

Тонотопическая настройка слухового процессора кохлеарного импланта при нормальной анатомии улитки

С.В. Левин^{1,2✉}, megalor@gmail.com, А.С. Лиленко¹, Е.А. Левина¹, В.Е. Кузовков¹, М. Шукурян³, А.Е. Пашкова⁴, В.А. Воронов²

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи; 190013, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бронницкая, д. 9

² Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова; 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41

³ Ереванский государственный медицинский университет имени Мхитара Герацци; 0025, Армения, Ереван, ул. Корюна, д. 2

⁴ Российский научный центр имени акад. Б.В. Петровского; 119991, Россия, Москва, Абрикосовский пер., д. 2

Резюме

Введение. Кохлеарная имплантация очень эффективна из-за известной тонотопической организации улитки. Эти данные используются при распределении сигналов по каналам электрода кохлеарного импланта. Чем точнее и естественнее будет раздражение волокон слухового нерва, тем лучше будет восприятие речи, звуков и разборчивость речи.

Цель. Сравнить клиническую и анатомическую настройку процессора кохлеарного импланта.

Материалы и методы. В исследование включено 63 пациента в возрасте от 2 до 60 лет с использованием системы кохлеарной имплантации, импланты со стандартной длиной электродной решетки (31,5 мм). Всем участникам была проведена компьютерная томография (КТ) височных костей с шагом 0,6 мм и менее. Для обработки данных КТ использовалось программное обеспечение Otoplan, Sliser 3D. Рассчитывались геометрические размеры улитки, длина улиткового канала, угловое положение и тонотопическая частота каждого электрода, строилась 3D-реконструкция улитки и электрода.

Результаты и обсуждение. Коррекцию частотных фильтров электродов и анатомическую настройку процессора проводили по данным, полученным в программе Otoplan. Было проведено сравнение между клинической и анатомической настройкой. После перераспределения частотных фильтров пациенты отмечали более естественное звучание, улучшение разборчивости речи. Таким образом, при анатомической настройке достигается точное соответствие между центральной частотой каждого электродного канала и тонотопической частотой зоны улитки, индивидуально определяемой по данным компьютерной томографии.

Выводы. Появился новый инструмент, позволяющий значительно улучшить качество и обеспечить индивидуальный подход к настройке процессоров после кохлеарной имплантации.

Ключевые слова: клиническая настройка, анатомическая настройка, частотное картирование, 3D-модель, естественное звучание, улучшение разборчивости речи

Для цитирования: Левин С.В., Лиленко А.С., Левина Е.А., Кузовков В.Е., Шукурян М.А., Пашкова А.Е., Воронов В.А. Тонотопическая настройка слухового процессора кохлеарного импланта при нормальной анатомии улитки. *Медицинский совет.* 2023;17(7):124–130. <https://doi.org/10.21518/ms2023-125>.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Tonotopic fitting of the sound processor cochlear implant in normal cochlea anatomy

Sergey V. Levin^{1,2✉}, megalor@gmail.com, Andrey S. Lilenko¹, Elena A. Levina¹, Vladislav E. Kuzovkov¹, Mikayel Shukuryan³, Aleksandra E. Pashkova⁴, Victor A. Voronov²

¹ Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech; 9, Bronnitskaya St., St Petersburg, 190013, Russia

² North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 41, Kirochnaya St., St Petersburg, 191015, Russia

³ Yerevan State Medical University after Mkhitar Heratsi; 2, Koryun St., Yerevan, 0025, Armenia

⁴ Petrovsky National Research Centre of Surgery; 2, Abricosovskii Lane, Moscow, 119991, Russia

Abstract

Introduction. Cochlear implantation is very effective due to the known tonotopic organization of the cochlea. These data are used in the distribution of signals along the channels of the cochlear implant electrode. The more accurate and natural the stimulation of the auditory nerve fibers, the better the perception of speech, sounds and speech intelligibility.

The aim of the study was to compare the clinical and anatomical settings of the cochlear implant processor.

Materials and methods. The study included 63 patients aged 2 to 60 years using cochlear implantation system, implants with a standard long electrode array (31.5 mm). All participants underwent computed tomography (CT) of the temporal bones with a step of 0.6 mm or less. CT data were processed using Otoplan and Sliser 3D software. The geometric dimensions of the cochlea, the length of the cochlear canal, the angular position and tonotopic frequency of each electrode were calculated, and a 3D reconstruction of the cochlea and electrode was built.

Results. The correction of the frequency filters of the electrodes and the anatomical adjustment of the processor were performed according to the data obtained in the *Otoplan* program. A comparison was made between the clinical and anatomical setting. After the redistribution of frequency filters, patients noted a more natural sound, improved speech intelligibility. Thus, with anatomical adjustment, an exact correspondence is achieved between the central frequency of each electrode channel and the tonotopic frequency of the cochlear zone, individually determined by computed tomography.

Conclusions. A new tool has appeared that allows you to significantly improve the quality and provide an individual approach to setting up processors after cochlear implantation.

