https://doi.org/10.17116/otorino201782677-80

Современный взгляд на методы лучевой диагностики, применяемые для определения положения электродной решетки при кохлеарной имплантации

Д.м.н. Х.М. ДИАБ*, д.м.н., проф. А.Ю. ВАСИЛЬЕВ, м.н.с. В.Н. СОКОЛОВА

Научно-клинический центр оториноларингологии Федерального медико-биологического агентства (дир. — д.м.н., проф. Н.А. Дайхес), Москва, Россия, 123182

Цель — обзор литературы, посвященной методам лучевой диагностики, применяемым для оценки положения электродной решетки при кохлеарной имплантации: классическим рентгенологическим методам и новейшим разработкам. Интраоперационный контроль обеспечивает своевременное выявление возможных осложнений и должен соответствовать условиям безопасности, удобства использования и качества полученных снимков. Интраоперационный контроль может осуществляться при помощи флюороскопии, портативных компьютерных сканнеров и систем навигации. Послеоперационный контроль осуществляется с использованием трансорбитальной рентгенографии, мультисрезовой компьютерной томографии, конусно-лучевой компьютерной томографии, томосинтеза. Применяемые методы имеют свои преимущества и недостатки. Единый систематизированный подход и критерии оценки изображений пока не выработаны.

Ключевые слова: *кохлеарная имплантация, мультисрезовая компьютерная томография, конусно-лучевая компьютерная томография, томосинтез.*

The modern view of the radiodiagnostic methods applied for determining the position of the electrode array in cochlear implantation surgery

KH.M. DIAB, A.YU. VASILYEV, V.N. SOKOLOVA

Research and Clinical Centre of Otorhinolaryngology, Russian Federal Medico-Biological Agency, Moscow, Russia, 123182

The objective of the present work was to overview the currently available literature publications dealing with the radiodiagnostic techniques applied to evaluate the position of the electrode array used for the purpose of cochlear implantation surgery including both the conventional methods and the recently proposed approaches. It is shown that the intraoperative control guarantees the timely identification of the possible complications and should meet both the safety criteria and the requirements for obtaining high-quality images and intraoperative usability of the surgical instruments being employed. Moreover, the intraoperative monitoring can be exercised under control of fluoroscopy as well as with the use of the portable computed radiography scanners and navigation systems. The postoperative monitoring is carried out with the use of transorbital X ray visualization, multi-slice computed tomography, cone beam computed tomography, and digital tomosynthesis. Each of the listed methods has specific advantages and disadvantages, but there is yet neither a universally recognized systematic approach to the assessment of their effectiveness nor the generally acceptable criteria for the evaluation of the image quality.

Keywords: *cochlear implantation, multi-slice computed tomography, cone beam computed tomography, digital tomosynthesis.*

Принятые сокращения:
МСКТ — мультисрезовая компьютерная томография
КЛКТ — конусно-лучевая компьютерная томография
МРТ — магнитно-резонансная томография
ПК — персональный компьютер

На хирургическом этапе кохлеарной имплантации решающее значение имеет правильное размещение комплекта электродов в спиральном канале улитки. Несмотря на усовершенствование хирургической техники, сохраняется необходимость визуализации местоположения электродной решетки интраоперационно, особенно в случаях аномалий анатомических структур кохлеовестибулярной системы, врожденной или приобретенной. Большинством авторов поддерживается точка зрения, согласно которой кохлеарная имплантация является хирургическим вмешательством, имеющим низкий риск осложнений, средние показатели которых редко превышают 11,5% [1, 2]. Неправильное размещение электродной решетки встречается достаточно редко; как правило, это единичные случаи. Последствиями данного осложнения являются не только невозможность обеспечить восстановление слуховой функции, необходимость ревизионной операции и в некоторых случаях реимплантации, но и вероятность травмы смежных с улиткой структур. Вероятность неправильного расположения электродной решетки определяет необходимость интраоперационного и/или послеоперационного рентгенологического контроля. Функционирование кохлеарного импланта интраоперационно оценивают по результатам нейрофизиологических тестов — регистрации рефлекса

© Коллектив авторов, 2017

*e-mail: hasandiab@mail.ru; ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5337-3239

