализованные факторные значения для экспериментальной ЭЭГ можно интерпретировать в качестве электрической активности «локального поля» при вживлении электрода в соответствующую точку мозга. Метод не допускает появления ложной активности, возможна специальная процедура очистки, что позволяет исключить влияние соседних областей и выявлять собственную электрическую активность данной области мозга. Наиболее близким к такой процедуре является метод пространственной фильтрация (представлен в US Patent № 5263488, авторы Van Veen, Joseph, Necoх, 23.11.1993), а также его последующее развитие в виде группы методов локализации источников, объединенных общим названием «формирование диаграммы направленности» (beamforming). В отличие от них, используемый способ решает эту задачу по-другому, что позволяет получать однозначное и надежное решение. Поскольку к одним и тем же ЭЭГ

данным такой способ можно применять неограниченное число раз, то осуществляется дополнительная «очистка», когда из активности, генерируемой в заданной точке, вычитается активность окружающих точек (с диаметром в 1 см).

В результате была исследована активность в 33 точках, выбранных по атласу MNI152 в центре следующих структур: Brainstem, Mesencephalon, Hypothalamus, Caput n.Caudati L, Caput n.Caudati R, Medula Oblongata, G. Cingulate Medialis, Globus Pallidus Medialis L, Globus Pallidus Medialis R, Corpus Amygdaloideum L, Corpus Amygdaloideum R, Anterior Cingulate BA32, Dorsomedial prefrontal cortex BA9 L, Dorsomedial prefrontal cortex BA9 R, Hippocampus L, Hippocampus R, Insula L BA13, Insula R BA13, Parietal cortex BA7 L, Parietal cortex BA7 R, Putamen L, Putamen R, Supramarginalgyrus BA40 L, Supramarginalgyrus BA40 R, Thalamus L, Thalamus R, V1 BA17 L, V1 BA17 R, Ventral Striatum BA25. По каждой из этих структур усреднялся вызванный потенциал для случая восприятия и внутреннего проговаривания фонем, а также в качестве показателя функциональной связности рассчитывались коэффициенты корреляции по этим ВП между исследуемыми парами этих структур. При этом исследовались также «эффективные» (то есть причинно-следственные) связи за счет поиска задержки (сдвига по латентности) ВП в одной структуре относительно ВП в другой, которая максимизирует по абсолютной величине соответствующий коэффициент. Это позволило определить направление причинных связей на основе факта предшествования изменений активности.

Результаты

На основе локализации ЭЭГ активности для каждого отдельного испытуемого была осуществлена процедура усреднения вызванного потенциала по всей группе испытуемых по всем предъявленным фонемам с оценкой 95% доверительного интервала для четырех анализируемых случаев: восприятия и мысленного проговаривания с учетом модальности инициализации. Полученные ВП на картинках далее представлены следующим образом:

1) Восприятие

Метка 1 — Аудиальное предъявление стимула

Метка 2 — Визуальное предъявление стимула

2) Проговаривание

Метка 3 — Проговаривание при аудиальной инициализации

Метка 4 — Проговаривание при визуальной инициализации

Таким образом, это дает возможность оценить выраженность компонентов ВП, а метод локализации позволяет оценить ВП в тех источниках, что больше всего были представлены функциональной связанностью.

С помощью нового метода пространственной локализации активности выявлены более тонкие изменения биоэлектрической активности, которые можно наблюдать в следующих структурах: Зоны Брока и Вернике, Gl. Palidus, Hippocampus, Supromarg, BA22.

На рис. 1 представлены ВП, локализуемые в правом бледном шаре (Gl. Palidus), где, с одной стороны, видна существенная разница ВП при различных условиях инициализации, как для процесса восприятия, так и для процесса проговаривания. При этом, с другой стороны, можно отметить сходство ВП для одних и тех же условий инициализации при проговаривании и восприятии. Далее показаны ВП для речевых областей коры (рис. 2) — сенсорной области (Вернике) и гомологичной ей области правого полушария и моторной (Брока).