Keywords: clinical tuning, anatomical tuning, frequency redistribution, 3D model, natural sounding, improved speech intelligibility

For citation: Levin S.V., Lilenko A.S., Levina E.A., Kuzovkov V.E., Shukuryan M., Pashkova A.E., Voronov V.A. Tonotopic fitting of the sound processor cochlear implant in normal cochlea anatomy. *Meditsinskiy Sovet*. 2023;17(7):124–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.21518/ms2023-125>.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Кохлеарная имплантация (КИ) применяется при лечении сенсоневральной тугоухости высокой степени и глухоте. При выполнении операции электрод кохлеарного импланта вводится в улитку височной кости для стимуляции слухового нерва. Как показало множество исследований, форма и размеры улитки могут значительно отличаться. По этой причине тип и длина электродной решетки кохлеарного импланта подбирается хирургом индивидуально с использованием данных компьютерной томографии или вычисления длины улиткового канала (ДУК) по данным рентгенографии непосредственно перед операцией [1, 2]. В настоящее время появились различные технологии, позволяющие достаточно точно вычислить длину улиткового канала. Предоперационное планирование с измерением ДУК помогает выбрать правильную длину электрода и тактику хирургического вмешательства [3, 4]. Для измерения могут применяться различные методы. М. Hardy использовал прямой метод для измерения длины улитки на гистологических срезах с помощью микрометра [5]. Непрямой метод реконструировал двухмерную модель с помощью серии гистологических срезов [6, 7]. В связи с появлением персональных компьютеров появилась возможность строить компьютерную 3D-реконструкцию. Была применена компьютерная 3D-модель с использованием гистологических срезов А. Takagi и I. Sando [8]. С 1998 г. КТ стала использоваться для предоперационной диагностики, выявления патологии внутреннего уха, в том числе планирования кохлеарной имплантации. Длина улиткового канала рассчитывалась по размерам улитки (апикальный диаметр и константа спирали) с помощью уравнения Архимеда [9]. В 2012 г. В. Escudé et al. разработали формулу для расчета длины улиткового канала [10]. В дальнейшем было разработано линейное уравнение для измерения средней длины электрода [11]. В настоящее время самым удобным и точным методом является анализ компьютерной томографии с использованием метода G. Alexiades et al. и программным обеспечением *Otoplan* для планшетов [11, 12]. Этот метод достаточно простой и позволяет определить геометрические размеры улитки и вычислить ДУК.

Программное обеспечение *Otoplan* позволяет по данным КТ точно рассчитать ДУК. С помощью данного программного обеспечения возможно определить тип и длину электрода, наиболее подходящую для пациента, определить возможные осложнения операции, выделить на 3D-модели основные хирургические ориентиры и анатомические особенности. Провести послеоперационный анализ электрода кохлеарного импланта. Определить на 3D-модели в автоматическом режиме контакты электродной решетки, их местоположение в пространстве. Рассчитать частотное (тонотопическое) положение (глубина введения) контактов электродной решетки в градусах и герцах относительно нервных тканей спирального ганглия и Кортиева органа.

Во время первого подключения системы кохлеарной имплантации используется частотное распределение электродов, приближенное к тонотопической организации улитки. Этот принцип обеспечивает эффективность кохлеарной имплантации. Обычно при клинической настройке используется стандартное частотное распределение, выбираемое по умолчанию в зависимости от типа электрода и стратегии кодирования. По данным исследований, ДУК достаточно сильно варьирует в популяции и может различаться на 30–40% между самой короткой и самой длинной улиткой [5, 10–14]. Такая вариативность при стандартном частотном распределении приводит к несоответствию между частотой электрода и местом в улитке – характерной частотой нейронов, которые он стимулирует. Это несоответствие, особенно у пациентов с постлингвальной глухотой, создает искажения восприятия звуков, передаваемых при помощи КИ и характеристиками звука, которые они ожидают услышать на основе своей слуховой памяти [15–18]. Распределение частот на уровне базилярной мембраны подчиняется логарифмическому закону, известному как функция Гринвуда. Зная ДУК, возможно сопоставить тонотопическое положение волосковых клеток в Кортиевом органе (КО) с частотами, стимулируемыми каждым электродом кохлеарного импланта путем изменения значений частотных фильтров электродов. Для этого необходим наиболее точный расчет данных ДУК [17–19].