стапедиальной мышцы и телеметрии нервного ответа слухового нерва. Электрофизиологические и рентгенологические интраоперационные тесты имеют различное значение. Телеметрия нервного ответа помогает оценить функциональную состоятельность электродной решетки. Несмотря на то что телеметрия нервного ответа может быть полезна для хирурга, косвенно определяя положение электродной решетки в спиральном канале улитки, этот метод может давать ложные положительные результаты, например при расположении электродной решетки в преддверии костного лабиринта [3]. Методы визуализации помогают определить местоположение электродной решетки, глубину введения, близость к модиолосу, наличие изгибов или перегибов электродной решетки. В мировой практике существуют различные методики, с помощью которых возможно визуализировать структуры височной кости после проведенной имплантации. В литературе варьируют данные о целесообразности применения разных методик рентгенологического обследования пациентов после кохлеарной имплантации для определения правильности расположения электродной решетки в спиральном канале улитки.

Цель работы — анализ отечественной и зарубежной литературы, посвященной различным методам лучевого обследования, позволяющим визуализировать электродную решетку кохлеарного импланта в спиральном канале улитки.

До недавнего времени контроль положения электродной решетки осуществлялся при помощи традиционного рентгенологического исследования. Сложность строения височной кости не позволяет изучать все отделы уха на одном снимке. Особенностью трактовки анатомических деталей является наличие эффекта суммации теней, когда структуры проекционно накладываются друг на друга. Снимок в укладке по Стенверсу применялся для изучения структуры пирамиды височной кости и внутреннего уха [4]. Ранее этот метод широко применялся, но в настоящее время методика имеет историческое значение и при кохлеарной имплантации фактически не используется. Для оценки строения пирамиды височной кости и положения электродной решетки может быть использована трансорбитальная проекция, которая позволяет при одной экспозиции получить снимки обеих улиток, что имеет преимущества при бинауральной кохлеарной имплантации и является самым используемым методом в послеоперационном периоде, особенно в педиатрии [5, 6]. Тем не менее данный метод не позволяет определить точное положение электродной решетки относительно спиральной связки и базилярной мембраны. Проведение данного исследования позволяет оценить расположение электрода только после операции, что делает необходимым проведение повторного вмешательства при обнаружении осложнения в виде неправильного расположения электродной решетки. В 2000 г. J. Xu и соавт. [7] из Мельбурнского университета на основе данных КТ, реконструктивных изображений и знаний анатомии разработали рентгеновскую проекцию, которая получила название «Cochlear view», для оценки интракохлеарного положения электродной решетки. Электродная решетка должна быть расположена в базальном и частично среднем завитке улитки, закручена вокруг модиолуса, ее визуализация может быть достигнута, если рентгеновский луч направлен на улитку параллельно модиолусу. Данная проекция позволяет не только визуализировать электродную решетку и отдельные электроды интракохлеарно, но и провести расчеты, например глубину и угол введения. Данный рентгенологический метод доступен и обеспечивает низкую радиационную нагрузку. Его осуществление возможно только на послеоперационном этапе и не лишено сложностей в техническом исполнении правильности укладки. В целом традиционная рентгенография имеет определенные недостатки. Многие авторы показывают невысокую диагностическую эффективность такого исследования, невозможность визуализации тонких структур височной кости, а также неудобство в выполнении снимков, связанное с необходимостью транспортировки больного. По данным нескольких ретроспективных исследований, получаемые интраоперационные данные не влияли на хирургическую тактику в каждом конкретном случае, но позволили выявить группу для дальнейшего наблюдения. Многим пациентам потребовалось многократное выполнение интраоперационных рентгенограмм из-за плохой техники радиологического исследования (например, недостаточное проникновение лучей, ограниченная подвижность пациента в стерильных условиях во время вмешательства), что приводило к неполной визуализации электрода на первичной рентгенограмме и увеличивало экспозиционную дозу. Учитывая стоимость каждого обследования, радиационную нагрузку, которую получает пациент, возможность ошибочных данных о положении электродов, вопрос о необходимости проведения рентгенографии в проекции по Стенверсу в условиях операционной остается открытым. Интраоперационная рентгенография должна использоваться в необычных или редких случаях [8, 9]. Напротив, в ретроспективном исследовании M. Cosetti и соавт. [10], включающем обследование 277 пациентов, всем пациентам интраоперационно были проведены электрофизиологические тесты и рентгенография в проекции по Стенверсу. Согласно полученным данным, только результаты рентгенологического исследования повлияли на хирургическую тактику, выявив в 1,8% случаев неправильно размещенную электродную решетку интраоперационно. Несмотря на совершенствование методики кохлеарной имплантации, непосредственно хирургического вмешательства, а также самого устройства, в литературе встречаются сообщения о неправильном положении электродной решетки. При помощи рентгенографии может быть выявлено смещение электродной решетки интраоперационно, правильное положение может быть достигнуто в ходе одного оперативного вмешательства, а, следовательно, рутинное интраоперационное рентгенологическое исследование может быть полезным [11]. Поиск и разработка более современных методов визуализации продолжаются до сегодняшнего дня.

