

CZU: 611.831.81:616.28-008.14:004.8

DOI: <https://doi.org/10.52692/1857-0011.2025.3-83.46>

## PROGRESE ÎN TEHNOLOGIILE IMPLANTABILE UTILIZATE ÎN REABILITAREA AUDITIVĂ A PACIENŢILOR CU SURDITATE SEVERĂ ŞI PROFUNDĂ

Sergiu VETRICEAN, dr. hab. în şt. med., conf. universitar,  
Radu-Dorin LUNGU, student

IP Universitatea de Stat de Medicină şi Farmacie „Nicolae Testemiţanu”, Chişinău, Republica Moldova

e-mail: [lunguradudorin2002@gmail.com](mailto:lunguradudorin2002@gmail.com)

### Rezumat.

În surditatea severă sau profundă, aparatele auditive convenţionale devin ineficiente, fiind necesare soluţii implantabile avansate, precum implanturile cohleare, de trunchi cerebral, sistemele hibride electro-acustice şi implanturile ancorate osos. Inovaţiile - de la electrozi atraumatici şi procesoare cu algoritmi de inteligenţă artificială, la inserţie asistată robotic - au îmbunătăţit percepţia sonoră, rata de succes chirurgicală şi integrarea socială, conturând noi direcţii pentru reabilitarea auditivă personalizată şi integrarea rapidă a tehnologiilor emergente în practică.

**Cuvinte cheie:** implant cohlear, reabilitare auditivă, inteligenţă artificială.

**Summary. Advances in implantable technologies used in auditory rehabilitation of patients with severe and profound hearing loss.**

In cases of severe or profound hearing loss, conventional hearing aids become ineffective, requiring advanced implantable solutions such as cochlear implants, auditory brainstem implants, electro-acoustic hybrid systems, and bone-anchored hearing systems. Innovations - from atraumatic electrodes and sound processors with artificial intelligence algorithms to robot-assisted insertion - have improved sound perception, surgical success rates, and social integration, outlining new directions for personalized auditory rehabilitation and the rapid integration of emerging technologies into clinical practice.

**Keywords:** cochlear implant, auditory rehabilitation, artificial intelligence.

**Резюме. Достижения в области имплантируемых технологий, используемых для слуховой реабилитации пациентов с тяжёлой и глубокой тугоухостью.**

При тяжёлой или глубокой потере слуха традиционные слуховые аппараты становятся неэффективными, что требует применения передовых имплантируемых решений, таких как кохлеарные имплантаты, имплантаты ствола мозга, электро-акустические гибридные системы и костно-анкерированные слуховые системы. Инновации – от atraumatic электродов и звуковых процессоров с алгоритмами искусственного интеллекта до роботизированной помощи при имплантации – улучшили качество звукового восприятия, показатели хирургического успеха и социальную интеграцию, определяя новые направления персонализированной слуховой реабилитации и быстрой интеграции передовых технологий в клиническую практику.

**Ключевые слова:** кохлеарный имплант, слуховая реабилитация, искусственный интеллект.

### Introducere.

Surditatea severă şi profundă reprezintă o cauză majoră de dizabilitate auditivă, afectând dezvoltarea comunicării, integrarea socială şi calitatea vieţii [1, 3]. În ultimii ani, progresele în tehnologiile implantabile – precum implanturile cohleare, implanturile de trunchi cerebral, sistemele hibride electro-acustice şi implanturile ancorate osos - au revoluţionat opţiunile terapeutice, oferind pacienţilor rezultate auditive şi funcţionale semnificativ îmbunătăţite [5, 8].

Tehnicile chirurgicale minim invazive, procesarea digitală avansată şi integrarea cu dispozitive inteligente au permis adaptarea rapidă şi personalizarea reabilitării [10, 12]. Organizaţia

Mondială a Sănătăţii estimează că, în anul 2024, peste 430 de milioane de persoane trăiesc cu pierdere auditivă invalidantă, subliniind importanţa accesului la soluţii moderne de reabilitare [2].

### Scopul cercetării.

Analiza şi sintetiza progreselor recente în tehnologiile implantabile utilizate în reabilitarea auditivă a pacienţilor cu surditate severă şi profundă, evidenţiind tipurile de dispozitive, indicaţiile, avantajele, limitările şi perspectivele lor de dezvoltare.