Целью данного исследования являлось сравнение клинической и анатомической настройки речевого процессора, включающей тонотопическое картирование

электродов кохлеарного импланта с индивидуальным перераспределением частот в улитке в зависимости от расположения электрода. Анатомическая настройка процессора кохлеарного импланта выполнялась с использованием данных компьютерной томографии височных костей при помощи программного обеспечения *Otoplan*.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования стали пациенты с хронической двусторонней сенсоневральной тугоухостью 4-й степени или глухотой, перенесшие КИ. Было включено 63 пациента в возрасте от 2 до 60 лет. Все пациенты являлись пользователями системы КИ: импланты со стандартной длиной электродной решетки (31,5 мм). Всем участникам была проведена КТ височных костей с шагом 0,6 мм и менее. Пациенты были распределены на 2 группы. 1-я группа от 2 до 60 лет. В нее были включены все пациенты. В этой группе проводился анализ анатомических особенностей улитки и положения электрода. Во 2-ю группу были включены постлингвальные пациенты от 14 до 60 лет. Пациентам 2-й группы проводилась тональная аудиометрия, речевая аудиометрия до и после частотного распределения электродов. Критериями исключения являлись: аномалии развития внутреннего уха, менингит в анамнезе. Введение электродной решетки через кохлеостому. Для обработки данных КТ использовалось программное обеспечение *Otoplan* версии 1.4.0, *Sliser 3D* версии 5.0.3. Коррекцию частотных фильтров электродов и анатомическую настройку процессора проводили по данным, полученным в программе *Otoplan*. Рассчитывались геометрические размеры улитки, ДУК, угловое положение и тонотопическая картина каждого электрода, строилась 3D-реконструкция улитки и электрода.

Для настройки процессоров, перераспределения частот фильтров по данным тонотопического исследования использовалась программа *Maestro* версии 9.0.4, в которой во время анатомической настройки перераспределялись центральные частоты электродов. Для вычисления длины канала улитки (Cochlear Duct Length) и частотного положения каждого электрода используются формулы, разработанные с применением данных анатомии полученной на синхротроне с высокой точностью 3D-реконструкции до 0,009 мм. Использовались данные исследования, в котором дендриты слухового нерва были индивидуально прослежены от базилярной мембраны до спирального ганглия для каждой частоты в режиме 3D-реконструкции улитки, что позволило провести трехмерный анализ тонотопики спирального ганглия. Также были получены угловые частоты для BM и SG и их соответствие тонотопической частоте (рис. 1) [20].

ДУК для каждой частоты (А) и общая длина (Б) вычислялись по формулам [11]:

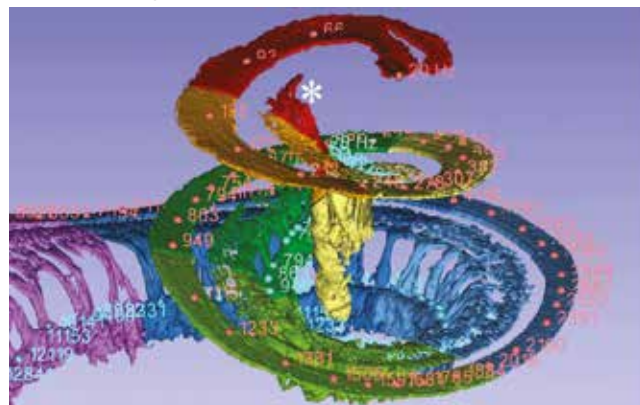
$$A: CDL_{oc}(q) = [r_{BTL}(q) * [1,18 * (A_{oc}) + 2,69 * (B_{oc}) - \sqrt{0,72 * A_{oc} * B_{oc}}]] + 2,5$$

$$B: CDL_{oc}(q) = [1,71 * [1 * 1,18 * (A_{oc}) + 2,69 * (B_{oc}) - \sqrt{0,72 * A_{oc} * B_{oc}}] + 0,18] + 2,5$$

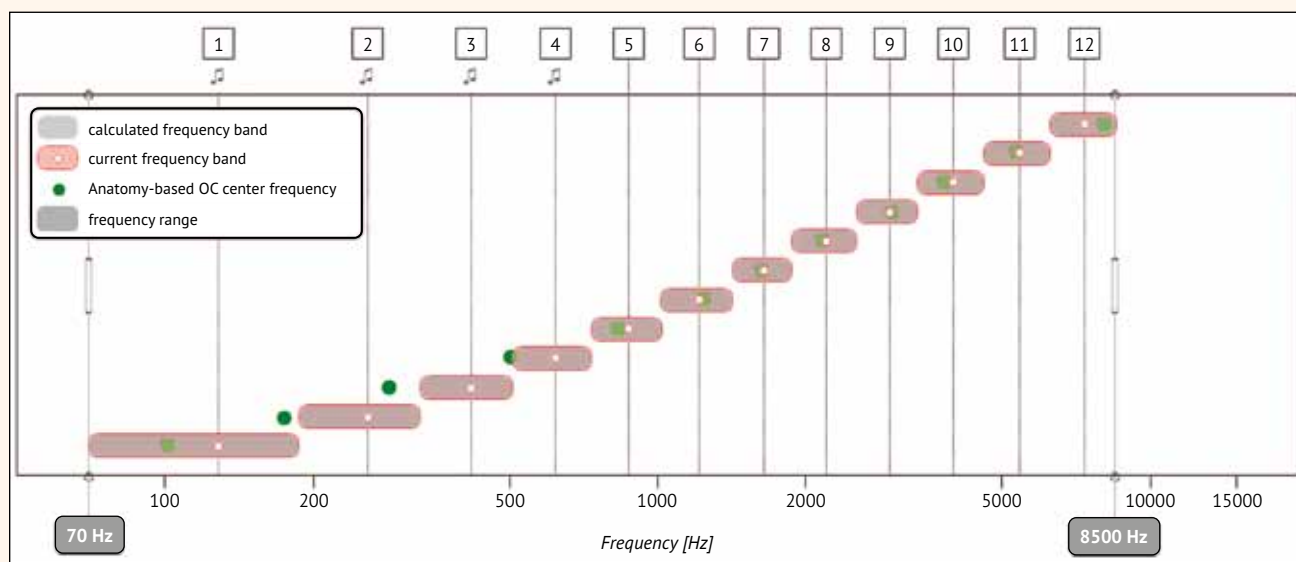
В программе *Maestro* формула перераспределения частотного диапазона работает таким образом, что

