

## КОГНИТИВНЫЕ И СОЦИОГУМАНИТАРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

УДК 159.95

### ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СВЯЗНОСТЬ ОБЛАСТЕЙ СЛУХОВОЙ КОРЫ В ПРОЦЕССАХ ОБРАБОТКИ РЕЧИ И ЯЗЫКА

© 2023 г. И. Г. Маланчук<sup>1,\*</sup>, В. А. Орлов<sup>1</sup>, С. И. Карташов<sup>1</sup>, Д. Г. Малахов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*E-mail: cora1@inbox.ru

Поступила в редакцию 18.10.2023 г.

После доработки 25.10.2023 г.

Принята к публикации 25.10.2023 г.

Представлены результаты фМРТ-исследования, направленного на установление функциональной связности областей головного мозга человека, вовлеченных в обработку чистой речевой информации и устных вербальных высказываний. Описаны данные в отношении особенностей связности первичной слуховой коры.

DOI: 10.56304/S2782375X23030075

#### ВВЕДЕНИЕ

В современной нейрокогнитивистике языка и речи продолжают исследования различных областей мозга, обеспечивающих восприятие речевой информации. На модели приматов была предложена иерархическая структура слуховых зон [1]; в исследованиях головного мозга человека (ГМЧ) устанавливаются соотношения слуховых зон человека и приматов [2–7]; уточнена анатомическая структура извилины Хешля (HG) [8, 9] и т.д. В последние 20 лет усилия нейрофизиологов направлены на установление распределенной функциональной организации слуховой коры, иерархий в ее подсистемах [10–17], при том что сегодня выделяется около 30 анатомических субобластей слуховой коры [9, 18].

В одном из последних обширных исследований [11] показана значительная и, как утверждается, независимая от HG роль верхней височной извилины (STG) в обработке вербальных высказываний, в связи с чем заявлен принцип параллельной обработки речезыкового материала в HG и STG, вплоть до того, что авторы на основе применения метода прямой фокальной электрокортикальной стимуляции и исследования абляции HG делают вывод о том, что “HG, по-видимому, не требуется для восприятия речи (согласно цитируемому тексту, для обработки языка. Пер. с англ. яз. – И.М., В.О. и др.), в то время как STG требуется” [11, с. 4634]. Такая гипотеза, без сомнения, интересна в аспекте представлений о распределенных параллельно функционирующих нейросетях, обеспечивающих ту или иную базовую или “частную” функцию, однако важными остаются вопросы нейронального обеспече-

ния речезыковой интеграции, равно как и теоретическое осмысление феноменов языка и речи и, соответственно, отбора речевых стимулов для проведения нейрофизиологических исследований, а также вопрос применяемых инструментальных методов и заданий [11, 13, 19–21].

Более полувека продолжают попытки дифференцировать процессы речи и языка, однако и самая последняя зарубежная работа по этой проблеме [22], выполненная, как и [11], на материале атонального языка, в силу используемой методологии и методики не решила эту задачу. Между тем до- и внеязыковые формы речи представляют собой естественные коммуникативные знаки не только в период раннего постнатального онтогенеза, но и в коммуникативной культуре взрослых, и специфическое нейрональное обеспечение чистых речевых форм, показанное в [23] и подтверждающее существование распределенных и различных нейросетей ГМЧ при обработке речевых и речезыковых стимулов, требует еще множества исследований и подробного анализа.

Разработанная ранее концепция “Речь vs. Язык” развивает представления о существовании двух типов знаковых систем, специализированных по речи и языку [24, 25]. Это означает необходимость активизации нейрофизиологических исследований функциональных структур ГМЧ, в том числе структур слуховой коры, с учетом различий в типах естественных стимулов: собственно речевых, соотношенных с социально-когнитивными задачами и системой социальных отношений/смыслов; *a priori* интегративного характера устных речезыковых высказы-

ваний, репрезентирующих и социальный аспект речи, и концептуальную картину мира человека.