Флюороскопический метод, в том числе с применением микрофокусных технологий, широко применяется для установления положения электродной решетки в экспериментальных исследованиях для разработки более совершенных вариантов атравматичных электродных решеток [12]. Также в литературе встречаются сообщения о пользе применения интраоперационной флюороскопии при кохлеарной имплантации в случаях наличия аномалий развития внутреннего уха [13].

Имеются единичные сообщения о применении томосинтеза как способа лучевой диагностики, позволяющего безопасно и экономично оценить расположение электродной решетки в улитке в послеоперационном периоде у пациентов после кохлеарной имплантации. Данный метод имеет низкую дозу облучения, что делает возможным ши-

рокое его использование в педиатрической практике, а также высокое пространственное разрешение, позволяет получить множество срезов с одного сканирования и уменьшить количество артефактов от металлических частей импланта. При реконструкции получаемых изображений появляется возможность визуализировать структуры лабиринта височной кости, оценить положение электродной решетки. В настоящий момент данных об интраоперационном использовании метода томосинтеза при кохлеарной имплантации в литературе нет [14, 15].

Высокой разрешающей способностью в оценке структур височной кости обладает метод мультисрезовая компьютерная томография (МСКТ). В процессе технического прогресса этот метод совершенствовался, происходило уменьшение толщины среза, уменьшение времени исследования, снижение радиационной нагрузки, появление возможности построения реконструкций, использование различных проекций. МСКТ позволяет максимально детально изучить строение внутренних структур височной кости как в норме, так и при патологии [16]. Особое значение в литературе придают патологическим изменениям после перенесенного бактериального менингита, которые могут сопровождаться оссификацией улитки. Метод МСКТ при этом виде патологии показал высокую диагностическую эффективность. Компьютерная томография стала золотым стандартом исследования перед проведением кохлеарной имплантации. МСКТ применяется при оценке результатов кохлеарной имплантации при аномалиях внутреннего уха, для определения расположения электродной решетки. При использовании МСКТ для послеоперационного контроля имеется ряд ограничений, таких как наличие артефактов от металлических частей импланта, высокая доза лучевой нагрузки [17, 18].

Анатомию улитки человека на клеточном уровне экспериментально позволяет оценить рентгеновская микротомография. Уровень разрешения метода позволяет оценивать сосуды вплоть до капилляров, ход нервных волокон, а также строение костной спиральной пластинки улитки, положение электродной решетки кохлеарного импланта по отношению к модиолусу. Из-за высокой дозы облучения данный метод практически не используется в клинике, наибольшее применение он нашел в биомедицинских исследованиях и при разработке новых вариантов электродной решетки [19, 20].

