

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.Ломоносова

На правах рукописи

Шевченко Андрей Олегович

**Мозговые механизмы внутреннего
проговаривания фонем и слогов в норме**

5.3.2. Психофизиология (психологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата психологических наук

Москва — 2024

Работа выполнена на кафедре психофизиологии
факультета психологии Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

- Научный руководитель: **Вартанов Александр Валентинович** –
кандидат психологических наук
- Официальные оппоненты: **Ефимова Виктория Леонидовна** – доктор
психологических наук, профессор, профессор
кафедры возрастной психологии и педагогики
ФГБОУ «Российский государственный
педагогический университет им. А.И. Герцена»
- Александров Игорь Олегович** – доктор
психологических наук, ведущий научный
сотрудник лаборатории психофизиологии
имени В.Б. Швыркова ФГБУН Институт
психологии Российской академии наук
- Кроткова Ольга Андреевна** – кандидат
психологических наук, старший научный
сотрудник отделения клинической
реабилитации нейрохирургических больных
ФГАУ «Национальный медицинский
исследовательский центр нейрохирургии имени
академика Н.Н. Бурденко»

Защита состоится *15 марта 2024 г.* в *15.00* на заседании диссертационного
совета МГУ.053.1 Московского государственного университета имени
М.В.Ломоносова по адресу: 125009, г. Москва, улица Моховая, дом 11, строение
9, аудитория 102.
e-mail: us@psy.msu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки
МГУ имени М.В.Ломоносова (г. Москва, Ломоносовский проспект, д.27); на
портале <https://dissovet.msu.ru/dissertation/053.1/2829> и на сайте Научно-
консультативного совета РАО и РПО (<http://psy-science-council.ru/dissertations/>).

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

И.о. ученого секретаря
диссертационного совета МГУ.053.1,
доктор психологических наук



А.М. Черноризов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В отечественной и зарубежной психологии актуальным является изучение процессов внутреннего проговаривания (П.Я. Гальперин, К. Парнин, А.Н. Соколов и др.), как одного из фундаментальных механизмов переработки и усвоения информации с помощью повторения во внутреннем плане внешних элементов. Так, П.Я. Гальперин выделяет процессы внутреннего проговаривания и определяет внутреннее проговаривание как скрытую внешнюю речь или внешнюю речь про себя¹. Внутреннее проговаривание – «форма скрытой речевой активности, близкая к внешней речи»². Существующие определения сопоставляют внешнюю речь и внутреннее проговаривание, в результате чего можно выделить ряд свойств внутреннего проговаривания для изучения. В отличие от внешнего проговаривания, в процессе внутреннего проговаривания происходит подавление конечной (полной) артикуляции. Многие исследователи отмечают наличие скрытых, неполных двигательных речевых актов и во внутреннем проговаривании. А.Н. Соколов в своих исследованиях внутреннего проговаривания и внутренней речи обращал внимание на речедвигательный компонент – зачаточную артикуляцию³. В исследованиях Г.М. Оппенгейма и Г.С. Делла⁴ говорится о влиянии артикуляции на фонологический уровень внутреннего проговаривания. Известно, что артикуляция, кроме конвенциональных речевых зон, включает и подкорковые структуры, и мозжечок (Индефрей, Левелт⁵, Аккерман с соавт.⁶, Вильдгрубер с соавт.⁷ и др.), однако в настоящее время нет исследования, в котором бы проводилось

¹ Гальперин П.Я. Введение в психологию / П.Я. Гальперин // М.: Университет. – 2000.

² Азимов Э.Г. Новый словарь методических терминов и понятий (теория и практика обучения языкам) / Э.Г. Азимов, А.Н. Шукин // М.: Издательство ИКАР. – 2009. – С.41-44

³ Соколов А.Н. Внутренняя речь и мышление / А.Н. Соколов // М.: Рус. яз. – 1984.

⁴ Oppenheim G.M. Motor movement matters: The flexible abstractness of inner speech / G.M. Oppenheim, G.S. Dell // *Memory & Cognition*. – 2010. – Vol.38. – №8. – P.1147-1160.

⁵ Indefrey P. The spatial and temporal signatures of word production components / P. Indefrey, W.J. Levelt // *Cognition*. – 2004. – Vol.92. – №1-2. – P.101-144.

⁶ Ackermann H. The contribution of the cerebellum to speech production and speech perception: Clinical and functional imaging data / H. Ackermann, K. Mathiak, A. Riecker // *The Cerebellum*. – 2007. – Vol.6 – № 3 – P.202-213

⁷ Wildgruber D. Differential Contributions of Motor Cortex, Basal Ganglia, and Cerebellum to Speech Motor Control: Effects of Syllable Repetition Rate Evaluated by fMRI / D. Wildgruber, H. Ackermann, W. Grodd // *NeuroImage*. – 2001. – Vol.13. – №1. – P.101-109.

сравнение внешнего и внутреннего проговаривания минимальных речевых единиц с оценкой вовлеченности мозговых структур. Кроме этого, можно выделить ряд уникальных свойств внутреннего проговаривания: мотивация к внутреннему проговариванию, внутренняя репрезентация проговариваемой фонемы или слога (внутренний план), степень артикуляции – все эти свойства должны иметь свои мозговые механизмы. Все эти этапы релевантны и для любой другой речевой деятельности: механизм обеспечения ощущений для речевой функции «должен быть внутримозговым и иметь своей основой единую интегрированную систему связей проекционных и ассоциативных зон коры с речевыми»⁸.

И фонематическое восприятие, и внутреннее проговаривание становятся процессами, которые определяются тесной связью с удержанием речевого образа. Сравнивая процессы восприятия и внутреннего проговаривания, мы можем полагать, что при внутреннем проговаривании происходит произвольное формирование внутреннего образа проговариваемой единицы, что является одним из свойств внутреннего проговаривания. В процессе восприятия также создается образ речевой единицы, однако воссоздание образа будет произвольным. Таким образом, для оценки произвольности, как свойства внутреннего проговаривания, релевантно сравнить намеренное воссоздание образа проговариваемой единицы при внутреннем проговаривании с произвольным внутренним отражением в процессе восприятия этих единиц. Кроме этого, произвольность должна быть детерминирована мотивом на произнесение.

В процессе формирования образа произносимой единицы возникает такое свойство внутреннего проговаривания, как полимодальность – способность совмещать в образе несколько модусов познания. Это свойство должно характеризоваться активностью различных зон мозга, связанных с разными модальностями, например, при внутреннем проговаривании возможно

⁸ Иваницкий А.М. Психофизиология сознания // Основы психофизиологии: Учебник / А.М. Иваницкий; Под общ. ред. Ю.И. Александрова // М.: ИНФРА-М. – 1997. – Гл. 11. – С.209-228.

включение зон, связанных со зрительным восприятием, в связи с ассоциациями и навыками письма и чтения у взрослых респондентов. Известно, что порождение речевого высказывания включает несколько этапов: этап идеи или мотива речевого высказывания, замысел, лексический подбор, грамматическое и синтаксическое оформление фразы, артикуляция необходимых слов⁹. В настоящее время не существует моделей, которые описывают процесс внутреннего проговаривания. В соответствии с этим, полимодальность, как свойство внутреннего проговаривания, и этапы кодирования ставят перед исследователями два важных вопроса: вопрос о влиянии задающего стимула на процесс программирования и реализации внутреннего проговаривания, а также вопрос о возможных временных интервалах связанных с событием потенциалов, на которых инициализация – команда, задающая фонему или слог – проявляется сильнее. Выявление мозговых механизмов внутреннего проговаривания на основе электрической активности мозга является важной проблемой для усовершенствования построений интерфейсов «мозг – компьютер». Таким образом, изучение и сравнение электрофизиологических показателей внутреннего проговаривания на разных его этапах является не только актуальной научной, но и практико-обусловленной задачей.

В настоящем психофизиологическом исследовании предполагается изучить внутреннее проговаривание на психологическом уровне с учетом данных о закономерностях восприятия речи и ее артикуляторных механизмах, исследовать мозговые механизмы процесса внутреннего проговаривания по данным электроэнцефалографии и функциональной магнитно-резонансной томографии. В работе для оценки мозговых механизмов внутреннего

⁹ Горелов И.Н. Основы психолингвистики. Учебное пособие. Третье, переработанное и дополненное издание / И.Н. Горелов, К.Ф. Седов // М.: Лабиринт. – 2001.

Levelt W.J.M. A theory of lexical access in speech production / W.J.M. Levelt, A. Roelofs, A.S. Meyer // Behavioral and Brain Sciences. – 1999. – Vol.22. – №1. – P.1-38.

Dell G.S. A spreading-activation theory of retrieval in sentence production / G.S. Dell // Psychological Review. – 1986. – Vol.93. – №3. – P.283–321.

Oppenheim G.M. Inner speech slips exhibit lexical bias, but not the phonemic similarity effect / G.M. Oppenheim, G.S. Dell // Cognition. – 2008. – Vol.106. – №1. – P.528–537.

Oppenheim G.M. Motor movement matters: The flexible abstractness of inner speech / G.M. Oppenheim, G.S. Dell // Memory & Cognition. – 2010. – Vol.38. – №8. – P.1147-1160.