В данной работе, в том числе в связи с гипотезой о независимости STG от HG при обработке языковых высказываний [11], представим прежде всего данные фМРТ-исследования в отношении этих двух областей интереса.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В проведенном фМРТ-эксперименте испытуемым предъявляли четыре типа стимулов, в том числе значимые для обсуждения данной темы стимулы S1 – вопросительная вокализация с типичным повышением тона в границах единственного гласноподобного звука, который условно обозначили как редуцированный [ъ]: Ъ?; S2 – вопросительное вербальное высказывание-холофраза *Да?* с идентичным прагмасемантическим вокально-речевым оформлением. В соответствии с числом стимулов в фМРТ-эксперименте использовали рандомизированный блочный план (латинский квадрат  $4 \times 4$ ). Стимулы предъявляли в рандомизированном порядке, по восемь предъявлений каждого стимула в каждом блоке с интервалом 1 с между одинаковыми стимулами в блоке и интервалом в 15 с между сериями стимулов одного типа в блоке, а также между блоками. Поскольку стимулы являются естественными речекommunikативными единицами, используемыми во взрослой обыденной коммуникативной культуре, для распознавания их значений и смыслов не требовалось предварительного обучения испытуемых. Стимулы записаны в шумоизолированной студии профессиональным педагогом по речи, женским голосом, в высоком регистре. Проведена нормализация стимулов по громкости. Эмоциональная составляющая минимизирована, и, согласно экспертным оценкам и оценкам испытуемых в постэкспериментальном опросе, стимулы не содержат выраженного позитивного либо негативного эмоционального компонента, распознаются как “нейтральные”. В эксперименте блокировано естественное речевое поведение отклика.

Выборку исследования составили 15 испытуемых – восемь женщин, семь мужчин с нормальным слухом и зрением, с их слов, без неврологических нарушений (без обращения к неврологу в течение последних двух лет), правши. Все испытуемые – студенты вузов (уровень бакалавриата либо магистратуры), носители русской речевой городской культуры и русского языка как родного. Средний возраст – 22.4 года. Каждый испытуемый подписал добровольное согласие на участие в исследовании. Исследование одобрено локальным этическим комитетом НИЦ “Курчатовский институт”.

Стимулы предъявляли через амагнитные головные телефоны с функцией шумоподавления на звуковом уровне 80 дБ, бинаурально. Во время записи испытуемые должны были сохранять спокойное расслабленное состояние и смотреть на экран монитора, где с целью организации визуального внимания испытуемого предъявлялся фиксирующий крест.

Сканирование проводили на магнитно-резонансном томографе Siemens Magnetom Verio 3T (Германия) с 32-канальной головной МР-катушкой. Испытуемый располагался в МРТ-камере в положении лежа, голова закреплялась с помощью уплотняющих модулей. Для каждого испытуемого были записаны анатомические данные с высоким разрешением на основе T1-взвешенной 3D-последовательности (TR = 2530 мс, TE = 3.31 мс, 176 срезов, размер воксела –  $1 \times 1 \times 1$  мм<sup>3</sup>). Запись функциональных данных осуществлялась на основе мультисрезовой эхо-планарной последовательности EPI: TR = 1110 мс, TE = 24 мс, 51 срез, размер воксела –  $2 \times 2 \times 2$  мм<sup>3</sup>, угол отклонения вектора намагниченности (*flip angle*) 90°. От каждого испытуемого в эксперименте получено по 32 записи активации мозга на каждый стимул.

Предобработку данных МРТ проводили на основе свободно распространяемого программного пакета SPM12 и разработанных одним из авторов статьи (В.А. Орлов) терминальных скриптов системы MacOS. Структурные и функциональные данные были приведены к центру в передней комиссуре вручную. Проводили расчет и коррекцию артефактов движения. С целью удаления артефактов магнитной восприимчивости на основе записанных во время исследования карт неоднородности магнитного поля выполняли коррекцию функциональных данных. Структурные и функциональные МРТ-объемы были нормализованы на шаблонные изображения в MNI (Montreal Neurological Institute) пространстве. Использование мультисрезовых последовательностей для регистрации фМРТ-данных приводит к появлению физиологических и аппаратных вкладов в шум. Такие вклады приводят к некорректной статистической оценке активации нейронных сетей. Для их детекции и подавления использовали метод независимых компонент (МНК). На последнем этапе предобработки данных с целью удаления случайных выбросов к функциональным данным был применен гауссовский фильтр с ядром  $6 \times 6 \times 6$  мм<sup>3</sup>. Для получения результирующих статистических карт использовали классическую обобщенную линейную модель.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Получены данные о связности зон ГМЧ при пассивном восприятии чистого речевого (вокально-речевого) стимула и устного вербального высказывания минимальной структуры. Покажем прямые связи билатеральных областей НГ, значимо отличающиеся ( $p \leq 0.001$ ) в задачах восприятия этих двух стимулов.