Новый высокотехнологичный метод лучевого исследования — конусно-лучевая компьютерная томография (КЛКТ) — весьма перспективен как для обследования пациента перед кохлеарной имплантацией, так и для оценки положения электродной решетки на интраоперационном или послеоперационном этапах. Принципиальное отличие КЛКТ от МСКТ заключается в форме рентгеновского луча. При КЛКТ применяется тонкий прерывистый конический пучок рентгеновского излучения, что позволяет за один оборот аппарата отсканировать определенный анатомический объем. Программное обеспечение воспроизводит первичное объемное изображение на экране монитора, что обеспечивает возможность быстрого сканирования. Коническая форма луча в подобных томографах приводит к значительному уменьшению лучевой нагрузки [21]. В экспериментальных исследованиях продемонстрированы возможности КЛКТ в определении анатомических ориентиров улитки, положения электродной решетки в барабанной лестнице и возможности оптимальной ее визуализации. По получаемым данным метод КЛКТ не уступает, а по некоторым параметрам и превосходит МСКТ. Учитывая снижение дозы лучевой нагрузки при КЛКТ и наличие минимальных артефактов от металлических компонентов электродной решетки, данный способ визуализации имеет большой потенциал для клинического применения при кохлеарной имплантации. Тем не менее в отечественной литературе отсутствуют работы, отражающие роль КЛКТ при кохлеарной имплантации. Между тем в зарубежных клиниках КЛКТ является основным методом диагностики в послеоперационном контроле установки импланта [22—25]. В последние годы широко применялись рентгеновские системы типа С-дуги, которые обладают малыми размерами, позволяют провести обследование и оценить расположение электродной решетки интраоперационно. Данные методики могут осуществлять работу в режиме рентгеноскопии, при этом подбирается наиболее оптимальная проекция для возможности определения положения электродной решетки, так и рентгенографии и построении реконструкций в дальнейшем. Относительно новым методом получения интраоперационных изображений является использование портативных аппаратов с плоскопанельными детекторами типа С-дуга, которые обеспечивают послойные снимки. По полученным экспериментальным данным этот способ позволяет визуализировать структуры височной кости с высокой контрастностью и пространственным разрешением, минимизировать количество артефактов от металлических составляющих электродной решетки, детально изучить анатомию улитки. Данный метод имеет меньшую радиационную нагрузку — около 50% от дозы, получаемой при МСКТ, и предоставляет больше детальной информации для исследователей [26, 27]. Аппараты с плоскопанельными детекторами не приобрели широкого применения, так как алгоритмы съемки и реконструкции изображений пока находятся на стадии разработки.

Применение навигации основано на использовании различных методов визуализации. Навигационные методики обычно используют МСКТ или МРТ, в последнее время появляются разработки для использования при кохлеарной имплантации КЛКТ, что позволяет максимально атравматично провести установку электродной решетки, оценить ее местоположение и имеет особое значение при наличии пороков внутреннего уха [28].