проговаривания используются задачи, исключая синтаксическое и лексическое кодирование. Актуальным становится изучение внутреннего проговаривания фонем и слогов как минимальных речевых единиц. Применение ряда психофизиологических методов позволяет комплексно оценить процессы внутреннего проговаривания. Метод электроэнцефалографии обладает свойствами хорошего временного разрешения, что важно для дифференциации различных этапов внешнего и внутреннего проговаривания. Метод функциональной магнитно-резонансной томографии позволяет оценить вовлеченность различных зон коры больших полушарий и подкорковых структур в процессы внутреннего проговаривания и восприятия с хорошим пространственным разрешением. С помощью электромиографии возможно зафиксировать наличие и свойства внутреннего проговаривания, а также временные интервалы его реализации.

Парадигма построения интерфейсов «мозг – компьютер» способствует усовершенствованию методов выделения паттернов, дифференцирующих по мозговой активности проговариваемые про себя речевые единицы. Известно, что восстановление внутреннего проговаривания на основе данных биоэлектрической активности мозга является возможным¹⁰, поскольку в процессе внутреннего проговаривания генерируется активность артикуляторов, а также головного мозга.

¹⁰ Yamaguchi H. Decoding Silent Speech in Japanese from Single Trial EEGs: Preliminary Results / H. Yamaguchi, T. Yamazaki, K. Yamamoto, S. Ueno, A. Yamaguchi, T. Ito, S. Hirose, K. Kamiyo, H. Takayanagi, T. Yamanoi, S. Fukuzumi // *Journal of Computer Science & Systems Biology*. – 2015. – Vol.8. – №5. – P.285-291.

Sereshkeh A.R. Online EEG Classification of Covert Speech for Brain-Computer Interfacing / A.R. Sereshkeh, R. Trott, A. Bricout, T. Chau // *International Journal of Neural Systems*. – 2017. – Vol.27. – №8. – P.2292-2300.

Porbadnigk A. EEG-based Speech Recognition - Impact of Temporal Effects / A. Porbadnigk, M. Wester, J. Callies, T. Schultz // *Proceedings of the International Conference on Bio-inspired Systems and Signal Processing*. – 2009. – Vol.1. – P.376-381.

Brigham K. Imagined Speech Classification with EEG Signals for Silent Communication: A Preliminary Investigation into Synthetic Telepathy / K. Brigham, B.V.K.V. Kumar. // *Proceedings of the 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*. – 2010. – P.1-4.

Da Salla C.S. Single-trial classification of vowel speech imagery using common spatial patterns / C.S. Da Salla, H. Kambara, M. Sato, Y. Koike // *Neural Networks*. – 2009. – Vol.22. – №9. – P.1334-1339.

Matsumoto M. Classification of silent speech using support vector machine and relevance vector machine / M. Matsumoto, J. Hori // *Applied Soft Computing*. – 2014. – Vol.20. – P.95-102.

Степень научной разработанности проблемы. В исследованиях не раз изучалась внутренняя речь как психологический феномен (Б.Г. Ананьев, Т.В. Ахутина, П.П. Блонский, Л.С. Выготский, П.Я. Гальперин, А.А. Леонтьев, А.Н. Соколов, R. Dodge, C. Parnin). Существуют различные подходы к пониманию внутреннего проговаривания. Так, исследованиями в рамках выделения внутреннего проговаривания, как одной из форм внутренней речи, занимались такие ученые, как П.Я. Гальперин, А.Н. Соколов, С. Parnin и др. В большинстве моделей речепроизводства не выделяют отдельно внутреннюю речь и внутреннее проговаривание (И.Н. Горелов, К.Ф. Седов, G.S. Dell, W.J.M. Levelt, G.M. Oppenheim и др.). В области психофизиологии вопросом локализации речевых функций занимались многие ученые (Н.А. Бернштейн, П. Брока, К. Бродман, К. Вернике, А.Р. Лурия, Z. Breznitz, M. Fujii, A.J. Zhong и др.), однако отдельных нейровизуализационных исследований процессов внутреннего проговаривания намного меньше (B. Alderson-Day, G.S. Dell, A. Miyake, G.M. Oppenheim, M. Scott и др.), при этом они чаще всего изучают семантическое кодирование, что не является отражением процессов только внутреннего проговаривания, так как вовлекаются зоны, ассоциированные с семантическими процессами. При этом существует множество подходов, которые рассматривают вовлеченность различных «неречевых» зон и структур в речевую деятельность во внешней речи, в том числе на уровне фонематических единиц (H. Ackermann, A.A. Bohsali, A.A. Ford, P. Indefrey, W.J.M. Levelt, A. Starowicz-Filip, D. Wildgruber и др.).

Большим достижением в области реконструкции внутреннего проговаривания стала разработка инвазивных методов классификации фонем и слогов (А.Т. Петросян, M. Angrick, S. Martin, N. Mesgarani, B.N. Pasley и др.). В области реконструкции также используются неинвазивные методы, например, метод электроэнцефалограммы. Существует много исследований по выделению и классификации проговариваемых фонем и слогов с разным процентом точности распознавания (точность распознавания – 65% Ямагучи с соавт.; точность распознавания – 69–75% Серешке и соавт.; точность распознавания –

44% Бригама и Кумара; точность распознавания – 68–78% Да Салла и соавт., др.). Данное диссертационное исследование детализирует информацию о локализации внутреннего проговаривания минимальных языковых единиц и соединяет эти данные с электроэнцефалографическими исследованиями в единую модель.

Цель: выявление мозговых механизмов внутреннего проговаривания фонем и слогов в норме.

Объект исследования: внутреннее проговаривание фонем и слогов в норме.

Предмет исследования: мозговые механизмы внутреннего проговаривания фонем и слогов в норме.

Общая гипотеза. Реализация и мониторинг процесса внутреннего проговаривания фонем и слогов обеспечивается специальной мозговой системой, которая отличается от системы реализации и мониторинга при внешнем проговаривании или восприятии фонем и слогов.

Частные гипотезы:

1. Процессы внутреннего проговаривания, в отличие от внешнего проговаривания, в большей степени связаны с формированием зрительного образа проговариваемой единицы.

2. Подкорковые структуры более активны во внешнем проговаривании, чем во внутреннем проговаривании, в связи с большей включенностью артикуляционных процессов.

3. Условия инициализации внутреннего проговаривания визуально, аудиально или посредством условной ассоциации влияют на ранние характеристики связанного с событием потенциала, тогда как его поздние компоненты сходны вне зависимости от условий инициализации.

4. По амплитудно-временным характеристикам связанного с событием потенциала можно классифицировать проговаривание отдельной фонемы или слога русского языка с помощью алгоритмов машинного обучения.

Задачи исследования:

1. Провести теоретический анализ существующих исследований внутреннего проговаривания.
2. Выявить артикуляционную активность, как индикатор внутреннего проговаривания, с помощью электромиографического исследования.
3. Выявить ассоциированные с внутренним проговариванием временные интервалы при разных типах условий, задающих проговаривание, с помощью электроэнцефалографического исследования.
4. Классифицировать отдельные фонематические единицы внутреннего проговаривания с помощью метода машинного обучения по данным электроэнцефалографии.
5. Выявить функциональные характеристики процессов внутреннего и внешнего проговаривания, а также восприятия фонем и слогов с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии.
6. На основе теоретического анализа и проведенных эмпирических исследований создать модель внутреннего проговаривания фонем и слогов.

Методологическая основа исследования. Исследование опирается на следующие теоретические представления: принцип психофизиологического исследования «Человек-Нейрон-Модель» Е.Н. Соколова, моторную концепцию внутренней речи А.Н. Соколова, иерархическую модель построения речи В. Левелта.

Методы и методики исследования:

1. Метод электроэнцефалографии с регистрацией на 19-канальном электроэнцефалографе «Нейро-КМ» (компания «Статокин», Россия).
2. Метод электромиографии на базе системы «Нейро-КМ» по двум отведениям.
3. Метод функциональной магнитно-резонансной томографии с помощью томографа Siemens Magnetom Skyra 3 TMRI Machine (Siemens Medical Systems, Эрланген, Германия). Исследование проводилось на базе ФГБУ «Национальный медико-хирургический Центр им. Н.И. Пирогова».

Характеристика выборки. Всего в исследовании приняло участие 62 человека. В электроэнцефалографическом исследовании участниками стали 25 человек: 15 участников женского пола и 10 участников мужского пола в возрасте от 18 до 28 лет; средний возраст – 20,8 лет. В апробационном исследовании методом электромиографии приняли участие 7 человек: 4 участника женского пола и 3 участника мужского пола в возрасте от 18 до 23 лет; средний возраст – 19,6 лет. Исследование методом функциональной магнитно-резонансной томографии прошли 30 участников: 9 мужского пола и 21 женского пола в возрасте от 20 до 30 лет; средний возраст – 24,0 года. Все участники исследования не имели в анамнезе черепно-мозговых травм и психоневрологических заболеваний. Все участники были праворукими. Все участники подписали информированное согласие после ознакомления с регламентом исследования. Исследование проходило с соблюдением этических принципов Российского Психологического Общества.

Научная новизна результатов исследования. В диссертационном исследовании разработана интегративная модель внутреннего проговаривания фонем и слогов, которая является развитием иерархической модели В. Левелта и теории моторного кодирования внутренней речи А.Н. Соколова. Представленная модель включает этап ориентировочной артикуляционной предобработки и детализирует иерархическое формирование единого фонематического образа.