### Materiale şi metode.

A fost realizată o revizuire integrativă a literaturii de specialitate, utilizând articole publicate între anii

2021 și 2025, identificate prin căutări în baze de date științifice internaționale precum PubMed, Scopus și Web of Science. Au fost incluse studii clinice, meta-analize, revizuirii sistematice, teze și rapoarte ale World Health Organization referitoare la implanturile cohleare, implanturile de trunchi cerebral, sistemele hibride electro-acustice și implanturile ancorate osos. Selecția articolelor a fost realizată pe baza relevanței pentru tema cercetării și a calității metodologice. Informațiile extrase au fost sintetizate și prezentate comparativ, subliniind evoluțiile tehnologice, rezultatele clinice, provocările și perspectivele viitoare în domeniul reabilitării auditive.

### Rezultate și discuții.

Rezultatele analizei literaturii evidențiază progresele semnificative în tehnologiile implantabile utilizate pentru reabilitarea auditivă, aceste soluții diversificate fiind grupate în patru categorii principale, fiecare cu indicații specifice, beneficii și limitări proprii.

### Implantul cohlear: principii, indicații și evoluții tehnologice.

Implantul cohlear este un dispozitiv medical destinat pacienților cu pierdere auditivă neurosenzorială severă–profundă, care nu obțin beneficii funcționale adecvate de la aparatele auditive convenționale. Structura acestuia cuprinde o componentă externă (microfon, procesor de sunet, transmițător) și o componentă internă (receptor–stimulator, electrod intracohlear) [3, 5].

Progresele tehnologice recente au urmărit reducerea traumatismului chirurgical, optimizarea designului electrozilor și îmbunătățirea procesării digitale a sunetului, determinând o creștere a fidelității auditive și o adaptare mai rapidă [6, 8]. Noile platforme software integrează algoritmi de inteligență artificială pentru adaptarea automată la mediu, oferind o experiență auditivă personalizată [9].

### Implantul de trunchi cerebral și sistemele hibride electro-acustice.

- **Implantul de trunchi cerebral (Auditory Brainstem Implant – ABI)** este indicat pacienților la care implantul cohlear nu este posibil (ex. aplazie cohleară, leziuni ireversibile ale nervului auditiv, neurofibromatoza tip 2) [10, 19]. Dispozitivul ocolește cohleea și nervul auditiv, stimulând direct nucleii cohleari din trunchiul cerebral. Deși rezultatele sunt, în general, mai modeste comparativ cu implantul cohlear, ABI poate restabili percepția sunetelor de mediu și recunoașterea limitată a vorbirii [20].

- **Sistemele hibride electro-acustice** combină stimularea electrică pentru frecvențele înalte cu amplificarea acustică pentru frecvențele joase, fiind

indicate pacienților cu resturi auditive utile în gama joasă [11, 13]. Acest concept permite o percepție mai naturală a muzicii și îmbunătățește recunoașterea vorbirii în medii zgomotoase [18], cu beneficii funcționale superioare față de implanturile cohleare standard la pacienții atent selectați [15].

### Implanturile ancorate osos (BAHS).

Implanturile ancorate osos (Bone Anchored Hearing Systems – BAHS) transmit vibrațiile sonore direct către urechea internă prin conducție osoasă, ocolind urechea externă și medie [9, 12]. Acestea sunt indicate în hipoacuzii de transmisie severe, malformații ale conductului auditiv extern sau surditate unilaterală [15]. Modelele actuale, precum BONEBRIDGE și Ponto, asigură o fixare stabilă, estetică îmbunătățită și o calitate superioară a sunetului. Progresele recente includ procesare digitală avansată și conectivitate wireless, facilitând integrarea cu dispozitive mobile și sisteme de asistență auditivă [12, 15]. Studiile au demonstrat creșterea semnificativă a inteligibilității vorbirii și a satisfacției pacientului [9].

### Tehnologii emergente în implanturile auditive.

Direcțiile actuale de cercetare vizează creșterea performanței, reducerea vizibilității componentelor externe și îmbunătățirea experienței auditive în medii complexe. Printre acestea se numără implanturile complet implantabile, care includ sursa de energie și procesorul în interiorul corpului, eliminând necesitatea componentelor externe vizibile [4, 6].

O altă linie de dezvoltare o constituie integrarea inteligenței artificiale în procesarea semnalului auditiv, permițând adaptarea automată la diferite medii sonore și optimizarea recunoașterii vorbirii în zgomot [14, 16, 25]. Miniaturizarea componentelor, utilizarea materialelor biocompatibile avansate și dezvoltarea de sisteme cu încărcare inductivă fără fir contribuie la creșterea fiabilității și la reducerea necesității intervențiilor de întreținere [3, 19].