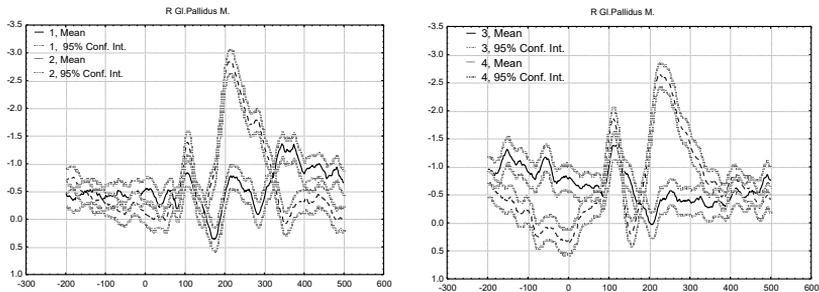


Рис. 1. ВП на восприятие (слева) и ВП на сигнал проговаривания (справа), локализуемый в правом бледном шаре. Здесь и далее сплошной линией представлены ВП, инициированные аудиально, а штрихпунктирной линией — визуально. Мелким пунктиром представлены соответствующие 95% доверительные интервалы. По горизонтальной оси время в мс, по вертикальной — амплитуда в мкВ. Цифры означают: 1 — ВП при аудиальном восприятии, 2 — ВП при зрительном восприятии, 3 — ВП при внутреннем проговаривании и аудиальной инициализации, 4 — ВП при внутреннем проговаривании и визуальной инициализации

Fig. 1. EP for perception (left) and EP for the pronunciation signal (right), localized in the right pale ball. Here and below, the solid line represents EPs initiated auditorily, and the dash-dotted line, visually. The small dotted line represents the corresponding 95% confidence intervals. On the horizontal axis, time in ms; on the vertical axis, amplitude in μV . The numbers mean: 1 — EP for auditory perception, 2 — EP for visual perception, 3 — EP for internal pronunciation and auditory initialization, 4 — EP for internal pronunciation and visual initialization

Видно, что в моторной речевой зоне (Брока) ВП существенно меньше по амплитуде, чем в сенсорной области (Вернике) и меньше при проговаривании, чем при восприятии не зависимо от модальности инициализации.

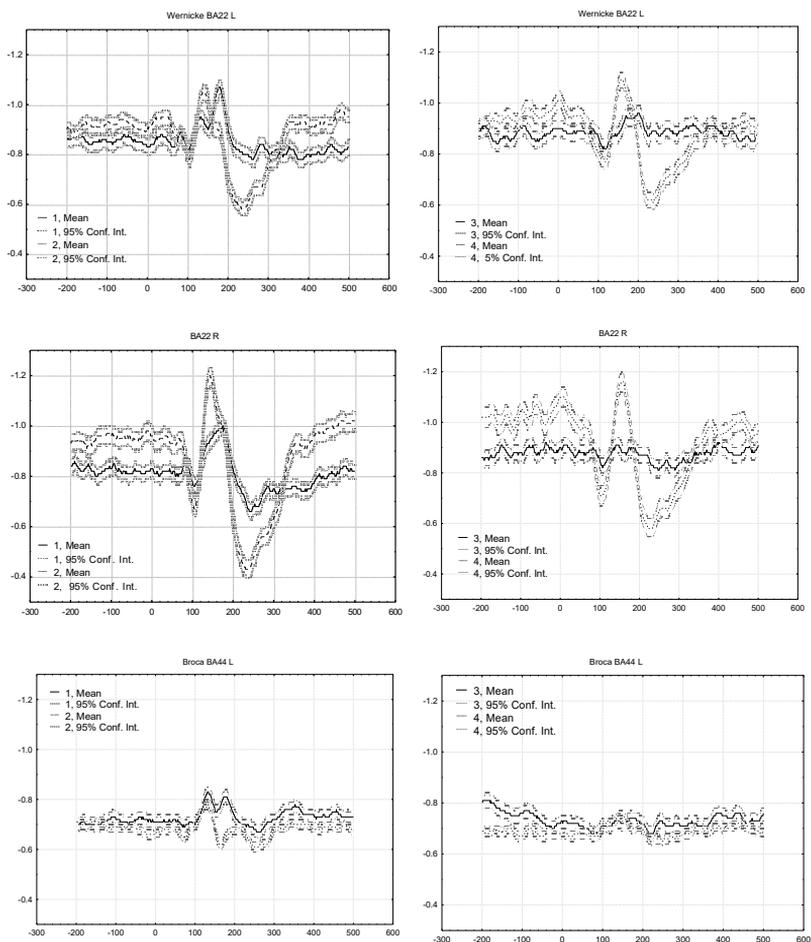


Рис. 2. ВП на восприятие (слева) и ВП на сигнал проговаривания (справа), локализуемый в области Вернике (БА 22 слева) (вверху) и гомологичной области в правом полушарии (БА 22 справа) — в середине, а также в области Брока (внизу)