Получены новые электроэнцефалографические данные, показывающие психофизиологические различия в процессах внутреннего проговаривания фонем и слогов в зависимости от типа инициализации. Выявлено, что наиболее дифференцирующими являются ранние и средние компоненты связанного с событием потенциала. Так, обнаружены отличия в реакции на аудиальный стимул по сравнению с визуальным, при этом реакция на «условный стимул» (подаваемый аудиально) похожа на реакцию на визуальный. Схожесть «условного стимула» и визуального объясняется тем, что респонденту приходится самостоятельно восстанавливать образ звука в процессе концептуальной обработки, так как при аудиальной инициализации многие характеристики звукового образа (например, ритмика, частотные

характеристики) уже имеются, в отличие от визуальной инициализации, где необходимо их воссоздать самостоятельно.

С помощью метода функциональной магнитно-резонансной томографии впервые получены данные, показывающие различия в процессах внешнего и внутреннего проговаривания фонем и слогов в ряде структур головного мозга. Для воссоздания полного образа проговариваемой единицы (аудиальных, кинестетических, визуальных характеристик) в процессе внутреннего проговаривания требуется участие верхней теменной доли, угловой извилины, нижней затылочной извилины, веретенообразной извилины и мозжечка. Только при внешней речи активна зона передней поясной извилины, что позволяет выделить эту структуру как значимую зону в сети обратной слуховой связи.

На основе данных электроэнцефалографии с помощью методов машинного обучения созданы классификаторы фонем и слогов русского языка при различных условиях инициализации. Впервые проведено сравнение качества классификаторов фонем русского языка на основе метода опорных векторов и сверточных нейронных сетей, что является значимым основанием для разработки и усовершенствования интерфейсов «мозг – компьютер».

Теоретическая значимость результатов исследования. В работе представлена интегративная модель внутреннего проговаривания фонем и слогов, расширяющая модель В. Левелта и моторную теорию внутренней речи А.Н. Соколова. Представленная модель включает такие блоки, как мотивационный блок, блоки ориентировочной артикуляционной предобработки, концептуальной детекции/концептуальной обработки, фонематического кодирования и артикуляции. В работе представлены данные о различиях условий инициализации, выраженные в ранних и средних компонентах связанных с событием потенциалов.

Кроме того, полученные в ходе исследования данные помогают расширить существующие знания в области изучения речи об участии различных зон мозга в процессе внутреннего проговаривания. В работе описана роль мозжечка как вторичного речевого посредника. Данные, полученные в исследовании,

показали, что передняя поясная кора наиболее активна во внешней речи в сравнении с внутренним проговариванием. Это может говорить о том, что передняя поясная кора является значимой областью в сети слухового контроля за произносимой речью. Отмечено участие верхней теменной доли, угловой извилины, нижней затылочной извилины и веретенообразной извилины в процессах внутреннего проговаривания. Активность этих зон связана с тем, что во внутреннем плане происходит естественная полимодальная связь визуальных и аудиальных отделов, которые совместно формируют единый образ.

Практическая значимость результатов исследования. Результаты диссертационного исследования могут использоваться при диагностике различных функциональных нарушений. Полученные данные о роли зрительных и конвенциональных речевых зон, а также подкорковых структур (включая мозжечок) при внутреннем проговаривании минимальных речевых единиц подтверждают положение об опоре на различные анализаторы при коррекции речевых расстройств. Результаты исследования показывают, что использование полимодального подхода в коррекции может улучшать коррекционный процесс.

Кроме этого, информация о локализации процессов внутреннего проговаривания может использоваться в практике построения интерфейсов «мозг – компьютер». Одним из направлений при работе над нейроинтерфейсами является пространственная фильтрация данных электроэнцефалограммы с целью улучшения распознавания проговариваемых про себя речевых единиц. Активно развиваются технологии классификации элементов внутреннего проговаривания, и одним из подходов является использование методов сетевой локализации процессов проговаривания¹¹. При этом использование интерфейсов возможно не только в дешифровке и декодировании речи, но и при столкновении с речевыми нарушениями. Также нейроинтерфейсы распознавания внутреннего

¹¹ Santos E.M. Comparison of LORETA and CSP for Brain-Computer Interface Applications / E.M. Santos, R. San-Martin, F.J. Fraga // 2021 18th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD). – 2021. – P.817-822.

Frikha T. Source Localization of EEG Brainwaves Activities via Mother Wavelets Families for SWT Decomposition / T. Frikha, N. Abdennour, F. Chaabane, O. Ghorbel, R. Ayedi, O.R. Shahin, O. Cheikhrouhou // Journal of healthcare engineering. – 2021. – Vol.2021. – P.1-11.

проговаривания могут быть применены в индустрии развлечений, например, в устройствах виртуальной реальности¹². Созданный классификатор на основе полученных данных электроэнцефалографии может быть использован для распознавания речевых стимулов и является актуальной технологией в области неинвазивного речевого ввода.

Надежность и достоверность полученных результатов обеспечивается применением методов регистрации, обработки и анализа данных, адекватных предмету и задачам исследования; использованием при обработке и анализе данных современного программного обеспечения и статистических методов, отвечающих специфике эмпирических данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Условия инициализации, которые определяют содержание проговариваемого элемента, отражаются в ранних характеристиках связанного с событием потенциала, что связано с механизмами артикуляционной предобработки в процессе начала проговаривания.
2. Мозжечок больше активизируется при реализации процессов внутреннего проговаривания в сравнении с внешним проговариванием, при этом произнесение во внутреннем плане речевых элементов разного уровня – фонем или слогов – активизирует различные области мозжечка.
3. Процессы внутреннего проговаривания, в том числе при слуховой инициализации, более связаны с активацией зрительных зон мозга в сравнении с внешним проговариванием фонем и слогов.

Апробация результатов исследования. Результаты обсуждались на заседаниях кафедры психофизиологии факультета психологии МГУ имени М.В.Ломоносова. Основные положения и результаты исследования докладывались на: XXVI и XXVII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2019» и «Ломоносов-2020» (Севастополь, 2019; Москва, 2020); Annual International Conference on Brain-

¹² Гавриленко Ю.Ю. Обзор методов распознавания внутреннего проговаривания на основе данных электроэнцефалограммы / Ю.Ю. Гавриленко, Д.Ф. Саада, А.О. Шевченко, Е.А. Ильюшин // Современные информационные технологии и ИТ-образование. – 2019. – №15 (1) – С.1-8

Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence (Натал, Бразилия, 2020; Гвадалахара, Мексика, 2022); I Национальном Конгрессе по когнитивным исследованиям, искусственному интеллекту и нейроинформатике (Москва, 2020); XII Международной научной конференции «Интеллектуальные системы и компьютерные науки» (Москва, 2021).

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка сокращений, списка литературы и 4 приложений. Текст диссертации изложен на 159 страницах и включает в себя 41 рисунок, 11 таблиц. Список литературы включает 157 публикаций, 104 – на английском языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обосновывается актуальность исследования; формулируются цель, объект, предмет, гипотезы и задачи исследования, научная новизна работы, теоретическая и практическая значимость; излагаются положения, выносимые на защиту.

В **первой главе «Теоретический анализ процессов внутреннего проговаривания»** анализируется понятие внутреннего проговаривания как скрытой внешней речи и обращается особое внимание на связи между артикуляционным актом и внутренним проговариванием.

В **параграфе 1.1.** «Внутреннее проговаривание в структуре речевой деятельности» излагаются и анализируются подходы к пониманию внутренней речи и внутреннего проговаривания, особенности процесса субвокализации и внутреннего проговаривания. **Параграф 1.2.** «Модели речеобразования» описывает существующие модели порождения речи, в частности, модель В. Левелта, включающую внешнюю и внутреннюю систему контроля, и модель Г.С. Делла, имеющую сетевое строение. В **параграфе 1.3.** «Фонематическая система речи и артикуляция» описывается фонематическая структура речи, содержащая звуки, фонемы и слоги, и артикуляция с учетом строения речевого аппарата. В **параграфе 1.4.** «Анализ мозговых механизмов речевой

деятельности» анализируются подходы к выделению мозговых механизмов речевой деятельности на базе значимых исследований в области физиологии и нейропсихологии. В разделе 1.4.1. «Конвенциональные речевые зоны» описываются конвенциональные речевые зоны, такие как зоны Вернике и Брока, а также области прецентральной извилины: премоторной коры и дополнительной моторной коры (SMA) (BA6), правой первичной моторной коры (BA4). Кроме того, раздел описывает роль «зеркальных нейронов» и теорию упреждающего разряда. В разделе 1.4.2. «Таламус и мозжечок как вторичные посредники речевой деятельности» описываются теории участия мозжечка, скорлупы и таламуса в процессах речеобразования. В разделе 1.4.3. «Модели мозгового взаимодействия при восприятии и порождении речи» описаны существующие теории мозгового взаимодействия в процессе речеобразования, представленные в моделях двойного потока (модель А.Д. Фридеричи и С.М. Гиерхан¹³, модель М. Фудзии с соавт.¹⁴), а также функциональная модель основных речевых систем Дж. Биндер с соавт.¹⁵ В **параграфе 1.5.** «Подходы к построению классификаторов внутреннего проговаривания» представлены современные подходы к реконструкции (построению классификаторов) внутреннего проговаривания с помощью инвазивных и неинвазивных методов. В **параграфе 1.6.** «Постановка исследовательской проблемы, гипотезы и схема исследования» представлено обоснование гипотез, схемы эксперимента и выбора стимулов.