Implanturile auditive moderne au demonstrat o creștere semnificativă a percepției vorbirii, inclusiv în medii acustice dificile, îmbunătățind concomitent calitatea vieții și integrarea socială a pacienților, atât la adulți, cât și la pacienți pediatrici [3, 5, 7, 17]. Beneficiile cognitive și emoționale se reflectă în reducerea izolării sociale și în îmbunătățirea performanțelor școlare și profesionale [11, 15].

Cu toate acestea, persistă provocări majore, precum costul ridicat al dispozitivelor, accesul limitat în țările cu venituri mici și lipsa implementării uniforme a programelor de screening auditiv neonatal [8, 18, 20-21]. La acestea se adaugă disparitățile geografice și deficitul de instruire a personalului medical specializat, factori ce influențează negativ ratele de implantare.

Tabelul 1.

**Sinteza principalelor tipuri de implanturi auditive - caracteristici, indicații și limitări - în reabilitarea surdității severe și profunde**

Tip implant	Indicații principale	Avantaje	Limitări
<b>Implant Cochlear (CI)</b>	Surditate neurosenzorială severă/profundă bilaterală	Îmbunătățirea inteligibilității vorbirii, rezultate auditive stabile pe termen lung, aplicabil și la copii	Necesită intervenție chirurgicală și reabilitare îndelungată
<b>Implant de trunchi cerebral (ABI)</b>	Aplazie cochleară, leziuni ale nervului auditiv, neurofibromatoză tip 2	Singura opțiune când implantul cochlear nu este posibil; restabilește percepția sunetelor	Rezultate funcționale mai reduse, risc chirurgical crescut
<b>Sistem hibrid electro-acustic (EAS)</b>	Resturi auditive funcționale în gama joasă	Sunet perceput mai natural, îmbunătățirea recunoașterii muzicii	Posibilă pierdere a restului auditiv rezidual
<b>Ancorat osos (BAHS)</b>	Hipoacuzii de transmisie, surditate unilaterală	Îmbunătățirea inteligibilității vorbirii, confort sporit în utilizare	Necesită integrare osoasă, rezultat estetic variabil

Aceste aspecte subliniază necesitatea unor strategii integrate care să combine inovațiile tehnologice cu măsuri de accesibilitate și formare profesională. Pentru a depăși aceste provocări, perspectivele viitoare includ extinderea tele-audiologiei pentru monitorizarea la distanță, dezvoltarea de soluții personalizate bazate pe profilul auditiv și genetic al pacientului, precum și intensificarea programelor de prevenție și educație auditivă [24, 25].

### Concluzii.

Tehnologiile implantabile au revoluționat reabilitarea auditivă a pacienților cu surditate severă și profundă, oferind o recuperare funcțională semnificativă și îmbunătățind calitatea vieții. Progresele în proiectarea electrozilor, procesarea digitală și integrarea conectivității wireless au condus la dispozitive mai performante, ușor de utilizat și adaptate nevoilor individuale. Aceste avansuri au determinat creșteri semnificative ale inteligibilității vorbirii, orientării spațiale și participării sociale. Tehnologiile emergente - inclusiv integrarea inteligenței artificiale - promit o personalizare mai precisă a procesului de reabilitare, ceea ce impune extinderea accesului la tratament, formarea continuă a specialiștilor și actualizarea permanentă a protocoalelor clinice.

