

Слуховая депривация и пластичность мозга у пациентов с кохлеарными имплантами

В.И. Пудов, О.В. Зонтова

Адрес для переписки: Виктор Иванович Пудов, v_pudov@mail.ru

Для цитирования: Пудов В.И., Зонтова О.В. Слуховая депривация и пластичность мозга у пациентов с кохлеарными имплантами. Эффективная фармакотерапия. 2025; 21 (14): 18–22.

DOI: 10.33978/2307-3586-2025-21-14-18-22

Статья посвящена тому, что из-за технических и физиологических ограничений существующих систем кохлеарной имплантации информация, передаваемая кохлеарным имплантом, сильно ограничена и далека от того же уровня детализации, что и при нормальном слухе. В результате понимание разговорной речи у пользователей кохлеарных имплантов, как правило, хуже и требует больше усилий, чем у людей с нормальным слухом. Ведущую роль в восприятии устной речи выполняют центральные отделы слуховой системы. Поэтому для полноценного понимания основных проблем, препятствующих успешному развитию речевых способностей у пользователей кохлеарных имплантов, необходимы дополнительные исследования в области изучения центральных механизмов слухового восприятия. При этом следует иметь в виду, что в результате слуховой депривации происходит кросс-модальная реорганизация в коре головного мозга и изменяются функциональные связи не только внутри слуховой системы, но и меняется соотношение между другими сенсорными системами и нейрокогнитивными центрами. Поэтому фундаментальные знания об элементарных сенсорных и когнитивных процессах, которые лежат в основе развития речевых и языковых навыков детей после КИ, играют важную роль в разработке новых, оптимальных методов реабилитации, которые ориентированы на конкретного ребенка, исходя из его индивидуальных особенностей развития.

Ключевые слова: кохлеарная имплантация, слуховая депривация, пластичность мозга, восприятие речи

Введение

Кохлеарная имплантация (КИ) – уникальная методика восстановления слуховых способностей при тяжелой степени тугоухости или полной глухоте. Тем не менее речевые способности у пользователей кохлеарных имплантов имеют порой значительные индивидуальные различия как у взрослых позднооглохших, так и у детей с врожденной глухотой [1, 2]. Разнообразные результаты у детей с врожденной глухотой, которые представляют наиболее значимую группу пациентов, призывают специалистов продолжать более тщательное изучение данной проблемы.

Формирование разговорной речи у детей с врожденной глухотой после КИ, так же как и у детей с нормальным слухом, происходит в результате спонтанного, а чаще целенаправленного обучения на основе накопления слухового и речевого опыта коммуникации с окружающими людьми. Обязательным условием для развития устной речи являются полноценное восстановление утраченной слуховой функции и полноценная слухоречевая реабилитация. Уровень слухоречевого развития детей после КИ зависит как от возраста потери слуха и длительности глухоты, так и от индивидуальных способностей детей и методов,

применяемых для их обучения [3, 4]. При этом слуховая депривация приводит не только к задержке речевого развития, но и отражается на когнитивных способностях ребенка [5, 6].

Для полноценного понимания основных проблем, препятствующих успешному развитию речевых способностей у детей после КИ, необходимы дополнительные исследования в области базовых процессов обучения, памяти, познания и мышления. Кроме того, фундаментальные знания об элементарных сенсорных и когнитивных процессах, которые лежат в основе развития речевых и языковых способностей детей после КИ, также играют важную роль в разработке новых, оптимальных методов реабилитации, которые ориентированы на конкретного ребенка, исходя из его индивидуальных особенностей развития [1, 3].