Заключение

Методы лучевой диагностики, применяемые на сегодняшний день для оценки положения электродной решетки при кохлеарной имплантации, включают как классические рентгенологические методики, так и возможность визуализации с помощью новейших разработок. Они позволяют провести контроль хирургического вмешательства, уменьшить количество осложнений и повторных операций, связанных с неправильно установленной электродной решеткой. Тем не менее единого систематизированного подхода и критериев оценки получаемых изображений при данном виде вмешательства пока нет. Актуальным остается вопрос о разработке отечественного аппарата с минимальной лучевой нагрузкой, хорошей разрешающей способностью, позволяющей оценить положение электродной решетки интраоперационно.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Богомильский М.Р., Иваничкин С.А. Слухулучшающие операции у детей: современное состояние проблемы. Ч. II. Оссикулопластика, стапедопластика, шунтирование барабанной полости, кохлеарная имплантация. *Вестник оториноларингологии*. 2012;6:109-113. [Bogomil'skiy MR, Ivanichkin SA. Surgical operations for the improvement of hearing in the children: the current state of the problem. P. II. Ossiculoplasty, stapedoplasty, shunting of the tympanic cavity, cochlear implantation. *Vestnik otorinolaringologii*. 2012;6:109-113. (In Russ.)].
2. Диаб Х.М., Дайхес Н.А., Юсифов К.Д., Пащинина О.А., Кондратчиков Д.С., Умаров П.У., Кузнецов А.О. Осложнения кохлеарной имплантации. *Анналы хирургии*. 2015;4:5-8. [Diab KhM, Daikhes NA, Yusifov KD, Pashchinina OA, Kondratchikov DS, Umarov PU, Kuznetsov AO. Complications of cochlear implantat surgery. *Annaly hirurgii*. 2015;4:5-8. (In Russ.)].
3. Viccaro M, Covelli E, De Seta E, Balsamo G, Filipo R. The importance of intra-operative imaging during cochlear implant surgery. *Cochlear Implants International*. 2009;10(4):198-102. https://doi.org/10.1179/cim.2009.10.4.198
4. Линдебратен Л.Д. *Методика чтения рентгеновских снимков*. Л.: Медицина; 1960. [Lindebraten LD. *Metodika chtenija rentgenovskih snimkov*. L.: Medicina; 1960. (In Russ.)].
5. Harris R, Pepper Ch, Dennis L, Rich Ph, Selvadurai D. A practical, single-view alternative to Stenver's for plain radiographic unilateral and bilateral post-cochlear implant position check. *Cochlear Implants International*. 2011;12(1):53-56. https://doi.org/10.1179/146701010x486408
6. Molezini FD, Meira Junior SG, Neto DL, Costa Filho OA. Cochlear implant radiography: technique adapted into a portable apparatus. *Brazilian Journal of Otorhinolaryngology*. 2012;78(1):31-36. https://doi.org/10.1590/s1808-86942012000100005
7. Xu J, Xu S, Cohen L, Clark G. Cochlear view: postoperative radiography for cochlear implantation. *American Journal of Otolaryngology*. 2000;21(1):49-56. https://doi.org/10.1016/s0196-0709(00)80075-7
8. Copeland BJ, Pillsbury HC, Buchman CA. Prospective Evaluation of Intraoperative Cochlear Implant Radiographs. *Otology & Neurotology*. 2004;25(3):295-297. https://doi.org/10.1097/00129492-200405000-00016
9. Gnagi SH, Baker TR, Pollei TR, Barrs DM. Analysis of Intraoperative Radiographic Electrode Placement During Cochlear Implantation. *Otology & Neurotology*. 2015;36(6):1045-1047. https://doi.org/10.1097/mao.0000000000000761
10. Cosetti MK, Troob SH, Latzman JM, Shapiro WH, Roland JT, Waltzman SB. An evidence-based algorithm for intraoperative monitoring during cochlear implantation. *Otology & Neurotology*. 2012;33(2)169-176. https://doi.org/10.1097/mao.0b013e3182423175
11. Hassan AM, Patel R, Redleaf M. Intra-operative skull X-ray for misdirection of the cochlear implant array into the vestibular labyrinth. *The Journal of Laryngology & Otology*. 2015;129(09):92-927. https://doi.org/10.1017/s0022215115001966
12. Xu J, Briggs R, Tyconcinski M, Newbold C, Risi F, Cowan R. Seeing electrode movement in the cochlea Micro-focus fluoroscopy — A great tool for electrode development. *Cochlear Implants International*. 2009;10(supl 1):115-119. https://doi.org/10.1179/cim.2009.10.supplement-1.115
13. Perez R, Sichel JY, Roland JTh. Intra-operative fluoroscopy assisted cochlear implantation in children with inner ear malformations. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*. 2011;75:58-59. https://doi.org/10.1016/s0165-5876(11)70302-0