В экспериментальных условиях восприятия естественной чистой вокально-речевой формы установлены следующая структура и уровни связности (в диапазоне от 14.0373 до -14.0373) областей интереса в слуховой коре взрослых.

Правосторонняя *Heschl's gyrus* (HG r) выявляет наибольшую тесноту связей со следующими областями (наименования согласно CONN):

*Heschl's gyrus*, слева (HG l),  
*superior temporal gyrus, anterior div.*, справа (aSTG r),  
*planum polare*, справа (PP r),  
*superior temporal gyrus, posterior div.*, билатерально (pSTG l и pSTG r);

– с несколько меньшей теснотой связи – с такими областями, как

*central opercular cortex*, слева (CO l),  
*parietal operculum cortex*, слева (PO l),  
*temporal pole*, билатерально (TP l, TP r),  
*parietal operculum cortex*, справа (PO r),  
*superior temporal gyrus, anterior div.*, слева (aSTG l),  
*central opercular cortex*, справа (CO r);

– с наименьшим коэффициентом связности по сравнению с указанными с *insular cortex*, справа (IC r).

Левосторонняя HG l обнаруживает наибольшую тесноту связей с областями:

*planum polare*, билатерально (PP l, PP r),  
*planum temporale*, билатерально (PT l, PT r);

– с понижением коэффициента связности – с областями:

*central opercular cortex*, слева (CO l),  
*parietal operculum cortex*, слева (PO l),  
*superior temporal gyrus, posterior div.*, билатерально (pSTG l, pSTG r),  
*superior temporal gyrus, anterior div.*, билатерально (aSTG r, aSTG l),  
*temporal pole*, слева (TP l),  
*insular cortex*, слева (IC l),  
*temporal pole*, справа (TP r).

Кроме того, НГ (право- и левосторонняя) обнаруживает прямые связи с рМТГ – задним отделом средней височной извилины (билатерально), с ее более высоким уровнем связности с правосторонней НГ. STG также имеет более обшир-

ную сеть связей в аудиторной подсистеме ГМЧ, что будет описано в другой публикации.

В задаче восприятия естественного речевого высказывания минимальной структуры установлена связность (диапазон – от 20.1742 до -20.1742) выделенных областей интереса в слуховой коре взрослых:

– правосторонняя *Heschl's gyrus* (HG r) выявляет наибольшую тесноту связи с областями:

*Heschl's gyrus*, слева (HG l),  
*superior temporal gyrus, posterior div.*, слева (pSTG l);  
 – с понижением коэффициента связности:  
*central opercular cortex*, слева (CO l),  
*superior temporal gyrus, anterior div.*, справа (aSTG r),  
*superior temporal gyrus, posterior div.*, справа (pSTG r),

*parietal operculum cortex*, билатерально (PO r, PO l),  
*superior temporal gyrus, anterior div.*, слева (aSTG l),  
*central opercular cortex*, справа (CO r),  
*temporal pole*, справа (TP r),  
*juxtapositional lobule cortex – supplementary motor cortex*, слева (SMA l);

– левосторонняя HG l обнаруживает наибольшую тесноту связей (однако в целом более низкую, чем у HG r в данной задаче) с областями:

*central opercular cortex*, слева (CO l),  
*superior temporal gyrus, anterior div.*, справа (aSTG r),  
*superior temporal gyrus, posterior div.*, справа (pSTG r),

*planum temporale*, билатерально (PT r, PT l),  
*planum polare*, билатерально (PP l, PP r), с более низким уровнем связности у праволатеральной PP,

*superior temporal gyrus, anterior div.*, слева (aSTG l),  
*parietal operculum cortex*, билатерально (PO l, PO r), с более низким уровнем связности у праволатеральной PO,

*insular cortex*, слева (IC l),  
*temporal pole*, справа (TP r),  
*central opercular cortex*, справа (CO r).