В **Главе 2.** «**Результаты экспериментальных исследований**» описаны серии экспериментов по исследованию внутреннего проговаривания с помощью ЭМГ, ЭЭГ и фМРТ методов.

В **параграфе 2.1.** «Методика исследования внутреннего проговаривания методом электромиографии» описывается исследование по выявлению

¹³ Friederici, A.D. The language network / A.D. Friederici, S.M. Gierhan // Current Opinion in Neurobiology. – 2013. – Vol.23. – №2. – P.250–254. – DOI 10.1016/j.conb.2012.10.002.

¹⁴ Fujii, M. Neural Basis of Language: An Overview of An Evolving Model / M. Fujii, S. Maesawa, S. Ishiai, K. Iwami, M. Futamura, K. Saito // Neurologia Medico-Chirurgica. – 2016. – Vol.56. - №7. – P. 379–386. – DOI 10.2176/nmc.ra.2016-0014.

¹⁵ Binder, J.R. The Wernicke area: Modern evidence and a reinterpretation / J.R. Binder // Neurology. – 2015. – Vol.85. – №24. – P.2170–2175. – DOI 10.1212/WNL.0000000000002219.

артикуляционной активности внутреннего проговаривания с помощью метода ЭМГ. Наличие артикуляционной активности подтверждает наличие внутреннего проговаривания. В эксперименте приняли участие 7 испытуемых в возрасте от 18 до 23 лет. В качестве программы для записи и просмотра ЭМГ, а также для предварительной очистки связанных с событием потенциалов, использовалась Brain Sys (Brain Win). Длительность исследования 15-20 минут, исследование состоит из двух серий: первая серия – внешнее проговаривание; вторая серия – внутреннее проговаривание. Стимулы предъявлялись в случайном порядке, 70 повторений на каждый стимул. Предъявление стимула длилось 700 мс. Фиксационный крест и звуковой сигнал, который являлся стартовой командой для внутреннего или внешнего проговаривания, появлялся на экране после паузы в 500 мс. Предъявлялись следующие стимулы: 7 фонем (А – [а], Б – [б], Ф – [ф], Г – [г], М – [м], Р – [р], У – [у]). В **параграфе 2.2.** «Результаты исследования внутреннего проговаривания методом электромиографии» выявлено, что внешнее проговаривание фонем связано с резким сдвигом электрической активности от 200 мс. до 700 мс. от начала команды на проговаривание, при этом в отличие от внутреннего проговаривания представлена обратная форма ЭМГ ССП на двух электродах. Анализ компонентов артикуляционного ответа при восприятии фонем (в сравнении с проговариванием) показывает сдвиг на более ранние компоненты относительно процесса внутреннего проговаривания и повторяет волну от 150 мс.

Параграф 2.3. «Методика исследования внутреннего проговаривания методом электроэнцефалографии» описывает методику исследований инициализации на визуальный и аудиальный стимул, а также методику исследования инициализации на условный стимул. В исследовании инициализации на визуальную и аудиальную подачу стимула приняли участие 25 испытуемых в возрасте от 18 до 28 лет. В качестве программы для записи и просмотра ЭЭГ, а также для предварительной очистки вызванных потенциалов использовалась Brain Sys (Brain Win). Испытуемым предъявлялось 7 фонем и 10 слогов русского языка (А – [а], Б – [б], Ф – [ф], Г – [г], М – [м], Р – [р], У – [у], БА – [ба], ФА – [фа], ГА – [га], МА – [ма], РА – [ра], БУ – [бу], РУ – [ру], МУ – [му], ФУ – [фу], ГУ – [гу]). Стимулы предъявлялись в случайном порядке, 70

повторений на каждый стимул. Общее время исследования от 80 до 90 минут. Каждая серия длилась по 12 минут, между каждой серией испытуемому давалась возможность отдохнуть, выпить воды. Исследование включает три серии: (1) серия контроля (демонстрировались фонемы и слоги в случайном порядке зрительно и аудиально, задачи повторить не было); (2) инициализация аудиальным стимулом; (3) инициализация визуальным стимулом. Аудиальные стимулы были записаны на диктофон и предъявлялись испытуемым через наушники, визуальный стимул демонстрировался на экране. В исследовании внутреннего проговаривания на инициализацию условным стимулом приняли участие 12 испытуемых в возрасте от 17 до 28 лет (средний возраст 19 лет). Особенностью исследования инициализации на условный стимул стало то, что в качестве условного стимула выбраны японские слова, выступающие квазисловами, так как испытуемые не владели японским языком. Предварительно испытуемый заучивал ассоциации японского слова с определенной фонемой. Всего в этом исследовании проводилась одна серия длительностью 12 минут. Каждая серия в исследовании внутреннего проговаривания методом электроэнцефалографии проводилась согласно стандартной схеме исследования: подача стимула (700 мс) – пауза (500 мс) – фиксационный крест и звуковой сигнал (250 мс) – внутреннее проговаривание (1500 мс) – отдых (1600 мс). Анализ полученных данных проводился с помощью языка статистического программирования R (версия 3.6.3). В рамках анализа использовались функциональный дисперсионный анализ и попарные сравнения с контролем ошибки I рода.

В параграфе 2.4. «Результаты исследования внутреннего проговаривания методом электроэнцефалографии» представлены результаты исследования внутреннего проговаривания на визуальную и аудиальную инициализацию, а также на инициализацию условным стимулом. **Раздел 2.4.1.** «Результаты исследования внутреннего проговаривания методом электроэнцефалографии на визуальную и аудиальную инициализацию» показывает результаты сравнения серий внутреннего проговаривания при аудиальной и при визуальной подаче стимула. При сравнении проговаривания на всех экспериментальных этапах с

контрольной частью функциональный дисперсионный анализ показал значимые различия во всех четырех случаях (визуальное предъявление, аудиальное предъявление, фонемы, слоги), которые необъяснимы индивидуальной вариабельностью внутри испытуемых ($p < 0.001$). Проверка эффекта взаимодействия переменной канала и переменной этапа показала значимые различия на уровне 0.05 только для аудиальных фонем и слогов ($p = 0.02$ и $p = 0.005$, соответственно). При визуальной подаче фонем и слогов взаимодействие является статистически незначимым ($p = 0.28$ и $p = 0.22$, соответственно). Это означает, что пространственное распределение ССП по каналам изменяется относительно контрольного этапа только в случае аудиальной подачи фонем/слов; при визуальной подаче это распределение остается относительно константным. Анализ локализации различий показал, что наиболее значимые различия обнаруживаются (на уровне 0.05) на каналах С3 и F3 (для аудиальной подачи различия также видны на канале F7). Они характеризуются позитивной волной в районе 120-170 мс и негативной волной (на С3 и F3) в районе 200-280 мс.

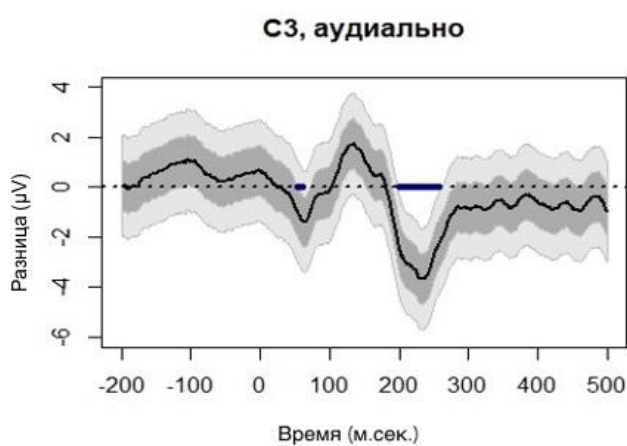


Рис. 1. Различия между связанными с событием потенциалами (проговаривание слогов минус аудиальное восприятие); регионы значимых различий помечены темно-синим цветом; серый – 95% доверительный интервал, темно-серый – 99% доверительный интервал; ССП построен на 25 участниках

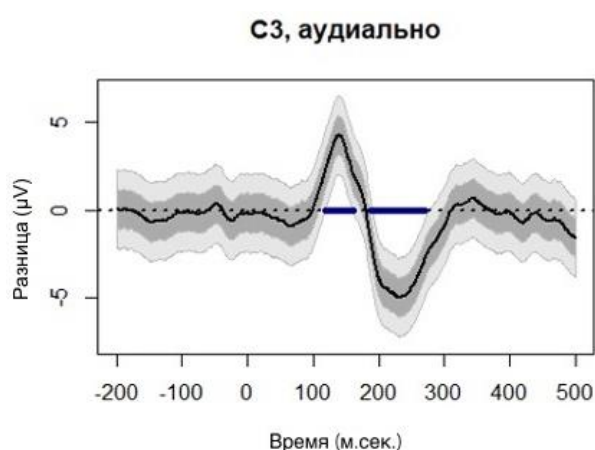


Рис. 2. Различия между связанными с событием потенциалами (проговаривание фонем минус аудиальное восприятие); регионы значимых различий помечены темно-синим цветом; серый – 95% доверительный интервал, темно-серый – 99% доверительный интервал; ССП построен на 25 участниках

Также проведено исследование методом локализации (RU Patent № 2021116955/1 автор Вартанов А.В.). Данный метод позволил локализовать ССП в заданных исследователем источниках. Наиболее выраженная активность выявлена билатерально в зонах Вернике и супрамаргинальной извилины. В **разделе 2.4.2.** «Результаты исследования внутреннего проговаривания на инициализацию условным стимулом методом электроэнцефалографии» выявлено, что в случае сравнения всех условий проговариваний с проговариванием на условный стимул в виде японских слов значимые различия нашлись во всех четырех случаях ($p < 0.001$ для всего аудиального; $p = 0.01$ для визуальных фонем; $p = 0.009$ для визуальных слогов), но значимое взаимодействие вариабельности каналов с этапом нашлось только для аудиальных слогов ($p < 0.001$). Актуальность исследования инициализации на условный стимул заключается в том, что в этом случае испытуемому необходимо самостоятельно сформировать образ проговариваемого звука.