● **Рисунок 1.** Данные тонотопической организации улитки, полученные с применением синхротрона

● **Figure 1.** Data on the tonotopic organization of the cochlea obtained using the synchrotron



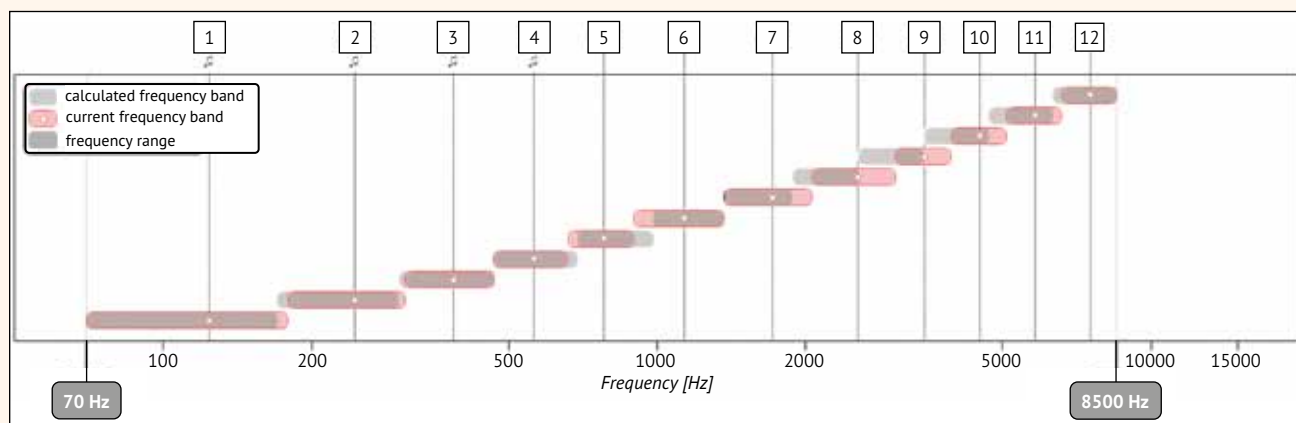
- **Рисунок 2.** Анатомическое распределение частот электродной решетки в программе Maestro
 ● **Figure 2.** Anatomical frequency distribution of the electrode array in the Maestro program



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lower frequency [Hz]	70	187	330	508	731	1016	1418	1870	2532	3373	4590	6246
Center frequency [Hz]	128	258	419	620	874	1217	1644	2201	2952	3982	5418	7373
Upper frequency [Hz]	187	330	508	731	1016	1418	1870	2532	3373	4590	6246	8500
Bandwidth [Hz]	117	143	178	223	285	402	452	662	841	1217	1656	2254

Примечание. Зеленая точка – анатомическое положение центральной частоты канала. Белая точка – реальное положение центральной частоты канала.

- **Рисунок 3.** Частотные фильтры до частотного перераспределения, после частотного перераспределения
 ● **Figure 3.** Frequency filters before frequency redistribution, after frequency redistribution



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Lower frequency [Hz]	70	179	309	467	660	899	1371	2058	3034	3925	5078	6570
Center frequency [Hz]	124	244	388	564	780	1135	1714	2546	3480	4502	5824	7535
Upper frequency [Hz]	179	309	467	660	899	1371	2058	3034	3925	5078	6570	8500
Bandwidth [Hz]	109	130	158	193	239	472	687	976	891	1153	1492	1930

Примечание. Частотные фильтры до частотного перераспределения – серый прямоугольник, после частотного перераспределения – прямоугольник в тонкой рамке.