Слуховая депривация и пластичность мозга

Ведущую роль в развитии речи играют центральные отделы слуховой системы; недаром говорят, что человек слушает ухом, а воспринимает мозгом. Слуховая депривация, обусловленная врожденной глухотой, лишает традиционные области слуховой коры мозга физиологического стимула, который необходим для нормального анатомо-физиологического развития этой области коры, и она постепенно утрачивает свои способности обрабатывать речевую информацию. По мнению большинства авторов, чувствительный (сенситивный) период для развития слуховой области коры составляет 3,5 года [7–10]. Совокупность электрофизиологических исследований с регистрацией слуховых корковых вызванных потенциалов (СКВП) позволила проанализировать созревание слуховой области коры у детей с нормальным слухом и в условиях слуховой депривации. У детей с нормальным слухом с возрастом происходит постепенный рост амплитуды и уменьшение латентного периода волны P1, тогда как у детей с врожденной глухотой амплитуда этой волны существенно ниже, а латентный период больше [8]. В то же время у детей с врожденной глухотой, которые проимплантированы в возрасте до 3,5 года, латентность волны P1 попадает в диапазон нормы через три – шесть месяцев электростимуляции, а у детей, которые проимплантированы после семи лет, латентность P1 не нормализуется даже после нескольких лет стимуляции, что обусловлено реорганизацией слуховой области коры в результате слуховой депривации [9].

Кроме того, у детей с КИ латентность волны P1 хорошо коррелирует с уровнем развития устной речи и языковых навыков. Даже у детей с недостаточной эффективностью КИ наблюдалось снижение или стабилизация латентности P1 и постепенное развитие слуховых и языковых навыков. В то же время у детей, которые не использовали импланты на постоянной основе, увеличилась латентность P1 и ухудшились слуховые и языковые навыки. Компонент P1 считается важным клиническим ресурсом, способным не только измерять созревание коры головного

мозга, но и оценивать прогресс развития речевых навыков у детей после КИ [9, 11]. Если установка КИ была проведена в течение сенситивного периода до 3,5 года, как правило, происходит быстрый прогресс развития навыков устной речи и в дальнейшем уровень развития устной речи мало отличается от слышащих сверстников.

В последнее время встречается множество публикаций относительно СКВП, использующих парадигму слуховых отклонений P300 и негативность несоответствия у пациентов с КИ. Так, латентный период потенциала P300 так же, как и потенциала P1, статистически значимо отличается у детей раннего возраста по сравнению с детьми, имплантированными после сенситивного периода 3,5 года [12].

При этом амплитуда потенциала P300 хорошо коррелирует с показателями восприятия речи ($r = 0,70$, $p = 0,05$) и продолжительностью глухоты ($r = -0,83$, $p = 0,009$) [13]. Кроме того, у всех пользователей имплантов амплитуда P300 достоверно коррелирует с разборчивостью речи в шуме ($r = -0,65$, $p = 0,001$) и с маскировкой конкурирующей мужской ($r = -0,62$, $p = 0,002$) и женской речью ($r = -0,60$, $p = 0,003$) [14]. Менее обнадеживающие результаты получены при регистрации потенциала негативности несоответствия (MMN). Если в ранних публикациях отмечалась значительная положительная корреляция между распознаванием речи и амплитудой MMN потенциала [15], то в более поздних публикациях эта взаимосвязь полностью отсутствовала [16–18]. По мнению R. Abrahamse и соавт. [13], потенциал P300, в отличие от потенциала MMN, обеспечивает более надежную оценку КИ, в том числе и на индивидуальном уровне.

Кросс-модальная пластичность мозга

Другой вопрос, активно обсуждаемый в литературе, – это кросс-модальная реорганизация мозга. Основной принцип нейробиологии заключается в том, что если в течение длительного периода времени не происходит адекватной для данной сенсорной системы стимуляции, то соответствующие области коры будут реорганизовываться. Слуховая депривация приводит к тому, что незадействованная в течение сенситивного периода слуховая область коры мозга используется для других сенсорных модальностей (таких, как зрение, вибротактильная и соматосенсорная системы) [19–21]. Следует иметь в виду, что кросс-модальная реорганизация не только изменяет функциональные связи внутри слуховой системы, но и меняет соотношение между другими сенсорными системами и нейрокогнитивными центрами [22, 23]. Так, например, H. Glick и A. Sharma [24] во время исследования зрительных корковых вызванных потенциалов (ЗКВП) установили, что у детей с врожденной глухотой отмечается увеличение амплитуды и уменьшение латентности этих потенциалов по сравнению с детьми того же возраста с нормальным слухом. По данным позитронно-эмиссионной томографии, дети с нормальным слухом продемонстрировали активацию областей