Раздел 2.4.3. «Построение классификатора на основе метода опорных векторов (SVM-RE)» описывает построение классификатора с помощью машинного обучения (SVM-RE) на основе полученных ССП, описанных выше. Для распознавания внутреннего проговаривания использован алгоритм извлечения и нормализации признаков из сигнала электроэнцефалограммы, полученного во время внутреннего проговаривания. Общая статистика реконструируемости (точность классификации) составила 61-65%. В **разделе 2.4.4.** «Построение классификатора на основе сверточных нейронных сетей» описано построение классификатора методом сверточных нейронных сетей на основе полученных ССП. Выделено 4 подзадачи, каждой из которых соответствует своя сверточная сеть: (1) бинарная классификация для каждого испытуемого для всех возможных неповторяющихся пар фонем; (2) многоклассовая классификация с числом классов, равным числу фонем для каждого испытуемого; (3) бинарная классификация для всех неповторяющихся пар фонем для объединения данных всех испытуемых; (4) многоклассовая классификация с числом классов, равным числу фонем для объединения данных всех испытуемых. Средняя точность

попарной классификации при решении первой задачи – 73.98%; при решении второй задачи – 61.98%; в третьей задаче общая средняя точность – 76.44%. В четвертой задаче многоклассовой классификации на данных всех испытуемых точность классификации на лучшем из 3 запусков составляет 80.18%.

Параграф 2.5. «Методика исследования внутреннего проговаривания методом функциональной магнитно-резонансной томографии» посвящен исследованию внутреннего проговаривания методом фМРТ, в исследовании приняли участие 9 мужчин и 21 женщина в возрасте от 20 до 30 лет. фМРТ выполнялась на Siemens Magnetom Skyra 3 TMRI Machine. Обработку изображений и анализ данных выполняли с использованием пакета SPM12. Для каждого участника получены T1-взвешенные структурные изображения (TR = 2200 мс; TE = 2,48 мс; FA = 6°; матрица = 256 × 256; FoV = 230 мм; 176 срезов, толщина среза = 1 мм). Для получения функциональных T2*-взвешенных (41 объём) изображений использовалась импульсная последовательность градиент-эхо EPI (TR = 3000 мс; TE = 30 мс; FA = 90°; матрица 128 × 128; FoV = 260 мм). Серии включали прослушивание стимульного материала (восприятие) и серию с последующим повторением (внутреннее проговаривание и внешнее проговаривание), также записана фоновая серия, во время которой испытуемый спокойно лежал в томографе. Стимулы: 7 фонем и 10 слогов. Продолжительность каждой серии составляла 2 минуты (всего эксперимент занимал около 8 минут). Предъявление производилось через специальные наушники, в течение всего эксперимента глаза испытуемых были закрыты. Вследствие того, что дизайн фМРТ-исследования был не блочным.

В параграфе 2.6. «Результаты исследования внутреннего проговаривания методом функциональной магнитно-резонансной томографии» сравнивались серии внешнего и внутреннего проговаривания и восприятия. Исходя из этого, в данном параграфе представлены не все структуры, связанные с процессами речи, а лишь те, в которых есть различия. Сравнение происходило с помощью

групповых сравнений в SPM12¹⁶. Выделены области активации при внутреннем проговаривании, по сравнению с внешним (рис.3). Построены изображения с выделенными цветом зонами (по T-значениям) активации внутреннего проговаривания в сравнении с восприятием (рис. 4); градиент T-значения отражен справа от изображения.

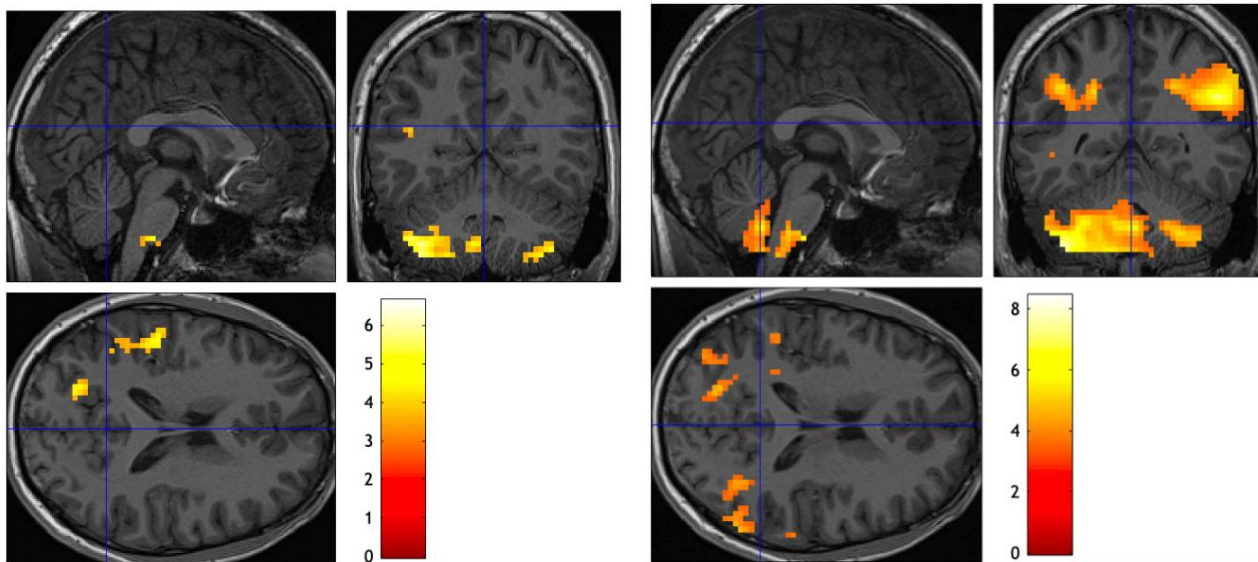


Рис. 3. фМРТ изображение значимой разности активности зон головного мозга в серии сравнения внутреннего проговаривания слогов с внешним проговариванием (градиентом показаны зоны, связанные с внутренним проговариванием слогов). Изображение построено по усредненным данным 30 участников

Рис. 4. фМРТ изображение значимой разности активности зон головного мозга в серии сравнения внутреннего проговаривания фонем с восприятием (градиентом показаны зоны, связанные с внутренним проговариванием фонем). Изображение построено по усредненным данным 30 участников

Параграф 2.7. «Построение фМРТ-связности с помощью анализа независимых компонент» описывает результаты, полученные методом анализа независимых компонент. Сети выделялись отдельно для каждого из этапов исследования (каждой задачи). Предобработанные данные были загружены в Group ICA T версии 4.0¹⁷. Для анализа использовался следующий параметр – количество отобранных независимых компонент – 20. Для корректирования модели использовался алгоритм MDL (FWHM) с параметрами [5:5:5] в Group

¹⁶ SPM12 [Электронный ресурс]: STATISTICAL PARAMETRIC MAPPING, 2020. URL: <https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm12/> (Дата обращения: 12.12.2022).

¹⁷ GIFT (Group ICA Of fMRI Toolbox) [Электронный ресурс]: TRENDS. Translational Research in Neuroimaging & Data Science, 2017. URL: <https://trendscenter.org/software/gift/> (Дата обращения: 12.09.2022).

ICAT. Медианное количество найденных компонентов равно 21. Алгоритм, используемый для анализа, – Fast ICA, преимуществом которого является устойчивость при нехватке фМРТ-данных, что позволяет его использовать в парадигме rt-фМРТ¹⁸. Полученные сети (рис. 5 и 6) были загружены в SPM12¹⁶, и проведено сравнение речевых сетей при разных задачах с поправкой FWE (на уровне 0.05). Сети отбирались на основе пространственной корреляции с маской речевой сети по атласу (Stanford's Functional Imaging Neuropsychiatric Disorders)¹⁹. Полученные сети сравнивались с фМРТ-данными, полученными в параграфе 2.6, для выявления общих тенденций и нивелирования неблочного дизайна исследования.