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Результаты, полученные в [11], имеют существенное ограничение, связанное с односторонней стимуляцией НГ и STG и односторонней абляцией НГ в клиническом случае. Остается проблемным и вопрос о сгенерированных тональных стимулах, хотя и отвечающих спектрограммам предложений, но модифицированных по уровням интенсивности (громкости) и унифицированных по длительности [11], что принципиально меняет условия эксперимента по сравнению с восприяти-

ем естественных вербальных конструкций, а активации ГМЧ при восприятии синтезированных интонационных стимулов, как можно полагать в силу ряда причин, могут не соответствовать ответам мозга на естественные вокально-интонационные стимулы [25].

Представленные данные отражают активации в областях интереса обоих полушарий ГМЧ. Важными для результата работы являются последовательное минимальное приращение сигнала – от “простой” вокализации до минимальной прагматической единицы, имеющей односложную структуру и при этом естественное увеличенное время сигнала (со 150 до 250 мс), а временной диапазон прагматически значимой повышательной интонации составил для обоих стимулов 100 мс [23]; а также максимальная нейтрализация эмоциональной составляющей.

Полученные результаты показывают обширные системы высокозначимых связей извилины Хешля, имеющей, как известно, тонотопическую организацию. Высокозначимая связность извилины Хешля представлена в обеих задачах – восприятия чистого речевого стимула и речезыкового высказывания минимальной языковой структуры.

При восприятии чистого речевого сигнала в данных экспериментальных условиях правосторонняя НГ обнаруживает наибольшую связность как с левосторонней НГ, так и с aSTG справа, pSTG справа и слева, PP справа (контрлатеральный PP не представлен в данной задаче), с меньшей теснотой связи – с aSTG слева, TP, PO и CO – билатерально, правая IC имеет минимальную связность с правой НГ. Левосторонняя НГ обнаруживает наибольшую тесноту связей с PP и PT билатерально, с понижением коэффициента связности с CO и PO слева, билатерально с pSTG и aSTG, а также с TP (с меньшим коэффициентом справа, чем слева), наконец, с левосторонней IC. НГ (право- и левосторонняя) обнаруживает прямые связи с rMTG (билатерально), с ее более высоким уровнем связности с правосторонней НГ. STG кроме связности с НГ имеет обширную сеть связей в слуховой коре, что будет представлено в следующей публикации.

При восприятии естественного речезыкового высказывания минимальной структуры установлен – с повышением тесноты связности по сравнению с первой задачей – наибольший уровень связности правосторонней НГ с НГ слева и pSTG слева, и далее с понижением коэффициента связности с CO слева, aSTG справа, pSTG справа, PO билатерально, aSTG слева, CO справа, TP справа (левое TP не представлено), а также SMA слева. Левосторонняя НГ обнаруживает наибольшую тесноту связей, однако в целом более низкую, чем правой НГ в этой задаче, с CO слева, aSTG справа, pSTG справа (левая pSTG не пред-

ставлена), PT билатерально, PP билатерально (с более низким уровнем связности у праволатеральной PP), aSTG слева, PO билатерально (с более низким уровнем связности у правой PO), IC слева, TP справа (левое не представлено), CO справа.

И правая, и левая НГ имеют широкую сеть как ипси-, так и контрлатеральных связей в обеих задачах, что важно прежде всего с точки зрения вопроса о латерализации/межполушарном представительстве функции “чистой” речи, обработке различными областями слуховой коры различных ее признаков – от голосовых до динамических интонационных, значимых для контроля речевой формы и распознавания ее социальной семантики, а также вопросов о специализации нейросетей в отношении анализа языковых средств и о нейросетевых подсистемах при восприятии интегративного характера устных вербальных высказываний разной сложности.