- **Рисунок 4.** Длина улиткового канала ($p > 0,05$)
 ● **Figure 4.** The length of the cochlear canal ($p > 0.05$)



- **Рисунок 6.** Расположение первого (апикального) электрода в улитке ($p > 0,05$)
 ● **Figure 6.** Location of the first (apical) electrode in the cochlea ($p > 0.05$)



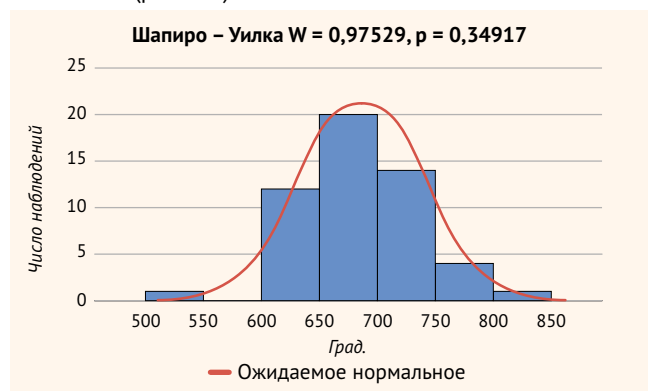
Частота нервных волокон рассчитывалась по формуле, применяемой в *Otoplan*, с учетом латерального расположения электродной решетки. Это положение электрода обеспечивает стимуляцию дендритов слухового нерва, подходящих к Кортиеву органу и обеспечивающих наиболее детальное восприятие электрической стимуляции.

По данным исследования, расположение 12-го (базального) электрода сильно вариативно. Средние значения составили $10793,21 \pm 2044,45$ Гц и находились в пределах от 5219,3 Гц – 111,3 град. от круглого окна до 14748,6 Гц – 4,7 град. от круглого окна (рис. 7).

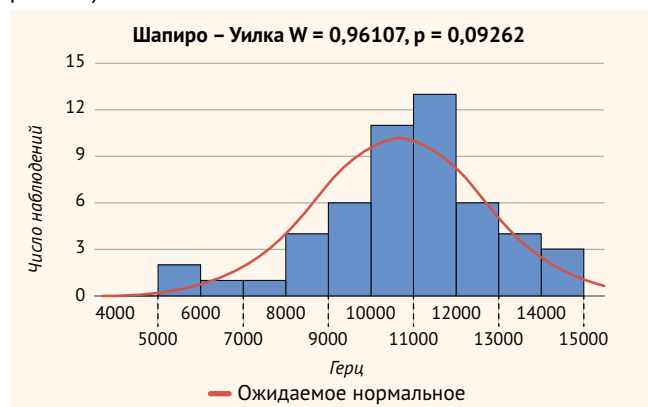
Аудиологические результаты. Аудиометрия и разборчивость речи определялись в группе постлингвальных испытуемых в возрасте от 14 до 59 лет, имеющих опыт ношения КИ. В эту группу вошли 13 человек. Всем испытуемым была выполнена аудиометрия, средние значения порогов (ПТА) составили $37,8 \pm 3,07$ и $37,3 \pm 3,99$ ($t = 0,77$, $p = 0,45$) после перераспределения частоты. Не было обнаружено статистической разницы до и после проведения аудиометрии (рис. 8).

Также всем испытуемым в данной группе было проведено тестирование разборчивости речи. Средние значения порогов составили $56,9 \pm 7,78$ и $51,9 \pm 5,5$ ($t = 2,66$, $p = 0,02$) после перераспределения частоты. Тестирование разборчивости речи показало статистически значимую разницу разборчивости до и после перераспределения частот (рис. 9).

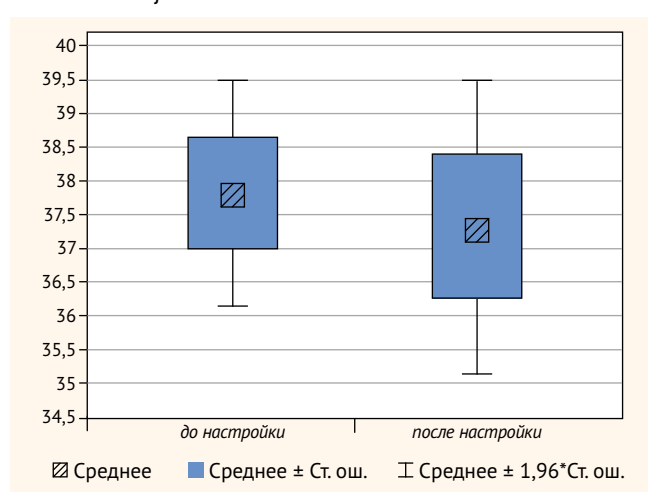
- **Рисунок 5.** Глубина введения электродной решетки в улитку ($p > 0,05$)
 ● **Figure 5.** Depth of insertion of the electrode array into the cochlea ($p > 0.05$)



- **Рисунок 7.** Расположение 12-го (базального) электрода в улитке ($p > 0,05$)
 ● **Figure 7.** Location of the 12th (basal) electrode in the cochlea ($p > 0.05$)