коры, связанных с типичной обработкой визуальных стимулов движения (область мозжечка) для всех компонентов ЗКВП, в то время как дети с КИ продемонстрировали дополнительную активацию правой латеральной височной области коры мозга [25, 26]. Таким образом, в слуховой области коры происходит реорганизация на восприятие дополнительной зрительной информации взамен утраченной слуховой информации. Эти данные были также подтверждены результатами диффузной оптической томографии высокой плотности [27, 28].

Вовлечение слуховой области коры в работу зрения может быть функционально связано с необходимостью получения дополнительной зрительной информации из-за недостаточности слуховой информации. Высвобожденная в результате слуховой депривации слуховая область коры используется для обработки зрительной информации. T.R. Bergeson и соавт. [29] утверждают, что дети с поздней КИ демонстрируют более высокий уровень зрительного восприятия речи по сравнению с детьми с ранней имплантацией, использующими восприятие речи исключительно на слуховой основе.

В более поздних исследованиях было экспериментально подтверждено, что для поддержки понимания устной речи, особенно в сложных акустических условиях, мозг задействует не только слуховые, но и зрительные пути, используя мультисенсорные соответствия между движениями губ и акустическими характеристиками речевого сигнала [30, 31]. Таким образом кросс-модальная пластичность мозга позволяет улучшить результаты КИ за счет поступления дополнительной зрительной информации. Вопреки существующему мнению о необходимости исключения зрения при обучении устной речи, результаты демонстрируют, что кросс-модальная активация слуховых областей мозга визуальной речью после имплантации обеспечивает адаптивные преимущества для улучшения восприятия устной речи за счет аудиовизуального механизма [27, 28]. Использование чтения по губам позволяет поддерживать фонологические представления и языковую специализацию левого полушария, что еще больше улучшает понимание устной речи [32, 33]. Соответственно при ограниченном восприятии устной речи у детей и взрослых в программу реабилитации необходимо дополнительно включать обучение зрительному восприятию устной речи, то есть развивать способность чтения по губам.

В литературе также имеются сведения, что при слуховой депривации слуховая кора может быть использована и для обработки соматосенсорной информации, что также может отразиться на восприятии слуховой информации. Так, у детей с нормальным слухом соматосенсорные корковые вызванные потенциалы регистрируются исключительно в соматосенсорной области коры, тогда как у детей с имплантами они регистрируются не только в соматосенсорной, но и контралатеральной слуховой области [34].

Причем у детей после КИ с отличными результатами восприятия речи вибротактильная (соматосенсорная) стимуляция приводила к активации только классической соматосенсорной области коры, как и у нормально слышащих детей, в то время как у детей со средними результатами происходило дополнительное задействование контралатеральной слуховой области коры [35].

Кроме того, области, не затронутые глухотой, такие как лобно-теменная доля коры и медиальная префронтальная кора, продемонстрировали высокую пластическую способность. Использование жестовой речи у глухих подростков и взрослых приводит к реорганизации коры головного мозга [36]. Жестовая речь сама по себе вызывает модификацию мозга, особенно в области моторики рук и в областях, участвующих в визуальной обработке изображения лица и кистей рук. Эти пластические изменения в работе мозга необходимо учитывать при организации и проведении слухоречевой реабилитации у пользователей имплантов, испытывающих трудности при восприятии речи на слуховой основе [37, 38].