В данном исследовании не обнаружена ипсилатеральная связь левой НГ с левой pSTG, что значимо для соотнесения с данными о ранних латентных реакциях в STG [11], однако будет дополнительно проверено на большей выборке испытуемых.

Работы выполнены в рамках выполнения государственного задания НИЦ “Курчатовский институт” с использованием вычислительных ресурсов федерального центра коллективного пользования “Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса” НИЦ “Курчатовский институт”.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kaas J.H., Hackett T.A. // PNAS. 2000. V. 97. P. 11793.
2. Bendor D., Wang X. // J. Neurophysiol. 2008. V. 100. P. 888.
3. Petkov C.I., Kayser C., Augath M. // PLoS Biol. 2006. V. 4. P. 215.
4. Petkov C.I., Jarvis E.D. // Front. Evol. Neurosci. 2012. V. 4. P. 12.
5. Scharff C., Friederici A.D., Petrides M. // Front. Evol. Neurosci. 2013. V. 5. P. 1.
6. Rauschecker J.P., Scott S.K. // Nat. Neurosci. 2009. V. 12. № 6. P. 718.
7. Sweet R.A., Dorph-Petersen K.-A., Lewis D.A. // J. Comp. Neurol. 2005. V. 491. № 3. P. 270.
8. Da Costa S., van der Zwaag W., Marques J.P. et al. // J. Neurosci. 2011. V. 31. № 40. P. 14067.
9. Wallace M.N., Johnston P.W., Palmer A.R. // Exp. Brain Res. 2002. V. 143. P. 499.
10. Boemio A., Fromm S., Braun A., Poeppel D. // Nat. Neurosci. 2005. V. 8. P. 389.
11. Hamilton L.S., Oganian Yu., Hall J., Chang E.F. // Cell. 2021. V. 184. № 8. P. 4626.
12. Heuvel M.P., Sporns O. // J. Neurosci. 2011. V. 31. P. 15775.

13. *Poli D., Pastore V.P., Martinoia S., Massobrio P.* // J. Neural Eng. 2016. V. 13. № 2. P. 026023.
14. *Poliva O., Bestelmeyer P.E., Hall M. et al.* // Cogn. Behav. Neurol. 2015. V. 28. № 3. P. 160.
15. *Steinschneider M., Nourski K.V., Rhone A.E. et al.* // Front. Neurosci. 2014. V. 8. P. 240.
16. *Tremblay P., Dick A.S.* // Brain Lang. 2016. V. 162. P. 60.
17. *Щемелева О.В., Жукова О.В., Шелепин Ю.Е. и др.* // Физиология человека. 2019. Т. 45. № 6. С. 16.
18. *Hackett T.A.* // Handbook of clinical neurology. 2015. V. 129. Amsterdam: Elsevier, P. 27.
19. *Жирнова В.А., Зырянов А.С., Гордеева Е.А. и др.* // Когнитивная наука в Москве: новые исследования. Материалы конференции. 2019. С. 609.
20. *Trébuchon A., Alario F.-X., Liégeois-Chauvel C.* // Front. Hum. Neurosci. 2021. V. 15. P. 702773.
21. *Меметова К.С., Князева В.М., Станкевич Л.Н. и др.* // Сб. тезисов XXIV съезда физиол. о-ва им. И.П. Павлова. СПб., 2023. С. 379.
22. *Tomasello R., Grisoni L., Boux I. et al.* // Cereb. Cortex. 2022. V. 32. № 21. P. 4885.
23. *Маланчук И.Г., Орлов В.А., Карташов С.И., Малахов Д.Г.* // Физиология человека. 2023. Т. 49. № 3. С. 106.
24. *Маланчук И.Г.* Речь как психический процесс: монография. Красноярск, 2009. 285 с.
25. *Дементьев В.В.* Теория речевых жанров: монография. М.: Знак, 2010. 594 с.
26. *Hamilton L.S., Huth A.G.* // Lang. Cogn. Neurosci. 2020. V. 35. № 5. P. 573.