Fig. 2. EP for perception (left) and EP for the speaking signal (right), localized in Wernicke's area (BA 22 on the left) (top) and the homologous area in the right hemisphere (BA 22 on the right) — in the middle, as well as in Broca's area (at the bottom)

На рис. 3 представлены ВП в области гиппокампа (в левом и правом полушарии). Ответ в этой структуре при восприятии и проговаривании может быть связан с необходимостью запоминать предъявленную фонему. При этом можно видеть, что амплитуда ответа больше при визуальной инициализации, а также следует обратить внимание, что при восприятии фонемы при аудиальном предъявлении имеется удвоенный пик ВП — P150 и P180, тогда как при визуальном предъявлении наблюдается только один более ранний пик P150. Это может быть связано с необходимостью перекодирования слухового образа, поскольку при аудиальном предъявлении он уже существует, но, видимо, не в том виде, который необходим для запоминания, тогда как при зрительном предъявлении он формируется

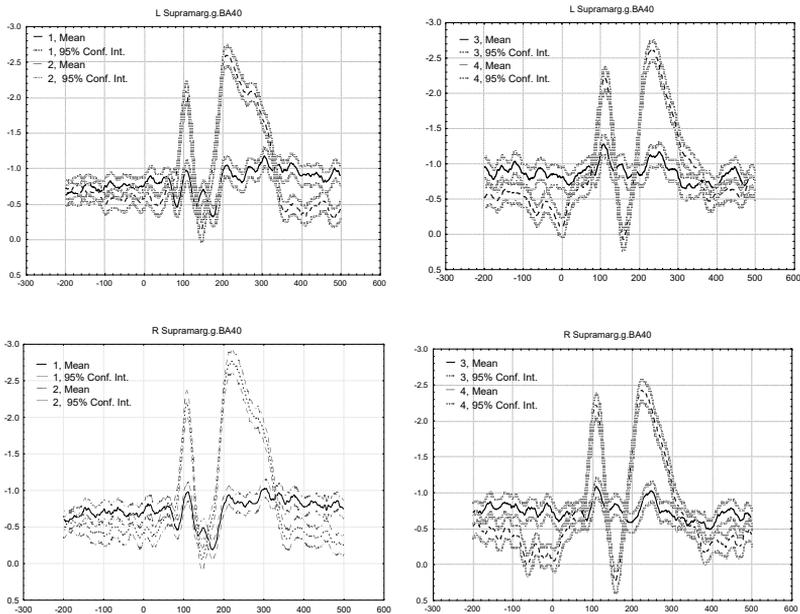


Рис. 3. ВП на восприятие (слева) и ВП на сигнал проговаривания (справа), локализуемый в гиппокампе в левом полушарии (вверху) и в правом полушарии (внизу)

Fig. 3. EP for perception (left) and EP for the utterance signal (right), localized in the hippocampus in the left hemisphere (top) and in the right hemisphere (bottom)

заново уже в том виде, который нужен для запоминания. Это подтверждается отсутствием такого удвоенного пика при мысленном проговаривании фонем, не смотря на то, что в целом форма ВП в гиппокампе при проговаривании достаточно сходна с формой ВП при восприятии.

На рис. 4 представлены ВП, локализуемые в супромаргинальной извилине левого и правого полушарий.