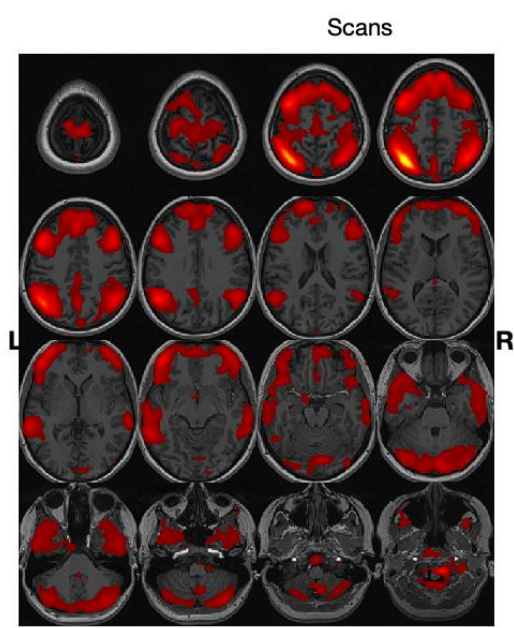


Рис. 5. Сеть, выделенная по фМРТ-данным, полученным при выполнении задачи внутреннего проговаривания фонем. Градиентом показаны зоны, связанные с внутренним проговариванием фонем.

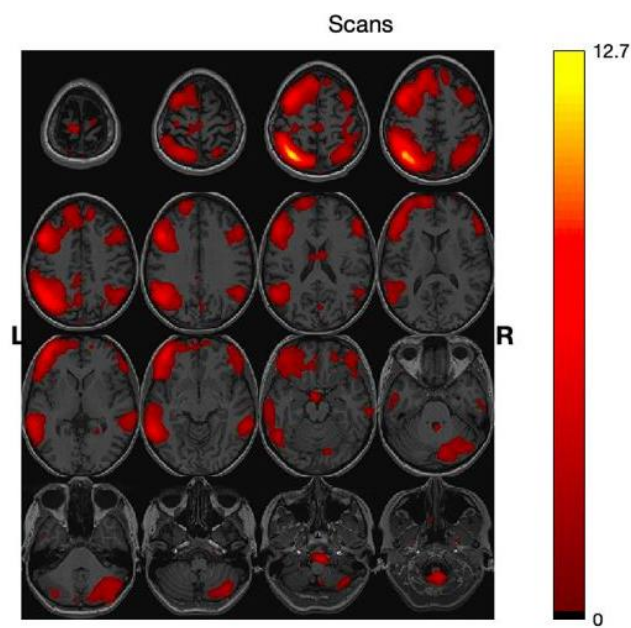


Рис. 6. Сеть, выделенная по фМРТ-данным, полученным при выполнении задачи внутреннего проговаривания слогов. Градиентом показаны зоны, связанные с внутренним проговариванием слогов.

¹⁸ Soldati N. ICA analysis of fMRI with real-time constraints: an evaluation of fast detection performance as function of algorithms, parameters and a priori conditions / N. Soldati, V.D. Calhoun, L. Bruzzone, J. Jovicich // *Frontiers in Human Neuroscience*. – 2013. – Vol.7. – №19. – P.1-11.

¹⁹ Legacy FINDLAB Data and Functional ROIs [Электронный ресурс]: Stanford. Greicius Lab, 2011. URL: <https://greiciuslab.stanford.edu/resourcesv> (Дата обращения: 12.08.2022)

В **Главе 3. «Обсуждение результатов»** проанализированы итоги проведенных исследований. В **параграфе 3.1. «Выделение связанного с событием потенциала внутреннего проговаривания и условия различных инициализаций»** говорится о выделении ССП внутреннего проговаривания, а также об условиях инициализации. Для проверки наличия внешне проявляемого в подавленном мышечном компоненте процесса подготовки артикуляционного паттерна проведено исследование с ЭМГ и выявлено наличие соответствующего моторного артикуляционного ответа по миограмме в диапазоне 200 мс для проговаривания и 150 мс для процесса восприятия. Можно допустить, что несмотря на то, что процессы восприятия и внутреннего проговаривания формально являются сигналами разной природы, эти моторные компоненты присутствуют при обоих процессах.

Сравнение различных типов инициализации проводилось с целью оценки временных характеристик. Выявлено, что наиболее дифференцирующим компонентом являются ранние и средние компоненты связанных с событием потенциалов, что соответствует ориентировочной реакции, описанной А.Н. Соколовым²⁰. На основании наших данных и данных А.Н. Соколова²¹ можно получить вывод о моторной составляющей внутреннего проговаривания и об автоматическом моторном ответе при фонематическом восприятии. Данный ответ отличается в зависимости от типа инициализации. Так, обнаружены отличия в реакции на аудиальный стимул по сравнению с визуальным, при этом реакция на «условный стимул» (подаваемый аудиально) больше похожа на визуальный. Схожесть «условного стимула» и визуального объясняется тем, что и при инициализации обоими стимулами происходит схожая аудиальная репрезентация, так как отсутствует аудиальный образец. В связи с этим образ проговариваемой единицы воссоздается (самостоятельно восстанавливается респондентом) в процессе концептуальной обработки. При аудиальной инициализации процесс обработки происходит иначе, так как многие

²⁰ Соколов А.Н. Внутренняя речь и мышление / А.Н. Соколов // М.: Просвещение. – 1967.

²¹ Соколов А.Н. Внутренняя речь и мышление / А.Н. Соколов // М.: Рус. яз. – 1984.

характеристики звукового образа (например, ритмика, частотные характеристики) уже имеются, в отличие от визуальной инициализации и инициализации условным стимулом. Однако стоит отметить, что процессы концептуальной обработки, влияющие на артикуляционный ответ, не мешают алгоритмам машинного обучения и нейронным сетям выявлять и дифференцировать паттерны. Из этого следует, что на ориентировочную реакцию влияет тип инициации, однако в самой ориентировочной реакции содержится информация о первичной детекции и артикуляционной предобработке, что и соответствует исследованию И. Берента с соавт.²².

В параграфе 3.2. «Сравнение внутреннего проговаривания фонем и слогов с их восприятием» для выделения характеристик внутреннего проговаривания проведено сравнение внутреннего проговаривания фонем и слогов с их восприятием. При внутреннем проговаривании фонем наблюдалась билатеральная активация супрамаргинальной извилины (BA40), которая активна в сериях сравнения внутреннего проговаривания с восприятием и с внешним проговариванием. Активацию зоны связывают с преартикуляторным фонологическим поиском²³, а также с процессами обратной связи²⁴, что может говорить о роли этой зоны в преартикуляции. При внутреннем проговаривании фонем и слогов отмечалась также билатеральная активация мозжечка. Также при сравнении результатов фМРТ-исследования в условиях внутреннего проговаривания фонем и слогов с их восприятием наблюдалась вовлеченность лобных отделов, а именно билатерально дорсолатеральной префронтальной коры (BA9), левых фронтальных глазных полей (BA8), которые участвуют в самоконтроле.

В параграфе 3.3. «Сравнение внешнего проговаривания и внутреннего проговаривания» освещаются вопросы сравнения внешнего проговаривания

²² Berent I. Phonetic categorization relies on motor simulation, but combinatorial phonological computations are abstract / I. Berent, P.J. Fried, R.M. Theodore, D. Manning, A. Pascual-Leone // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol.13. P.1-8.

²³ Binder J.R. The Wernicke area: Modern evidence and a reinterpretation / J.R. Binder // *Neurology*. – 2015. – Vol.85. – №24. –P.2170–2175.

²⁴ Shuster L. An fMRI investigation of covertly and overtly produced mono- and multisyllabic words / L. Shuster, S. Lemieux // *Brain and Language*. – 2005. – Vol.93. – №1. – P.20–31.

(озвучивания) и внутреннего проговаривания. В процессах внешнего проговаривания в сравнении с внутренним проговариванием активна зона левой передней поясной коры (BA24). Во внешней речи активация зоны передней поясной извилины (АСС) описывается как область подготовки и планирования, а также речевой «инициативы»²⁵, а также входит в сеть слуховой обратной связи²⁶. Мы предполагаем, что передняя поясная кора может являться основной в сети мониторинга при внешней речи, а в сети контроля при внутреннем проговаривании, вероятнее всего, основной зоной будет выступать другая область. Кроме того, при внутреннем проговаривании обнаружена активация зон верхней теменной доли (BA7) в обоих полушариях, билатерально угловой извилины (BA39), левой нижней затылочной извилины (Vis Assoc) (BA19) и левой веретенообразной извилины (BA37), которые являются третичными полями коры, а часть из них входит в зону ТРО (зона перекрытия височной, теменной и затылочной коры). Участие этих зон во внутреннем проговаривании может говорить о том, что во внутреннем плане происходит естественная системная связь по воссозданию единого образа проговариваемой единицы на этапе концептуальной обработки, а также может быть связано и с более сложными образами внутреннего плана. Отмечалась билатеральная активация структур мозжечка при внутреннем проговаривании, в отличие от внешнего проговаривания.

В параграфе 3.4. «Мозжечок в процессах внутреннего проговаривания» описана особая роль мозжечка в процессах внутреннего проговаривания и восприятия. Результаты нашего исследования показывают, что при сравнении внутреннего проговаривания слогов с их внешним проговариванием *большая* активация была в правом мозжечке, а при сравнении внешнего проговаривания слогов с их внутренним проговариванием *большая* активность была в левом мозжечке. Известно об участии левого мозжечка в речевых операциях, однако

²⁵ Ardila A. How Localized are Language Brain Areas? A Review of Brodmann Areas Involvement in Oral Language / A. Ardila, B. Bernal, M. Rosselli // Archives of Clinical Neuropsychology. – 2015a. – Vol.31. – №1. – P.112–122.