14. Боголепова Н.Н., Ростовцев М.В. Опыт использования томосинтеза в детском лечебном учреждении. *Медицинская визуализация*. 2010;2:67-72. [Bogolepova NN, Rostovtsev MV. Experience of Using Tomosynthesis in the Children's Institution. *Medicinskaja vizualizacija*. 2010;2:67-72. (In Russ.)].
15. Hirano H. Usage experience in the otolaryngological field (cochlear implants). *Innervision*. 2013;12(28):1-3.
16. Ильин С.Н. *Диагностические возможности компьютерной томографии структур внутреннего уха при операции кохлеарной имплантации:* Дис. ... канд. мед. наук. СПб. 2006. [Il'in SN. *Diagnosticheskie vozmozhnosti komp'juternoj tomografii struktur vnutrennego uha pri operacii kohlearnoj implantacii:* Dis. ... kand. med. nauk. SPb. 2006. (In Russ.)].
17. Verbist BM, Frijns JHM, Geleijns J, van Buchem MA. Multisection CT as a Valuable Tool in the Postoperative Assessment of Cochlear Implant Patients. *American Journal of Neuroradiology*. 2005;26:424-429.
18. Verbist BM, Joemai RMS, Teeuwisse WM, Veldkamp WJH, Geleijns J, Frijns JHM. Evaluation of 4 Multisection CT Systems in Postoperative Imaging of a Cochlear Implant: A Human Cadaver and Phantom Study. *American Journal of Neuroradiology*. 2008;29(7):1382-1388. https://doi.org/10.3174/ajnr.a1108
19. Postnov A, Zarowski A, De Clerck N, Vanpoucke F, Offeciers FE, Van Dyck D, Peeters S. High resolution microCT scanning as an innovatory tool for evaluation of the surgical positioning of cochlear implant electrodes. *Acta Oto-Laryngologica*. 2006; 126(5):467-474. https://doi.org/10.1080/00016480500437377
20. Teymouri J, Hullar TE, Holden TA, Chole RA. Verification of Computed Tomographic Estimates of Cochlear Implant Array Position: A Micro-CT and Histological Analysis. *Otology & Neurotology*. 2011;32(6):980-986. https://doi.org/10.1097/mao.0b013e3182255915
21. Зубарева А.А., Чибисова М.А., Дударев А.Л., Шавгулидзе М.А. Возможности цифровой объемной томографии в оториноларингологии. *Лучевая диагностика и терапия*. 2011;4(2):105-118. [Zubareva AA, Chibisova MA, Dudarev AL, Shavgulidze MA. The possibilities of digital 3D tomography in otorhinolaringology. *Luchevaja diagnostika i terapija*. 2011;4(2):105-118. (In Russ.)].
22. Bartling SH, Gupta R, Torkos A, Dullin C, Eckhardt G, Lenarz T, Becker H, Stöver T. Flat-panel volume computed tomography for cochlear implant electrode array examination in isolated temporal bone specimens. *Otology & Neurotology*. 2006;27(4):491-498. https://doi.org/10.1097/01.mao.0000194816.15298.50
23. Arweiler-Harbeck D, Mönninghoff C, Greve J, Hoffmann T, Göricke S, Arnolds J, Theysohn N, Gollner U, Lang S, Forsting M, Schlamann. M. Imaging of Electrode Position after Cochlear Implantation with Flat Panel CT. ISRN *Otolaryngology*. 2012;1-5. https://doi.org/10.5402/2012/728205
24. Pearl MS, Roy A, Limb CJ. High-Resolution Secondary Reconstructions with the Use of Flat Panel CT in the Clinical Assessment of Patients with Cochlear Implants. *American Journal of Neuroradiology*. 2013;35(6):1202-1208. https://doi.org/10.3174/ajnr.a3814
25. Иванова И.В. Лучевая диагностика при кохлеарной имплантации: современное состояние проблемы и перспективы развития (обзор литературы). *Радиология — практика*. 2014;6:50-58. [Ivanova IV. Diagnostic Radiology in Cochlea Implant Surgery: Current Trends and Future Development (Literature Review). *Radiologija — praktika*. 2014;6:50-58. (In Russ.)].
26. Aschendorff A, Kubalek R, Turowski B, Zanella F, Hochmuth A, Schumacher M, Klenzner T, Laszig R. Quality control after cochlear implant surgery by means of rotational tomography. *Otology & Neurotology*. 2005;26(1):34-37. https://doi.org/10.1097/00129492-200501000-00007
27. Carelsen B, Grolman W, Tange R, Streekstra GJ, Van Kemenade P, Jansen RJ, Freling NJM, White M, Maat B, Fokkens WJ. Cochlear implant electrode array insertion monitoring with intra-operative 3D rotational X-ray. *Clinical Otolaryngology*. 2007; 32(1):46-50. https://doi.org/10.1111/j.1365-2273.2007.01319.x
28. Aschendorff A, Maier W, Jaekel K, Wesarg T, Arndt S, Laszig R, Voss P, Metzger M, Schulze D. Radiologically assisted navigation in cochlear implantation for X-linked deafness malformation. *Cochlear Implants International*. 2009;10(supl 1):14-18. https://doi.org/10.1179/cim.2009.10.supplement-1.14

Поступила 09.03.17