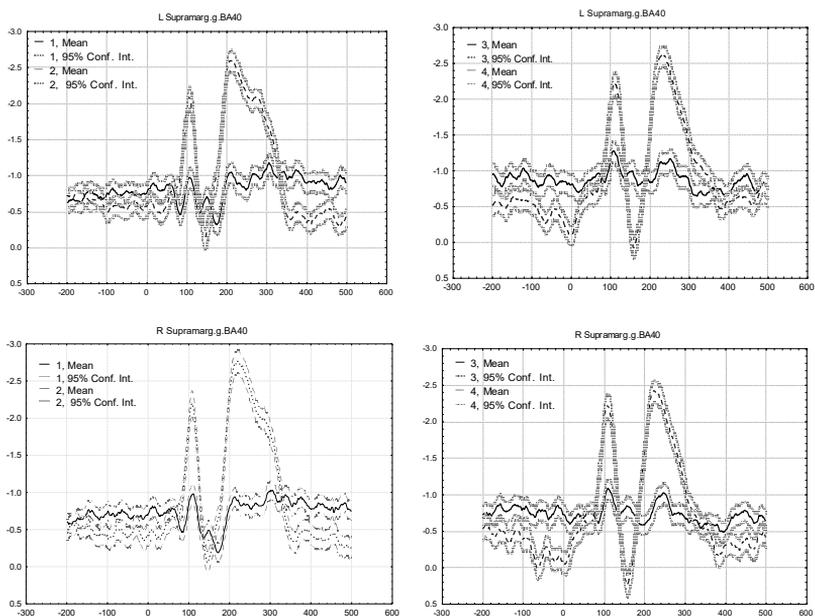


Рис. 4. ВП на восприятие (слева) и ВП на сигнал проговаривания (справа), локализуемый в супромаргинальной извилине в левом полушарии (вверху) и в правом полушарии (внизу)

Fig. 4. EP for perception (left) and EP for the utterance signal (right), localized in the supramarginal gyrus in the left hemisphere (top) and in the right hemisphere (bottom)

На рис. 5 представлены сопоставительные ориентированные графы связности исследованных мозговых структур. Показаны наиболее сильные корреляционные связи (значения коэффициентов корреляции подписано сверху линии), сплошными линиями

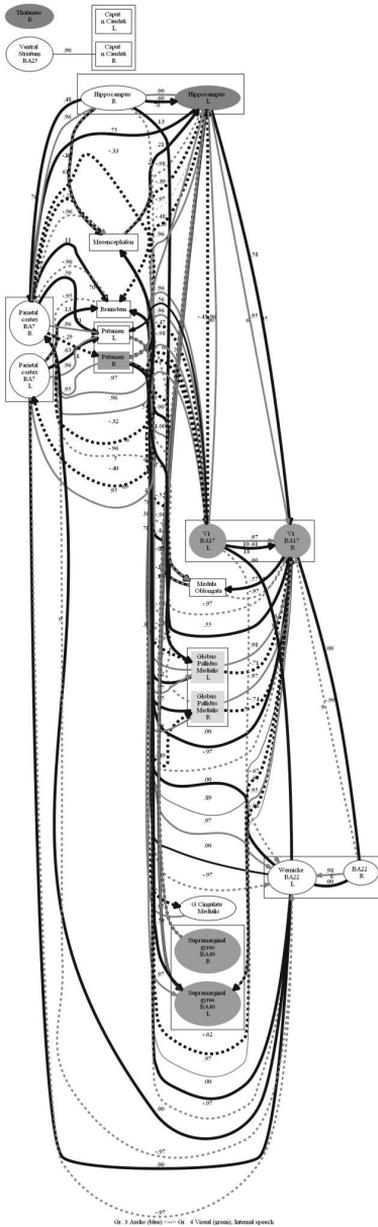


Рис. 5. Сопоставительные ориентированные графы связности исследованных мозговых структур (показаны наиболее сильные связи). Вверху — для восприятия, внизу — для проговаривания. Жирными черными и серыми линиями показаны те связи, которые различаются в зависимости от модальности инициации (черные — для аудиальной, а серые — для визуальной инициации). Темно-серым выделены те структуры, активность которых различается от модальности инициализации проговаривания, а светло-серым — те, амплитуда ответа которых одинаково большая (входит в первый квантиль по амплитуде ответа) независимо от модальности инициации. Сплошными линиями показаны положительные (тормозные) связи, а пунктиром — отрицательные (тормозные) связи (значение коэффициента корреляции показано сверху соответствующей линии). Стрелками обозначены причинные связи, определяемые по запаздыванию или сдвигу по латенции ВП в одной структуре по отношению к другой, если это приводит к увеличению корреляции (величина задержки в мс указана под соответствующей линией)