²⁶ Christoffels I.K. Neural correlates of verbal feedback processing: An fMRI study employing overt speech / I.K. Christoffels, E. Formisano, N.O. Schiller // Human Brain Mapping. – 2007. – Vol.28. – P.868-879.

наше исследование показывает, что в процессах внутреннего проговаривания участвуют билатеральные структуры мозжечка. Мозжечок участвует в процессах планирования артикуляции и фонирования²⁷, а также в процессах контроля²⁸. Судя по всему, мозжечок осуществляет не только сопутствующую составляющую планирования процессов внутреннего проговаривания и процессов поддержания фонематических операций, но также может осуществлять функцию эмулятора реализуемого фонетического образа, что позволяет организовать соответствующее возбуждение корковых речевых зон и обеспечивать ощущение звукового образа в отсутствии звука. Современные исследования²⁹ и полученные в нашем исследовании результаты говорят о мозжечке как о моторном посреднике и блоке обработки сенсорной обратной связи при внутреннем проговаривании. Предположительно, мозжечок и иные «вторичные речевые посредники» могут участвовать как в торможении внешней артикуляции на уровне фонематического кодирования, так и в планировании характеристик звука во внутреннем плане.

В параграфе 3.5. «Интегративная модель внутреннего проговаривания и восприятия фонем и слогов» представлена интегративная модель (рис.6), основанная на иерархической модели В. Левелта, теории моторного кодирования речи А.Н. Соколова и современных исследованиях³⁰. Также в

²⁷ Indefrey P. The spatial and temporal signatures of word production components / P. Indefrey, W.J. Levelt // *Cognition*. – 2004. – Vol.92. – №1-2. – P.101–144.

Ackermann H. The contribution of the cerebellum to speech production and speech perception: Clinical and functional imaging data / H. Ackermann, K. Mathiak, A. Riecker // *The Cerebellum*. – 2007. – Vol.6 – № 3 – P.202–213.

Correia J.M. Phonatory and articulatory representations of speech production in cortical and subcortical fMRI responses / J.M. Correia, C. Caballero-Gaudes, S. Guediche, M. Carreiras // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol.10. – №1. – P.1-14.

²⁸ Wildgruber D. Differential Contributions of Motor Cortex, Basal Ganglia, and Cerebellum to Speech Motor Control: Effects of Syllable Repetition Rate Evaluated by fMRI / D. Wildgruber, H. Ackermann, W. Grodd // *NeuroImage*. – 2001. – Vol.13. – №1. – P.101–109.

Ackermann H. The contribution of the cerebellum to speech production and speech perception: Clinical and functional imaging data / H. Ackermann, K. Mathiak, A. Riecker // *The Cerebellum*. – 2007. – Vol.6 – № 3 – P.202–213.

²⁹ Correia J.M. Phonatory and articulatory representations of speech production in cortical and subcortical fMRI responses / J.M. Correia, C. Caballero-Gaudes, S. Guediche, M. Carreiras // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol.10. – №1. – P.1-14.

³⁰ Berent I. Phonetic categorization relies on motor simulation, but combinatorial phonological computations are abstract / I. Berent, P.J. Fried, R.M. Theodore, D. Manning, A. Pascual-Leone // *Scientific Reports*. – 2023. – Vol.13. P.1-8.

Correia J.M. Phonatory and articulatory representations of speech production in cortical and subcortical fMRI responses / J.M. Correia, C. Caballero-Gaudes, S. Guediche, M. Carreiras // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol.10. – №1. – P.1-14.

модели отражена обратная афферентация (термин ввел П.К. Анохин) – «процесс коррекции поведения на основе получаемой мозгом информации извне о результатах протекающей деятельности»³¹.

Согласно модели, важным условием фонематического плана является **мотивационный компонент речи**, так как на данном уровне происходит оценка и планирование потенциального результата. **Первичная детекция** стимулов происходит на основе задействованного анализатора. Далее происходит выделение характеристик стимула, таких как форма подачи, скорость и т.д.

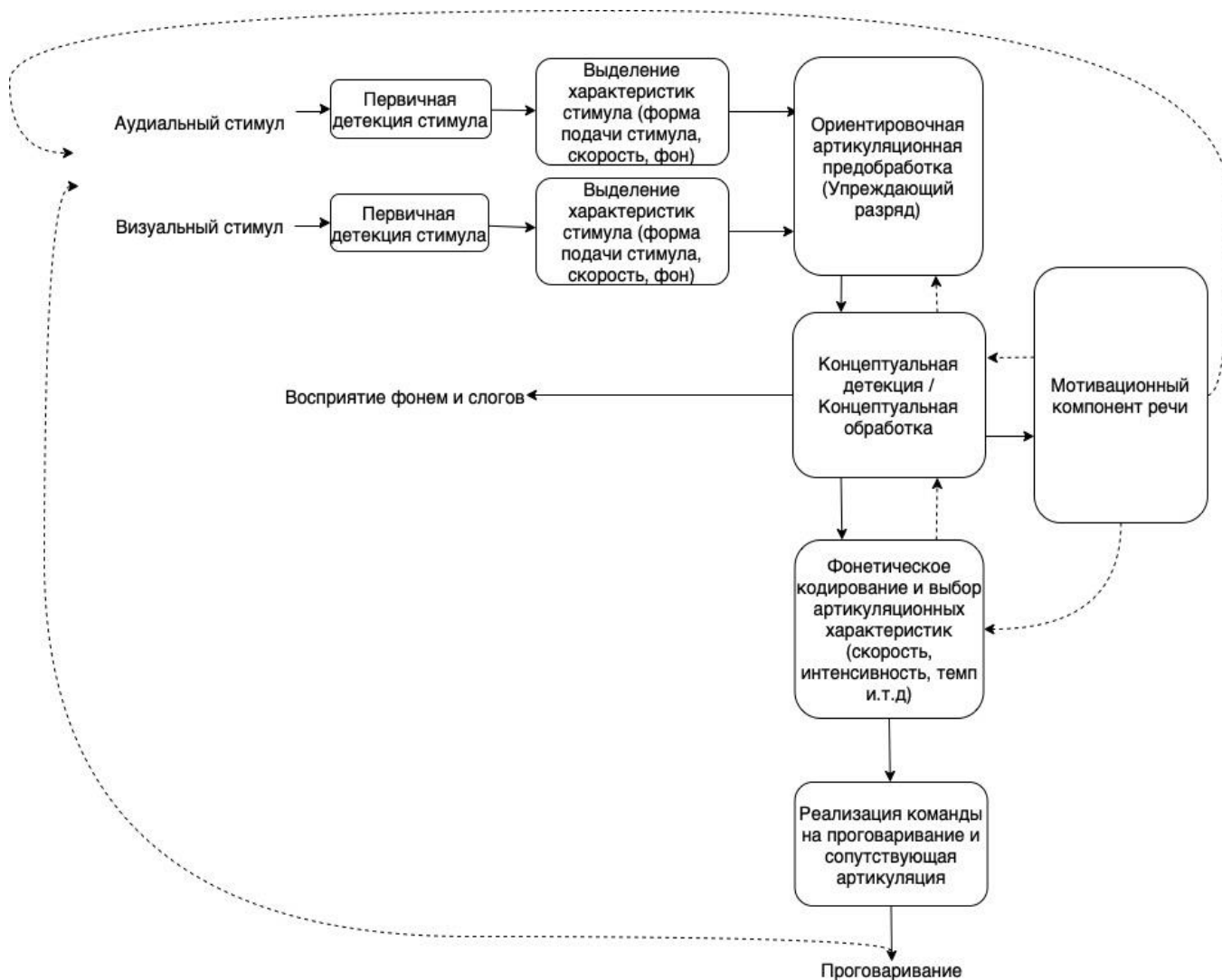


Рис. 6. Интегративная модель внутреннего проговаривания и восприятия фонем и слогов. Пунктирной линией обозначены процессы обратной афферентации.

³¹ Энциклопедический словарь по психологии и педагогике. 2013. [Электронный ресурс] // Сайт «Академик». URL: https://psychology_pedagogy.academic.ru/11384/обратная_афферентация

Этап артикуляционной предобработки осуществляет процесс распада фонемы на составляющие (субфонемные кванты) или команды к моторному действию (кинакемы) и запускает упреждающий разряд на определенные мозговые зоны. Во время *этапа концептуальной детекции/концептуальной обработки* из отдельных перцептивных признаков собирается единый образ языковой единицы. После сбора единого образа единицы происходит *этап фонетического кодирования*, на котором осуществляется построение программы для артикуляторных действий, связанных с будущим слуховым и моторным образом, который должен получиться в результате произношения; закладываются характеристики произношения фонем или слогов с учетом влияния мотивационного компонента и образа, сформированного на уровне концептуальной детекции. При реализации звукового образа и сопутствующей артикуляции полученный образ попадает в блок первичной детекции стимула с целью корректировки целостного образа. При мысленном проговаривании сигнал с уровня фонетического кодирования поступает обратно на блок концептуальной детекции, что обеспечивает процесс возникновения звукового образа фонемы или слога в отсутствии внешнего стимула.