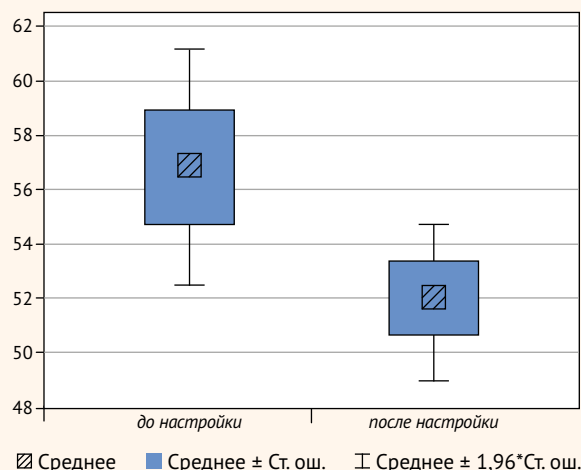
- **Рисунок 8.** Пороги тональной аудиометрии до и после анатомической настройки
 ● **Figure 8.** Pure tone audiometry thresholds before and after anatomical adjustment



После анатомической настройки 7 человек отметили субъективное улучшение звука в КИ. Не заметили субъективных различий 4 человека и 2 испытуемых отметили ухудшение качества звука (неприятно непривычное звучание), которое на следующий день прошло.

● **Рисунок 9.** Разборчивость речи до и после анатомической настройки

● **Figure 9.** Speech intelligibility before and after anatomical adjustment



ВЫВОДЫ

Появился новый инструмент, позволяющий оптимизировать предоперационную диагностику при проведении кохлеарной имплантации, выбор электрода и планирование операции КИ. Также этот метод применим в послеоперационной реабилитации в том числе для анатомической настройки процессора КИ. Специальное программное обеспечение позволяет с высокой точностью проводить диагностику состояния внутреннего уха с использованием компьютерной томографии. Эти технологии позволяют значительно улучшить качество реабилитации и обеспечить индивидуальный подход к настройке процессоров после кохлеарной имплантации. При анатомической настройке достигается точное соответствие между центральной частотой каждого электродного канала и частотами нервных тканей расположенных в зоне электродной решетки.