Fig. 5. Comparative oriented graphs of connectivity of the studied brain structures (the strongest connections are shown). Above — for perception, below — for mental pronunciation. Bold black and gray lines show those connections that differ depending on the modality of initiation (black for auditory and gray for visual initiation). Dark gray highlights those structures whose activity differs from the modality of initialization of pronunciation, and light gray those whose response amplitude is equally large (included in the first quantile in response amplitude) regardless of the modality of initiation. Solid lines show positive connections, and dotted lines show negative (inhibitory) connections (the value of the correlation coefficient is shown at the top of the corresponding line). Arrows indicate causal relationships determined by the delay or shift in EP latency in one structure relative to another, if this leads to an increase in correlation (the delay value in ms is indicated under the corresponding line)

показаны положительные связи, а пунктиром — отрицательные (тормозные) связи. Стрелками обозначены причинные связи, определяемые по запаздыванию или сдвигу по латенции ВП в одной структуре по отношению к другой, если это приводит к увеличению корреляции.

На этом рисунке видно, что при восприятии значительную роль играют связи зрительной коры с париетальной корой и областью Вернике. Подкорковые ядра, в особенности путамен и бледные шары также существенно связаны со зрительной корой и областью супромаргинальной извилины. Особый блок образуют структуры, связанные с эмоциональной оценкой — стриатум, миндалина в связях с гипоталамусом, хвостатыми ядрами и цингулярной корой. При выполнении проговаривания возникает несколько другой коннектом — выделяются узлы 1) подкорковых ядер (с доминированием путамена) и париетальной коры, 2) гиппокампа, и 3) большой узел взаимосвязей бледных шаров, зрительной коры, области Вернике и супромаргинальной коры. При этом следует отметить, что активность бледных шаров практически не зависит от условий инициализации внутреннего проговаривания, а моторные речевые зоны (Брока) не представлены ни для восприятия, ни для проговаривания (отсутствуют сильные связи этой области с другими структурами). Это позволяет заключить, что внутреннее проговаривание, в отличие от внешнего, не требует тонкого управления артикуляторными движениями, которые обеспечиваются корой области Брока, а внутренний звуковой образ соответствующей фонемы возникает в области Вернике под управлением подкорковых ядер — путамена и бледных шаров при взаимодействии с гиппокампом и зрительной корой (в первую очередь для визуальной инициализации).

Обсуждение результатов

Количественный анализ связей между областями мозга стал более широко использоваться для изучения мозга как сложной сети, что привело к возникновению новой области исследований, называемой Brain Connectomics (наука о связях, или коннектомика мозга). При этом различаются анатомические связи (исследуемые обычно с помощью методов диффузионно взвешенной фМРТ или трактографии) и функциональные связи. В настоящее время доминирующими концепциями организации сложных когнитивных процессов в головном мозге являются теории пространственно-временной интеграции

параллельных и относительно специализированных сетей, лежащих в основе большинства высших нервных функций человека. Речь — это сложный когнитивный, моторный и сенсорный процесс, требующий координированной работы как корковых и подкорковых мозговых структур, так и субкортикальных проводящих путей. Поэтому одной из центральных парадигм нейронаук в настоящее время является задача поиска новых функциональных и эффективных связей речевых центров. Функциональная связь — это временная корреляция активности структур (Leisman, 2016). Иными словами, если два мозговых образования работают синхронно, то они функционально связаны. Изучение таких связей не дает полного представления о работе речевого анализатора, поскольку в данной парадигме исследований не определены причинно-следственные отношения «источник — приемник сигнала».

Именно эти недостающие параметры характеризуют третий вид связи — эффективную — направленный поток информации между структурами (Leisman, 2016); (Sporns, 2011). Оба этих вида функциональных связей экспериментально реконструируются в нашей работе благодаря возможностям нового метода локализации.