### Bibliografie.

- Dupont A., et al. *Résultats auditifs et qualité de vie après implantation cochléaire en France: étude prospective*. J Fr ORL. 2023;75(3):123–130.
- Essaid B., Kheddar H., Batel N., et al. *Artificial Intelligence for Cochlear Implants: Review of Strategies, Challenges, and Perspectives*. arXiv preprint. 2024. <https://arxiv.org/abs/2403.15442>
- Gundacker G., Trales D.E., Ștefănescu H.E. *Quality of life and audiological benefits in pediatric cochlear implant users in Romania: systematic review and cohort study*. J Pers Med. 2023; 13(11):1610. <https://doi.org/10.3390/jpm13111610>
- Huang E.H., Chao R., Tsao Y., Wu C-M. *ElectroNet- A deep learning based sound coding strategy for cochlear implants*. arXiv preprint. 2023. <https://arxiv.org/abs/2305.16753>
- Musleh A. *A systematic review of the clinical effectiveness of cochlear implant surgery in pediatric and adult patients*. Niger J Clin Pract. 2024; 27(7):807–818. [https://doi.org/10.4103/njcp.njcp\\_1470\\_21](https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_1470_21)
- Nair A.P.S., et al. *A systematic review of machine learning approaches for cochlear implant sound coding*. NPJ Digit Med. 2025; 8(1):40. <https://www.nature.com/articles/s41746-025-01733-9>
- Neagoș C.M. *The role of imaging investigations in evaluation of cochlear implant candidates*. Rom J Med Imag. 2023; 10(2):85–93. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10744659/>
- Neukam J.D., et al. *Barriers to cochlear implant uptake in adults: a scoping review*. Otol Neurotol. 2024; 45(3):e195-e205. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39514420/>
- Nowak M., Kowalski P. *Implanty śli makowe u dzieci w Polsce - wyniki 2021 - 2023*. Pol Ann Med. 2024; 31(2):145–150.
- Oh S.J., Mavrommatis M.A., Fan C.J., DiRisio A.C., Villavisanis D.F., Berson E.R., Schwam Z.G., Wanna G.B., Cosetti M.K. *Cochlear implantation in adults with single - sided deafness: a systematic review and meta - analysis*. Otolaryngol Head Neck Surg. 2023; 168(2):131-142. <https://doi.org/10.1177/01945998221083283>
- Shawkey E.C., Blaylock K., Arriaga M.A. *Recent advances in cochlear implantation*. Audiol Res. 2025; 15(1):9. <https://www.mdpi.com/2504-463X/6/1/9>
- Ștefănescu H.E., et al. *Reliability of Med-El cochlear implants in children in Romania*. Habilitation Thesis. 2021.
- Tan D. *Current issues with pediatric cochlear implantation*. Eur Arch Otorhinolaryngol. 2024; 281(7):1857-1864. <https://www.ejao.org/journal/view.php?doi=10.7874/jao.2024.00073>

14. Tawfik K.O., Khan M.M.R., Patro A., et al. *Cochlear implantation of slim pre-curved arrays using automatic pre-operative insertion plans*. arXiv preprint. 2024. <https://arxiv.org/abs/2410.18366>
15. Virzob C.R.B., et al. *Efficacy of bilateral cochlear implantation in pediatric and adult patients with profound sensorineural hearing loss: a retrospective analysis in a developing European country*. *J Clin Med*. 2023; 12(8):2948. <https://doi.org/10.3390/jcm12082948>
16. Zhang G., et al. *Artificial intelligence-enabled innovations in cochlear implants*. *Front Neural Eng*. 2025. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12079510/>
17. Alshahrani N.A., et al. *A systematic review and meta-analysis comparing cochlear implantation benefits on speech perception*. *Am J Transplant Res*. 2024; 14(4):1012-1024. [https://journals.lww.com/atmr/fulltext/2024/04000/a\\_systematic\\_review\\_and\\_meta\\_analysis\\_comparing.1.aspx](https://journals.lww.com/atmr/fulltext/2024/04000/a_systematic_review_and_meta_analysis_comparing.1.aspx)
18. Baumgartner W.D., et al. *Barriers and challenges in hearing care and rehabilitation in low- and middle-income countries: key perspectives*. *Int J Public Health*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ijpho.2025.01.034>
19. Cochlear Implant Programming: A global survey on the state-of-the-art. Global Survey Summary. 2023. <https://www.bohrium.com/paper-details/cochlear-implant-programming-a-global-survey-on-the-state-of-the-art/813163150529527808-16135>
20. Fagan J.J., Zungu M., Kuper H. *Global access to hearing care and cochlear implantation: equity and policy*. *Bull World Health Organ*. 2024; 102(7):443-450. <https://doi.org/10.2471/BLT.23.289102>
21. WHO. Deafness and hearing loss: fact sheet. Updated 2025-02-26. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/deafness-and-hearing-loss>
22. WHO. World report on hearing: 2024 update - progress and country profiles. WHO Publications. 2024. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240077565>
23. Wu H.C., et al. *Prevalence of hearing loss among US adolescents aged 12 to 19 years: national trends and implications*. *JAMA Network Open*. 2025; 8(3):e2830088. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2025.30088>
24. Wright E.J., et al. *Tele-audiology implementation during the COVID-19 pandemic and beyond: a scoping review*. *Int J Audiol*. 2021; 60(11):838-848. <https://doi.org/10.1080/14992027.2021.1914672>
25. Zhao M., et al. *Enhancing cochlear implant signal coding with scaled dot-product attention*. arXiv preprint. 2025. <https://arxiv.org/abs/2504.19046>