Поступила / Received 13.03.2023

Поступила после рецензирования / Revised 31.03.2023

Принята в печать / Accepted 05.04.2023

Список литературы / References

- Кузовков В.Е., Сугарова С.Б., Лиленко А.С., Преображенская Ю.С., Каляпин Д.Д. Хирургический этап кохлеарной имплантации у детей с врожденной синдромальной глухотой. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2020;26(4):30–37. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44491193>. Kuzovkov V., Sugarova S., Lilenko A., Preobrazhenskaya Y., Kaliapin D. Cochlear implantation surgical stage in children with congenital syndromic deafness. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2020;26(4):30–37. (In Russ.) Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44491193>.
- Милешина Н.А., Федосеев В.И., Володькина В.В. Особенности ведения пациентов после кохлеарной имплантации с последствиями травм височно-теменной области. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2021;27(3):77–84. <https://doi.org/10.33848/folior123103825-2021-27-3-77-84>. Milesheina N.A., Fedoseev V.I., Volodkina V.V. Peculiarities of management of patients after cochlear implantation with the consequences of injuries of the temporo-parietal region. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2021;27(3):77–84. (In Russ.) <https://doi.org/10.33848/folior123103825-2021-27-3-77-84>.
- Левин С.В., Кузовков В.Е., Левина Е.А., Шапорова А.В., Сугарова С.Б. Настройка процессоров кохлеарного импланта с учетом индивидуальной анатомии улитки. В: Янов Ю.К., Рязанцев С.В. (ред.). *Материалы XX съезда оториноларингологов России. Москва, 6–9 сентября 2021 г.* СПб.: Полифорум Групп; 2021. С. 222–223. Режим доступа: https://otolar-centre.ru/images/pdf/Abstracts_XX_Congress_Otorhinolaryngologists_2021.pdf. Levin S.V., Kuzovkov V.E., Levina E.A., Shapорова A.V., Sugarova S.B. Cochlear implant fitting according to the individual anatomical peculiarities. In: Yanov Yu.K., Ryazantsev S.V. (eds.). *Materials XX congress otorhinolaryngologists Russia. Moscow, September 6–9, 2021*. St Petersburg: Poliforum Grupp; 2021, pp. 222–223. (In Russ.) Available at: https://otolar-centre.ru/images/pdf/Abstracts_XX_Congress_Otorhinolaryngologists_2021.pdf.
- Кузовков В.Е., Чернушевич И.И., Сугарова С.Б., Лиленко А.С., Каляпин Д.Д., Луппов Д.С. Алгоритм диагностического обследования и хирургического этапа кохлеарной имплантации у пациентов с различной этиологией врожденной глухоты. *Российская оториноларингология*. 2022;21(2):45–50. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-2-45-50>. Kuzovkov V.E., Chernushevich I.I., Sugarova S.B., Lilenko A.S., Kaliapin D.D., Luppov D.S. Algorithm of diagnostics and surgery stage of cochlear implantation in patients with various congenital deafness etiology. *Rossiiskaya Otorinolaringologiya*. 2022;21(2):45–50. (In Russ.) <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2022-2-45-50>.
- Hardy M. The length of the organ of corti in man. *Am J Anat*. 1938;62:291–311. <https://doi.org/10.1002/aja.1000620204>.
- Guild S. A graphic reconstruction method for the study of the organ of corti. *Anat Rec*. 1921;22:140–157. <https://doi.org/10.1002/ar.1090220205>.
- Schuknecht H. Techniques for study of cochlear function and pathology in experimental animals: development of the anatomical frequency scale for the Cat. *Arch Otolaryngol*. 1953;58(4):377–397. <https://doi.org/10.1001/archoto.1953.00710040399001>.
- Takagi A., Sando I. Computer-aided three-dimensional reconstruction: a method of measuring temporal bone structures including the length of the cochlea. *Ann Otol Rhinol Laryngol*. 1989;98(7 Pt 1):515–522. <https://doi.org/10.1177/000348948909800705>.
- Ketten D., Skinner M., Wang G., Vannier M., Gates G., Neely J. In vivo measures of cochlear length and insertion depth of nucleus cochlear implant electrode arrays. *Ann Oto Rhinol Laryngol*. 1998;175:1–16. Available at: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/9826942/>.
- Escudé B., James C., Deguine O., Cochard N., Eter E., Fraysse B. The size of the cochlea and predictions of insertion depth angles for cochlear implant electrodes. *Audiol Neurotol Suppl*. 2006;(1):27–33. <https://doi.org/10.1159/000095611>.
- Alexiades G., Dhanasingh A., Jolly C. Method to estimate the complete and two-turn cochlear duct length. *Otol Neurotol*. 2015;36(5):904–907. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000000620>.
- Canfarotta M., Dillon M., Buss E., Pillsbury H., Brown K., O'Connell B. Validating a new tablet-based tool in the determination of cochlear implant angular insertion depth. *Otol Neurotol*. 2019;40(8):1006–1010. <https://doi.org/10.1097/MAO.0000000000002296>.
- Кац Л.К., Митрофанова Т.В. Некоторые аспекты морфометрии внутреннего уха человека. *Forcipe*. 2022;5(3):33–44. Режим доступа: <https://ojs3.gpmu.org/index.php/forcipe/article/view/5484>. Kats L.K., Mitrofanova T.V. Some aspects of morphometry of the human inner ear. *Forcipe*. 2022;5(3):33–44. (In Russ.) Available at: <https://ojs3.gpmu.org/index.php/forcipe/article/view/5484>.
- Asadi H., Mohamed S., Lim C.P., Nahavandi S., Nativaiko E. Semicircular canal modeling in human perception. *Rev Neurosci*. 2017;28(5):537–549. <https://doi.org/10.1515/revneuro-2016-0058>.
- Wüfel W., Lanfermann H., Lenarz T., Majdani O. Cochlear length determination using cone beam computed tomography in a clinical setting. *Hear Res*. 2014;316:65–72. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2014.07.013>.
- Verbist B.M., Ferrarini L., Briare JJ., Zarowski A., Admiraal-Behloul F., Olofsen H. et al. Anatomic considerations of cochlear morphology and its implications for insertion trauma in cochlear implant surgery. *Otol Neurotol*. 2009;30(4):471–477. <https://doi.org/10.1097/MAO.0b013e3181a32c0d>.
- Levin S.V., Kuzovkov V.E., Levina E.A., Pudov N.V. Rehabilitation of patients with a cochlear implant using artificial intelligence algorithms. *Journal of Hearing Science*. 2022;12(1):183–184. Available at: <https://elibrary.ru/ossatt7ysclid=lgp4jh9hwt75362485>.
- Svirsky M.A., Talavage T.M., Sinha S., Neuburger H., Azadpour M. Gradual adaptation to auditory frequency mismatch. *Hear Res*. 2015;322:163–170. <https://doi.org/10.1016/j.heares.2014.10.008>.
- Янов Ю.К., Левин С.В., Вахрушев С.Г., Наркевич А.Н., Кузовков В.Е., Россиев Д.А. и др. Реабилитация глухих детей после кохлеарной имплантации с применением интеллектуальной нейросетевой системы. *Медицинский академический журнал*. 2016;16(1):90–96. <https://doi.org/10.17816/MAJ16190-96>. Yanov Yu.K., Levin S.V., Vachrushev S.G., Narkevich A.N., Kuzovkov V.E., Rossiev D.A. et al. Rehabilitation of deaf children after cochlear implantation using an intelligent neural net system. *Medical Academic Journal*. 2016;16(1):90–96. (In Russ.) <https://doi.org/10.17816/MAJ16190-96>.
- Li H., Helpard L., Ekeroot J., Rohani S.A., Zhu N., Rask-Andersen H., Ladak H.M., Agrawal S. Three-dimensional tonotopic mapping of the human cochlea based on synchrotron radiation phase-contrast imaging. *Sci Rep*. 2021;11:4437. Available at: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-83225-w>.

Вклад авторов:

Концепция статьи – Кузовков В.Е.