Как известно, при восприятии речи звуковые сигналы поступают в первичную слуховую кору и подвергаются обработке в зоне Вернике. Для речепроизводства при нормальной «внешней» речи, требуется активация зоны Брока, где разрабатывается программа артикуляции, передаваемая затем в моторную кору (Kemmerer, 2015). Однако, как показали результаты, при мысленном проговаривания (повторении фонемы) активация в сенсорной зоне Вернике оказалась существенно больше, чем в моторной зоне Брока, кроме того, в этой моторной зоне ответ оказался даже больше при восприятии, чем при внутреннем проговаривании. При этом нельзя забывать, что в данном эксперименте воспринимались и проговаривались только отдельные фонемы и не было задачи составлять из них слова или предложения. Такой парадокс может означать, что для внутреннего проговаривания важнее мысленное сенсорное представление звукового образа, тогда как в отсутствии артикуляторных движений и необходимости организовывать целостное предложение активность моторной речевой зоны Брока практически не важна. Это подтверждается также недавней работой с регистрацией электрических сигналов непосредственно с поверхности коры мозга человека (Flinker, Korzeniewska et al., 2015). Оказалось, что во время произнесения слов любой длины центр Брока не посылает заметных сигналов. Он работает, когда человек

обдумывает слово, а как только испытуемый начинает произносить его вслух или про себя, становится менее активным. То есть эта зона не столько подает сигналы мышцам, участвующим в произнесении звуков, а связывает работу нескольких соседних участков коры, в результате чего слова собираются во фразы и человек подбирает для своей речи нужные звуки в нужной последовательности.

Участие бледного шара в речи, обнаруженное в нашем исследовании, также не противоречит известным данным. Так, нарушение активности бледного шара (Gl. Palidus) ведет к нарушению речи у больных паркинсонизмом. Данная структура обеспечивает моторные и статические характеристики действий, в том числе и речевых, которые имеют моторную составляющую (Manes, Tjaden et al., 2018). Это исследование демонстрирует, что существуют различные функциональные связи между базальными ганглиями и корой, которые и дифференцируют пациентов с болезнью Паркинсона с нарушением речи и без нее.

Активация левого гиппокампа в процессе проговаривания про себя также может быть связана с процессами воспоминания (Frings, Wagner et al., 2008). Нарушение работы гиппокампа приводит к нарушениям процессов консолидации памяти из кратковременной в долговременную.

Как в задаче «Проговаривания», так и в задаче «Восприятие» сильно проявила себя зона Супромаргинальной извилины — зона, ассоциированная с процессами фонологического анализа — как левая, так и правая (Hartwigsen, Baumgaertner et al., 2010). При этом супромаргинальная извилина при сравнении компонентов ВП в большей степени активировалась при визуальном анализе фонетических единиц. Также сравнивая наше исследование с исследованием об участии супромаргинальной извилины в визуальном распознавании слов (Stoeckel, Gough et al., 2009), где показано ассоциирование данной зоны с чтением стимулов и переводом зрительного образа в слуховой, можно говорить о хорошей взаимной верификации полученных результатов.

Усовершенствование моделей связанности позволило бы потенциально улучшить существующие системы ВСИ, так как, используя преднастройку последовательности активации различных функциональных структур, можно было бы лучше предсказывать и реконструировать процессы внутренней речи. В задаче представления движения пальцами использование метода классификации на основе процессов мозговой связанности позволило построить

более эффективную модель ВСИ (Daly, Nasuto et al., 2012). Можно предположить, что артикуляционные компоненты речи, которые также имеют моторную составляющую, могут быть лучше декодированы, используя данные, позволяющие построить траекторию локализации искомых процессов. Полученные результаты могут объяснять траекторию активации различных отделов мозга в процессе проговаривания. Таким образом, проведенное исследование позволяет получить важные данные для разработки более совершенной системы ВСИ. Однако, вероятнее всего, пути активации при внутренней речи сложнее и динамично меняются в зависимости от появляющихся задач.

Помимо этого, полученные данные хорошо соотносятся с мета-анализом связанности мозговых структур (Ardila, 2015), у нас также выражена активность зон ВА22 и ВА40, и ВА7. Также в нашей работе была представлена активность зоны ВА17 зрительной коры, данный факт можно интерпретировать, как удержание зрительного образа стимула. Помимо этого в данной работе в группе зон, которые отвечают за координацию речепроизводства также были выделены зоны ВА7 и ВА32, что опять же соотносится с нашими результатами.

Заключение

Показано, что процессы речепроизводства, в частности проговаривание во внутреннем плане (мысленное повторение) характеризуются системой и последовательностью активации определенных зон мозга и зависят от способа его инициализации. Процессы проговаривания, выраженные в ВП, различаются в зависимости от модальности исходной формы воспроизводимого образа — при зрительном восприятии в большей степени участвует супромаргинальная извилина.