Таким образом, у детей с врожденной глухотой, проимплантированных после сенситивного периода, в слуховой области коры происходит обработка не только слуховой, но и сопутствующей неслуховой (зрительной и соматосенсорной) информации, что приводит к кросс-модальной перестройке в организации центральной нервной системы. Кросс-модальной реорганизацией коры можно объяснить трудности в слуховом восприятии и обучении устной речи у детей, которым устанавливают имплант после окончания сенситивного периода [19].

Заключение

В результате слуховой депривации у детей с врожденной глухотой происходит перестройка в организации центральной нервной системы. Анализ научных источников, посвященных изучению морфологических изменений головного мозга, выявленных с помощью магнитно-резонансной томографии при врожденной потере слуха, продемонстрировал снижение плотности белого вещества и увеличение серого вещества как в слуховой, так и речевой области коры мозга как у детей, так и у взрослых [39]. Регистрация СКВП позволила проанализировать созревание слуховой области коры у детей с нормальным слухом и в условиях слуховой депривации. По мнению большинства авторов, сенситивный период для развития слуховой области коры составляет 3,5 года [7–10, 19]. Пластические изменения в слуховой области коры головного мозга после этого периода могут существенно повлиять на результаты слухоречевой реабилитации после КИ [37, 38].

Кроме того, слуховая депривация приводит к тому, что незадействованная в течение сенситивного периода слуховая область коры мозга используется для других сенсорных модальностей. Вовлечение слуховой области коры в обработку зрительной

и соматосенсорной информации может быть обусловлено необходимостью получения дополнительной сенсорной информации для улучшения слухового восприятия устной речи. Поэтому дети с поздней имплантацией, как правило, используют слухозрительное восприятие речи, по сравнению с детьми с ранней имплантацией, использующими восприятие речи исключительно на слуховой основе [29, 30]. Пластические кросс-модальные изменения в работе центральных отделов мозга необходимо учитывать

при организации и проведении слухоречевой реабилитации, особенно у детей с врожденной глухотой и поздней имплантацией. При разработке оптимальных методов реабилитации необходимо учитывать фундаментальные знания об основных сенсорных и когнитивных процессах, которые лежат в основе развития речевых и языковых навыков у детей с КИ. 