Концепция и дизайн исследования – Левин С.В.

Написание текста – Левин С.В., Левина Е.А., Шукурян М.А., Воронов В.А., Пашкова А.Е.

Сбор и обработка материала – Левин С.В., Левина Е.А., Шукурян М.А.

Обзор литературы – Пашкова А.Е.

Перевод на английский язык – Левина Е.А., Воронов В.А.

Анализ материала – Левин С.В., Лиленко А.С.

Статистическая обработка – Левин С.В.

Редактирование – Кузовков В.Е., Лиленко А.С.

Утверждение окончательного варианта статьи – Кузовков В.Е.

Contribution of authors:

Concept of the article – Vladislav E. Kuzovkov

Study concept and design – Sergey V. Levin

Text development – Sergey V. Levin, Elena A. Levina, Mikayel Shukuryan, Victor A. Voronov, Aleksandra E. Pashkova

Collection and processing of material – Sergey V. Levin, Elena A. Levina, Mikayel Shukuryan

Literature review – Aleksandra E. Pashkova

Translation into English – Elena A. Levina, Victor A. Voronov

Material analysis – Sergey V. Levin, Andrey S. Lilenko

Statistical processing – Sergey V. Levin

Editing – Vladislav E. Kuzovkov, Andrey S. Lilenko

Approval of the final version of the article – Vladislav E. Kuzovkov

Информация об авторах:

Левин Сергей Владимирович, к.м.н., старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи; 190013, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бронницкая, д. 9; Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова; 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41; <https://orcid.org/0000-0001-9770-7739>; megalor@gmail.com

Лиленко Андрей Сергеевич, к.м.н., старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи; 190013, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бронницкая, д. 9; <https://orcid.org/0000-0003-1641-506X>; aslilenko@gmail.com

Левина Елена Алексеевна, к.м.н., старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи; 190013, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бронницкая, д. 9; <https://orcid.org/0000-0003-0285-6526>; xramoval@gmail.com

Кузовков Владислав Евгеньевич, д.м.н., заместитель директора по инновационной деятельности, Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт уха, горла, носа и речи; 190013, Россия, Санкт-Петербург, ул. Бронницкая, д. 9; <https://orcid.org/0000-0002-2581-4006>; v_kuzovkov@mail.ru

Шукурян Михаил, врач-оториноларинголог, аспирант кафедры, Ереванский государственный медицинский университет имени Мхитара Герацци; 0025, Армения, Ереван, ул. Корьюна, д. 2; <https://orcid.org/0009-0001-9884-4070>; arturshukuryan@gmail.com

Пашкова Александра Елефтерьевна, научный сотрудник отдела оториноларингологии и сурдологии, Российский научный центр имени акад. Б.В. Петровского; 119991, Россия, Москва, Абрикосовский пер., д. 2; <https://orcid.org/0000-0002-2404-8477>; aepashkova@yandex.ru

Воронов Виктор Алексеевич, к.м.н., доцент, Северо-Западный государственный медицинский университет имени И.И. Мечникова; 191015, Россия, Санкт-Петербург, ул. Кирочная, д. 41; <https://orcid.org/0000-0002-6755-7618>; voronov.ent@yandex.ru

Information about the authors:

Sergey V. Levin, Cand. Sci. (Med.), Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech; 9, Bronnitskaya St., St Petersburg, 190013, Russia; North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 41, Kirochnaya St., St Petersburg, 191015, Russia; <https://orcid.org/0000-0001-9770-7739>; megalor@gmail.com

Andrey S. Lilenko, Cand. Sci. (Med.), Senior Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech; 9, Bronnitskaya St., St Petersburg, 190013, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1641-506X>; aslilenko@gmail.com

Elena A. Levina, Cand. Sci. (Med.), Researcher, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech; 9, Bronnitskaya St., St Petersburg, 190013, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-0285-6526>; xramoval@gmail.com

Vladislav E. Kuzovkov, Dr. Sci. (Med.), Deputy Director for Innovation, Saint Petersburg Research Institute of Ear, Throat, Nose and Speech; 9, Bronnitskaya St., St Petersburg, 190013, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2581-4006>; v_kuzovkov@mail.ru

Mikayel Shukuryan, Otorhinolaryngologist, Postgraduate Student of the Department, Yerevan State Medical University after Mkhitar Heratsi; 2, Koryun St., Yerevan, 0025, Armenia; <https://orcid.org/0009-0001-9884-4070>; arturshukuryan@gmail.com

Aleksandra E. Pashkova, Research Associate, Petrovsky National Research Centre of Surgery; 2, Abricosovskii Lane, Moscow, 119991, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-2404-8477>; aepashkova@yandex.ru

Victor A. Voronov, Cand. Sci. (Med.), Associate Professor, North-Western State Medical University named after I.I. Mechnikov; 41, Kirochnaya St., St Petersburg, 191015, Russia; <https://orcid.org/0000-0002-6755-7618>; voronov.ent@yandex.ru