Показано, что и при восприятии, и внутреннем проговаривании задействована зона Вернике тогда как зона Брока при работе с отдельными фонемами не задействована. Также показано, что кроме классических речевых зон существуют зоны, которые дополнительно обеспечивают внутреннюю речь, в том числе гиппокамп и бледный шар (Gl. Palidus). Форма ВП при восприятии во многом схожа с его формой при проговаривании, особенно в области Вернике. Активация на зрительный вход почти всегда значительно выше, чем при аудиальном. Полученные данные позволяют также допустить, что ранние компоненты связаны с восприятием, а поздние — с запоминанием или непосредственно с процессом проговаривания.

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

Acknowledgments. This work was financially supported by the Russian Science Foundation, project no. 20-18-00067.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бахтин О.М., Кривко Е.М., Кирой В.Н. Электромиографические компоненты, ассоциированные с внутренней речью. Журнал медико-биологических исследований, 2020, Т. 8, № 2, 111–120. doi:10.37482/2542-1298-Z001

Выготский Л.С. Мышление и речь: психологические исследования / Л.С. Выготский; [предисловие Л.Ф. Обуховой]. М.: «Национальное образование», 2019. (Антология мировой педагогики).

Плоткин В.Я. Фонологические кванты. Новосибирск: ВО «Наука» Сибирская издательская фирма, 1993.

Соколов А.Н. Внутренняя речь и мышление. М.: Рус. яз., 1984.

Alderson-Day, B., Weis, S., McCarthy-Jones, S., Moseley, P., Smailes, D., Fernyhough, C. (2016). The brain's conversation with itself: neural substrates of dialogic inner speech. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11 (1), 110–120.

Ardila, Alfredo & Bernal, Byron & Rosselli, Monica. (2015). How Localized are Language Brain Areas? A Review of Brodmann Areas Involvement in Oral Language. *Archives of clinical neuropsychology : the official journal of the National Academy of Neuropsychologists*. 31. doi: 10.1093/arclin/acv081.

Daly, I., Nasuto, S.J., Warwick, K. (2012). Brain computer interface control via functional connectivity dynamics. *Pattern Recognition*, 45 (6), 2123–2136.

Flinker, A., Korzeniewska, A., Shestyuk, A.Y., Franaszczuk, P.J., Dronkers, N.F., Knight, R.T., Crone, N.E. (2015). Redefining the role of Broca's area in speech. *PNAS* 3, 112 (9), 2871–2875. doi: 10.1073/pnas.1414491112

Frings, L., Wagner, K., Halsband, U., Schwarzwald, R., Zentner, J., Schulze-Bonhage, A. (2008). Lateralization of hippocampal activation differs between left and right temporal lobe epilepsy patients and correlates with postsurgical verbal learning decrement. *Epilepsy Res*, 78 (2–3), 161–70.

Hartwigsen, G., Baumgaertner, A., Price, C.J., Koehnke, M., Ulmer, S, Siebner, H.R. (2010). Phonological decisions require both the left and right supramarginalgyri. *PNAS*, 107 (38), 16494–9.

Kemmerer, A.D. (2015). Cognitive Neuroscience of Language. *Psychology Press*, 25–80. ISBN 9781848726215

Leisman, G, Moustafa, AA, Shafir, T. (2016). Thinking, Walking, Talking: Integratory Motor and Cognitive Brain Function. *Front Public Health*, 25, 4–94. doi: 10.3389/fpubh.2016.00094

Roberts, J.D., Greenlee, D.M., Corcos, A.S., Kurani, A. (2018). Altered resting-state functional connectivity of the putamen and internal globus pallidus is related to speech impairment in Parkinson's disease. *Brain and Behavior*, 8 (3).

- Sporns, O. (2011). The human connectome: A complex network. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* doi:10.1111/j.1749-6632.2010.05888.x
- Stoeckel, C., Gough, P.M., Watkins, K.E., Devlin, J.T. (2009). Supramarginalgyrus involvement in visual word recognition. *Cortex*, 45 (9), 1091–6.