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Пудов В.И., Зонтова О.В. Биофизические аспекты слухового восприятия у пациентов с кохлеарными имплантами. *Российская оториноларингология*. 2023; 22 (6): 82–87.
2. Пудов В.И., Зонтова О.В. Слуховое восприятие при кохлеарной имплантации. *Сенсорные системы*. 2023; 37 (4): 321–329.
3. Королева И.В. Реабилитация глухих детей и взрослых после кохлеарной и стволомозговой имплантации. СПб.: КАРО, 2016.
4. Савенко И.В., Гарбарук Е.С., Бобошко М.Ю. Психоакустическое тестирование для оценки функционального созревания центральных отделений слуховой системы. *Сенсорные системы*. 2023; 37 (4): 348–362.
5. Королева И.В., Огородникова Е.А., Пак С.П. и др. Значение центральных механизмов слуха в восстановлении восприятия речи у глухих пациентов после кохлеарной имплантации. *Специальное образование*. 2017; 3 (47): 100–111.
6. Marinescu A.N., Georgescu M.G. Auditory deprivation. *Romanian J. of Neurology*. 2014; 13 (1): 5–11.
7. Sharma A., Dorman M.F., Spahr A.J. A sensitive period for the development of the central auditory system in children with cochlear implants: implications for age of implantation. *Ear and hearing* 2002; 23 (6): 532–539.
8. Sharma A., Dorman M. Central Auditory Development in Children with Cochlear Implants: Clinical Implications. *Advances in Otorhinolaryngology*. 2006; 64: 66–88.
9. Sharma A., Nash A.A., Dorman M. Cortical development, plasticity and reorganization in children with cochlear implants. *J. of Com. Disorders*. 2009; 42 (4): 272–279.
10. Кузовков В.Е., Сугарова С.Б., Кантемирова Р.К. и др. Кохлеарная имплантация как метод слуховой реабилитации в разных возрастных группах. *Российская оториноларингология*. 2022; 21(2): 70–79.
11. Cavalcanti M.I., Silva L.A., Gomez M.V., et al. Central Auditory Nervous System Stimulation through the Cochlear Implant Use and Its Behavioral Impacts. A Longitudinal Study of Case Series. *Case Reports in Otolaryngology* 2021; 2021 (1): 8888450.
12. Jayachandran D., Oviya M.P. P300 in Children with Early and Late Cochlear Implantation. *Intern. J. of Scien. and Res. (IJSR)*. 2021; 10 (10): 504–508.
13. Abrahamse R., Beynon A., Piai V. Long-term auditory processing outcomes in early implanted young adults with cochlear implants: the Mismatch Negativity vs. P300 response. *Clin. Neurophysiol.* 2021; 132 (1): 258–268.
14. Tao D.D., Zhang Y.M., Liu H., et al. The P300 Auditory Event-Related Potential May Predict Segregation of Competing Speech by Bimodal Cochlear Implant Listeners. *Frontiers in Neuroscience*. 2022; 10 (16): 888596.
15. Turgeon C., Lazzouni L., Lepore F., et al. An objective auditory measure to assess speech recognition in adult cochlear implant users. *Clin. Neurophysiology*. 2014; 125 (4): 827–835.
16. Fernandes N.M., Gil D., Azevedo M.F. Mismatch Negativity in Children with Cochlear Implant. *Int. Arch. Otorhinolaryngol.* 2019; 23 (3): e292–e298.
17. Hamid M., Kotait M.A., Kolkaila E.A. Mismatch negativity in children with cochlear implant. *Int. J. of Otorhinolaryngol. and Head and Neck Surg.* 2019; 5 (5): 1149–1155.
18. Engstrom E., Kallioinen P., Lindgren M., et al. Computer-assisted reading intervention for children with hearing impairment using cochlear implants: Effects on auditory event-related potentials and mismatch negativity. *Int. J. of Ped. Otorhinolaryngol.* 2020; 137: 110229.
19. Sharma A., Campbell J., Cardon G. Developmental and cross-modal plasticity in deafness: Evidence from the P1 and N1 event related potentials in cochlear implanted children. *Int. J. Psychophysiol.* 2015; 95: 135–144.
20. Corina D., Blau Sh., LaMarr T., et al. Auditory and Visual Electrophysiology of Deaf Children with Cochlear Implants. Implications for Cross-modal Plasticity. *Frontiers in psychology*. 2017; 8: 59.
21. Kral A., Sharma A. Cross-modal plasticity in hearing loss. *Neurosciences*. 2023; 46 (5): 377–393.
22. Kral A., Kronenberger W.G., Pisoni D.B., et al. Neurocognitive factors in sensory restoration of early deafness. A connectome model. *The Lancet Neurology*. 2016. 15 (6): 610–621.
23. Glick H., Sharma A. Cortical Neuroplasticity and Cognitive Function in Early-Stage, Mild-Moderate Hearing Loss. Evidence of Neurocognitive Benefit From Hearing Aid Use. *Front. Neurosci.* 2020; 14: 93.