В **параграфе 3.6.** «Построение классификатора как область практико-ориентированных исследований внутреннего проговаривания» описывается точность построенных классификаторов по данным электроэнцефалографии, полученным методом опорных векторов и методом сверточных нейронных сетей. Общая статистика реконструируемости – 61-65% при использовании метода опорных векторов. При использовании свёрточных нейронных сетей общая средняя точность составила 76.44% при бинарной классификации и 80.18% для многоклассовой классификации на данных всех испытуемых. В попарной классификации фонем лучше всего классифицировались фонемы М-Р, низкое значение показала пара У-М. В результате анализа обнаружилось, что высокое значение в реконструкции может объясниться тем, что у хорошо различаемых фонем заметны сильные различия в артикуляционных характеристиках, например, в резонировании.

В **Заключении** проводится обобщение результатов исследования, подводятся итоги проверки гипотез, формулируются выводы. Результаты показывают, что внутреннее проговаривание более сложный процесс, чем внешнее проговаривание. В теориях онтогенетического развития процессы перехода из внешней речи во внутреннюю речь сочетаются с внутренним проговариванием внешних речевых стимулов. Так, Л.С. Выготский³² описывал процесс свертывания эгоцентрической речи как её переход в немую, молчаливую речь. Внутреннее проговаривание является более поздним, оттого и более сложным процессом. Исходя из результатов нашего исследования, подтверждается общая гипотеза: внутреннее проговаривание фонем и слогов обеспечивается специальной системой мозговых механизмов, связанных с мониторингом и реализацией речевого акта, которая отличается от системы реализации и мониторинга при внешнем проговаривании или восприятии фонем и слогов.

Выводы

1. Условия подачи стимула, определяющие содержание речевого элемента внутреннего проговаривания, влияют на ранние характеристики кодирования процесса речепроизводства, связаны с ориентировочной артикуляционной предобработкой и отражаются в ранних компонентах связанного с событием потенциала. Разные типы инициализации не влияют на возможность реконструкции с помощью машинного обучения проговариваемых про себя фонем и слогов, что может говорить о схожести поздних компонентов.

2. Различия между внутренним проговариванием и восприятием могут быть связаны с мотивом, преартикуляцией, системами обратной связи и реализацией образа во внутреннем плане, отражаются эти отличия в активации следующих областей: лобных зон – дорсолатеральной префронтальной коры, фронтальных глазных полей, первичной соматосенсорной коры и мозжечка.

³² Выготский Л.С. Собрание сочинений в 6 т.: Т. 2: Проблемы общей психологии / под ред. В.В. Давыдова // М.: Педагогика. – 1982. – С.322-324.

3. По данным функциональной магнитно-резонансной томографии, зоны верхней теменной долики, угловой извилины, нижней затылочной извилины и веретенообразной извилины участвуют в реализации процесса внутреннего проговаривания фонем и слогов в сравнении с внешним проговариванием. Участие этих зон во внутреннем проговаривании говорит о репрезентации образа как полимодального во внутреннем плане.

4. Обнаруживается большая вовлеченность билатеральных структур мозжечка в реализации внутреннего проговаривания фонем и слогов и в серии сравнения с восприятием, и в серии сравнения с внешней речью. Проговаривание речевых единиц различного уровня задействует разные участки мозжечка, что указывает на роль мозжечка в процессах кодирования внутреннего проговаривания.

5. По результатам функционального магнитно-резонансного томографического исследования выявлено, что область передней поясной коры активируется только во внешнем проговаривании в сравнении с внутренним проговариванием, что говорит о её роли в сети слуховой обратной связи и о большей роли во внешнем проговаривании.

6. Наиболее эффективным инструментом для неинвазивной классификации проговаривания фонем являются сверточные нейронные сети: общая средняя точность составила 76,44% при бинарной классификации. Высокую точность в реконструкции (при бинарной классификации) можно объяснить тем, что у хорошо различаемых фонем наблюдаются сильные различия в артикуляционных характеристиках.

7. Разработана интегративная модель восприятия и внутреннего проговаривания фонем и слогов на основе модели В. Левелта и моторной концепции А.Н. Соколова. В отличие от них, предложенная модель описывает процесс речепроизводства на уровне минимальных языковых единиц – фонем и слогов – в процессе внутреннего проговаривания, а также включает важный блок артикуляционной предобработки, которая происходит произвольно и при восприятии, и при намеренном проговаривании. При дальнейшем построении

программы проговаривания артикуляционная предобработка оказывает влияние на процесс фонологического кодирования.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Основное содержание диссертации отражено в 10 научных публикациях (общий объем – 8,46 п.л.; авторский вклад – 4,28 п.л.); из них 8 – в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ.

Публикации в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в Web of Science, Scopus, RSCI, а также в изданиях из перечня рекомендованных Минобрнауки РФ, утвержденных Учёным советом МГУ для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности 5.3.2. Психофизиология (психологические науки) (общий объем – 6,98 п.л.; авторский вклад – 3,87 п.л.):

1. Шевченко, А.О. Анализ психофизиологических механизмов и подходов в коррекции звукопроизношения / А.Д. Морковина, А.О. Шевченко, В.В. Строганова, А.В. Вартанов // Национальный психологический журнал. – 2023. – № 1. – С.77-87. – DOI 10.11621/npj.2023.0107. (1,31 п.л./0,46 п.л.) **RSCI; ИФРИНЦ – 1,477.**
2. Шевченко, А.О. Вызванный артикуляторный ответ при внутреннем и внешнем проговаривании / А.О. Шевченко, А.В. Вартанов // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики, Серия «Познание». – 2023. – №1. – С.108-111. – DOI 10.37882/2500-3682.2023.01.20. (0,3 п.л./0,2 п.л.) **ИФРИНЦ – 0,073.**
3. Шевченко, А.О. Сравнение механизмов фонематического восприятия и внутреннего проговаривания фонем и слогов. ЭЭГ и фМРТ исследование / А.О. Шевченко, А.В. Вартанов // Российский психологический журнал. – 2022. – №19(4). – С.186–210. – DOI 10.21702/rpj.2022.4.13. (1,31 п.л./0,97 п.л.) **Scopus SJR – 0,135.**
4. Шевченко, А.О. Психофизиологические механизмы внутреннего проговаривания фонем / А.В. Вартанов, А.О. Шевченко // Вестник Московского университета. Серия 14: Психология. – 2022. – №1. – С.201-220. – DOI 10.11621/vsp.2022.01.09. (1,18 п.л./0,95 п.л.) **RSCI; ИФРИНЦ – 1,099.**

5. Shevchenko, A. Recognition of Mentally Pronounced Russian Phonemes Using Convolutional Neural Networks and Electroencephalography Data / L. Seleznyev, A. Chupakhin, V. Kostenko, A. Shevchenko, A. Vartanov // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2023. – vol. 32. – №2. – P.73-85. – DOI 10.3103/S1060992X23020066. (1,19 п.л./0,4 п.л.) **Scopus SJR - 0,222.**
6. Shevchenko, A. Inner speech and external speech: phonemes, syllables and words. fMRI study / A. Shevchenko, A. Suyuncheva, A. Vartanov, O. Bronov // *Procedia Computer Science*. – 2022. – Vol. 213(1) – P.136-143. – DOI 10.1016/j.procs.2022.11.048. (0,5 п.л./0,4 п.л.) **Scopus SJR – 0,507.**
7. Schevchenko, A.O. Reconstruction of words, syllables and phonemes of internal speech by EEG activity / A. Suyuncheva, D. Saada, Y. Gavrilenko, A.O. Shevchenko, A.V. Vartanov, E. Ilyushin // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2021. – Vol. 1358. – P.319-328. – DOI 10.1007/978-3-030-71637-0_37. (0,56 п.л./ 0,21 п.л.) **Scopus SJR – 0,215.**
8. Shevchenko, A. The electroencephalogram-based classification of internally pronounced phonemes / Y. Gavrilenko, D. Saada, E. Ilyushin, A. Vartanov, A. Shevchenko // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. – 2020. – Vol. 1310. – P. 97-105. – DOI 10.1007/978-3-030-65596-9_13. (0,63 п.л./0,28 п.л.) **Scopus SJR – 0,215.**

Научные публикации в других изданиях:

9. Шевченко, А.О. Обзор методов распознавания внутреннего проговаривания на основе данных электроэнцефалограммы / Ю.Ю. Гавриленко, Д.Ф. Саада, А.О. Шевченко, Е.А. Ильюшин // *Современные информационные технологии и ИТ-образование*. – 2019. – Т.15. – №1. – С.1-8. – DOI 10.25559/SITITO.15.201901.164-171 (0,63 п.л./0,1 п.л.) **ИФ РИНЦ – 0,525.**
10. Шевченко, А.О. Механизмы внутреннего проговаривания и восприятия при разных типах внешней инициации / А.В. Варганов, А.Р. Суюнчева, А.О. Шевченко // *Интеллектуальные системы. Теория и приложения*. – 2021. – Т.25. – №4. – С.302-306. (0,29 п.л./0,21 п.л.) **ИФ РИНЦ – 0,21.**