REFERENCES

- Alderson-Day, B., Weis, S., McCarthy-Jones, S., Moseley, P., Smailes, D., Fernyhough, C. (2016). The brain's conversation with itself: neural substrates of dialogic inner speech. *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 11 (1), 110–120.
- Ardila, A. & Bernal, Byron & Rosselli, M. (2015). How Localized are Language Brain Areas? A Review of Brodmann Areas Involvement in Oral Language. *Archives of clinical neuropsychology: the official journal of the National Academy of Neuropsychologists*, 31(1): 112–22. doi: 10.1093/arclin/acv081.
- Bahtin O.M., Krivko E.M., Kiroy V.N. Elektromiograficheskie komponentyi, assotsirovannyye s vnutrenney rechyu. *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy*, 2020, T. 8, № 2, 111–120. doi:10.37482/2542-1298-Z001 (In Russ.)
- Daly, L., Nasuto, S.J., Warwick, K. (2012). Brain computer interface control via functional connectivity dynamics. *Pattern Recognition*, 45 (6), 2123–2136.
- Flinker, A., Korzeniewska, A., Shestiyuk, A.Y., Franaszczuk, P.J., Dronkers, N.F., Knight, R.T., Crone, N.E. (2015). Redefining the role of Broca's area in speech. *PNAS*, 3, 2015. 112 (9), 2871–2875. doi: 10.1073/pnas.1414491112
- Frings, L., Wagner, K., Halsband, U., Schwarzwald, R., Zentner, J., Schulze-Bonhage, A. (2008). Lateralization of hippocampal activation differs between left and right temporal lobe epilepsy patients and correlates with postsurgical verbal learning decrement. *Epilepsy Res*, 78 (2–3), 161–70.
- Hartwigsen, G., Baumgaertner, A., Price, C.J., Koehnke, M., Ulmer, S, Siebner, H.R. (2010). Phonological decisions require both the left and right supramarginalgyri. *PNAS*, 107 (38), 16494–9.
- Kemmerer, A.D. (2015). Cognitive Neuroscience of Language. *Psychology Press*, 25–80. ISBN 9781848726215
- Leisman, G., Moustafa, A.A., Shafir, T. (2016). Thinking, Walking, Talking: Integratory Motor and Cognitive Brain Function. *Front Public Health*. 25, 4–94. doi: 10.3389/fpubh.2016.00094
- Plotkin, V. Y., Fonologicheskie kvantyi. Novosibirsk: VO "Nauka" Sibirskaya izdatelskaya firma, 1993. (In Russ.).
- Roberts, J.D., Greenlee, D.M., Corcos, A.S., Kurani, A. (2018). Altered resting-state functional connectivity of the putamen and internal globus pallidus is related to speech impairment in Parkinson's disease. *Brain and Behavior*, 8 (3).
- Sokolov, A.N. (1984). Inner speech and thinking. Moskva: Russkii yazyk. (In Russ.).
- Sporns, O. (2011). The human connectome: A complex network. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05888.x
- Stoeckel, C., Gough, P.M., Watkins, K.E., Devlin, J.T. (2009). Supramarginalgyrus involvement in visual word recognition. *Cortex*, 45 (9), 1091–6.

Vartanov, A.V., Shevchenko, A.O.

Psychophysiological mechanisms of internal pronunciation of phonemes
Moscow University Psychology Bulletin. 2022. No. 1

Vygotsky, L.S. (2019). Thinking and Speaking: Psychological Research. Moskva: Natsional'noe obrazovanie. (In Russ.).

Поступила в редакцию 28.11.2021

Принята к публикации 01.02.2022

Отредактирована 19.02.2022

Received 28.11.2021

Accepted 01.02.2022

Revised 19.02.2022

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ:

Вартанов Александр Валентинович — кандидат психологических наук, доцент, старший научный сотрудник факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

a_v_vartanov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8844-9643>

Шевченко Андрей Олегович — аспирант факультета психологии МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

andreyshevchenkomsu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9118-2617>

ABOUT AUTHORS

Alexander V. Vartanov — PhD in Psychology, Associate Professor, Senior Researcher Faculty of Psychology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

a_v_vartanov@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-8844-9643>

Andrey O. Shevchenko — post-graduate student of the Department of Psychology, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

andreyshevchenkomsu@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-9118-2617>