24. Glick H., Sharma A. Cross-modal plasticity in developmental and age-related hearing loss. Clinical implications. *Hear. Res.* 2017; 343: 191–201.
25. Bertrand J.A., Lassonde M., Robert M., et al. An intracranial event-related potential study on transformational apparent motion. Does its neural processing differ from real motion? *Exp. Brain Res.* 2012; 216: 145–153.
26. Campbell J., Sharma A. 2016. Visual Cross-Modal Re-Organization in Children with Cochlear Implants. *PLoS One.* 2016; 11 (1): e0147793.
27. Anderson C.A., Wiggins I.M., Kitterick P.T., et al. Adaptive benefit of cross-modal plasticity following cochlear implantation in deaf adults. *Proceed. of the Nat. Academ. of Scien.* 2017; 114 (38): 10256–10261.
28. Sherafati A., Dwyer N., Bajracharya A., et al. Prefrontal cortex supports speech perception in listeners with cochlear implants. *Neuroscien.* 2022; 6, 1–23.
29. Bergeson T.R., Pisoni D.B., Davis R.A.O. Development of Audiovisual Comprehension Skills in Prelingually Deaf Children With Cochlear Implants. *Ear. Hear.* 2005; 26 (2): 149–164.
30. Bröhl F., Keitel A., Kayser C. MEG Activity in Visual and Auditory Cortices Represents Acoustic Speech-Related Information during Silent Lip Reading. *Eneuro.* 2022; 9 (3).
31. Ramla I., Ranjith R. Measuring Cross Modal Plasticity Using Visual Evoked Potentials (VEP) in Children with Cochlear Implant. *Acta Scientific Otolaryngology.* 2022; 4 (11): 22–29.
32. Lazard D.S., Giraud A.L. Faster phonological processing and right occipito-temporal coupling in deaf adults signal poor cochlear implant outcome. *Nature Comm.* 2017; 8 (1): 14872–14879.
33. Winsler K., Holcomb P.J., Emmorey K. Electrophysiological patterns of visual word recognition in deaf and hearing readers: An ERP mega-study. *Language, Cognition and Neurosci.* 2022; 38 (5): 636–650.
34. Cardon G., Sharma A. Somatosensory Cross-Modal Reorganization in Children with Cochlear Implants. *Front. Neurosci.* 2019; 13: 469.
35. Hennesy T., Cardon G., Campbell J., et al. Cross-Modal Reorganization From Both Visual and Somatosensory Modalities in Cochlear Implanted Children and Its Relationship to Speech Perception. *Otology & Neurotology.* 2022; 43 (8): e872–e879.
36. McCullough S., Emmorey K. Effects of deafness and sign language experience on the human brain: voxel-based and surface-based morphometry. *Language, Cognition and Neurosci.* 2021; 36: 422–439.
37. Fine I., Finney E.M., Boynton G.M., et al. Comparing the Effects of Auditory Deprivation and Sign Language within the Auditory and Visual Cortex. *J. Cogn. Neurosci.* 2005; 17 (10): 1621–1637.
38. Sun Z., Seo J.W., Park H.J., et al. Cortical Reorganization Following Auditory Deprivation Predicts Cochlear Implant Performance in Postlingually Deaf Adults. *Human Brain Mapp.* 2021; 42 (1): 233–244.
39. Grégoire A., Deggouj N., Dricot L., et al. Brain Morphological Modifications in Congenital and Acquired Auditory Deprivation. A Systematic Review and Coordinate-Based Meta-Analysis. *Front. Neurosci.* 2022; 16: 850245.

Auditory Deprivation and Brain Plasticity in Patients with Cochlear Implants

V.I. Pudov, O.V. Zontova

Saint-Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech

Contact person: Viktor I. Pudov, v_pudov@mail.ru

The article is devoted to the fact that due to the technical and physiological limitations of existing cochlear implant (CI) systems, the information transmitted by a cochlear implant is very limited and far from the same level of detail as in normal hearing. As a result, the understanding of spoken language in cochlear implant users is usually worse and requires more effort than in people with normal hearing.

The central parts of the auditory system play a leading role in the perception of oral speech. Therefore, in order to fully understand the main problems that hinder the successful development of speech abilities in users of cochlear implants, additional research is needed in the field of studying the central mechanisms of auditory perception. It should be borne in mind that as a result of auditory deprivation, cross-modal reorganization occurs in the cerebral cortex and functional connections change not only within the auditory system, but also the relationship between other sensory systems and neurocognitive centers. Therefore, fundamental knowledge about the elementary sensory and cognitive processes that underlie the development of children's speech and language skills after cochlear implantation plays an important role in the development of new optimal rehabilitation methods that are tailored to a particular child based on his individual developmental characteristics.

Keywords: cochlear implantation, auditory deprivation, brain plasticity, speech perception