

# Разработка программного комплекса для оценки показателей слуха

А. В. Гаврилов<sup>1</sup>, И. И. Шпаковская<sup>2</sup>,

Д. И. Каплун<sup>3</sup>, О. А. Маркелов<sup>4</sup>

Санкт-Петербургский государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

<sup>1</sup>gamer\_gav04@mail.ru, <sup>2</sup>iishpakovskaia@etu.ru

<sup>3</sup>dikaplun@etu.ru, <sup>4</sup>oamarkelov@etu.ru

М. Ю. Бобошко<sup>1</sup>, Е. С. Гарбарук<sup>2</sup>

Научно-исследовательский центр ФГБОУ ВО  
«Первый Санкт-Петербургский государственный  
медицинский университет им. акад. И.П. Павлова»  
Министерства здравоохранения РФ

<sup>1</sup>boboshkom@gmail.com

<sup>2</sup>kgarbaruk@mail.ru

**Аннотация.** В рамках данной работы были разработаны алгоритмы, которые позволяют автоматически определять наличие или отсутствие центральных слуховых расстройств (ЦСР), степень и тип тугоухости, эффективность слухового аппарата (СА) и вид аудиограммы тональной пороговой аудиометрии (ТПА) у пациентов по результатам тестирований. Написан программный комплекс на языке Python, объединяющий в себе все алгоритмы. Данное программное обеспечение, позволит ускорить и упростить работу медицинских сотрудников. Уменьшит вероятность ошибок и опечаток при расчетах.

**Ключевые слова:** слухопротезирование, слуховые аппараты, центральные слуховые расстройства, тугоухость, тональная пороговая аудиометрия

## I. ВВЕДЕНИЕ

Слухопротезирование является одной из самых значимых и перспективных областей медицинской науки и технологий. В мире, где звук играет неотъемлемую роль в нашей коммуникации, социальной взаимосвязи и качестве жизни, возможность восстановления или улучшения слуха имеет огромное значение. Однако, чтобы достичь оптимальных результатов в слухопротезировании, необходимо не только разработать высокотехнологичные устройства, но и оценивать и улучшать их эффективность.

В статье [1] приводится описание модели машинного обучения, с помощью которой пациентов классифицируют по аудиологическим профилям. Также в рамках работы корейских исследователей [2], разрабатывался программный комплекс, который с помощью машинного обучения прогнозирует степень разборчивости речи по данным тональной пороговой аудиометрии.

В настоящее время ведется работа по расширению набора данных. Этот процесс так же требует специального программного обеспечения для избежания ошибок в данных, поэтому на первом этапе работы разрабатывается программный комплекс для сбора данных и предварительного анализа слухового профиля пациентов на основе экспертных правил.

В рамках данной работы разрабатывается программный модуль для оценки эффективности слуховых аппаратов. Цель работы заключается в

создании алгоритмов, способных автоматически определять различные параметры, связанные с функциональностью слуховых протезов и медицинскими показаниями пациентов. Предлагаемый программный комплекс предоставляет набор инструментов для измерения и анализа этих показателей для повышения эффективности слухопротезирования.

Основываясь на существующих исследованиях и нашем практическом опыте, мы убеждены, что эффективная оценка и улучшение показателей слуха играют важную роль в повышении качества жизни людей с нарушениями слуха. Наш программный комплекс представляет собой шаг вперед в области слухопротезирования, предоставляя возможность более точной настройки и адаптации слуховых аппаратов под индивидуальные потребности каждого пациента.

## II. ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ

В исследовании были использованы медицинские данные с результатами обследований 375 пациентов от 60 до 93 лет, из которых в основную группу вошли 355 пациентов с хронической двусторонней тугоухостью (230 из них использовали слуховые аппараты), а в контрольную – 20 человек пожилого возраста с нормальными порогами слуха. В основной группе 230 пациентов женского пола и 125 – мужского.

Использовались следующие тесты:

- русский матриксный фразовый тест (в тишине и в шуме);
- оценка разборчивости разносложных слов (в тишине и в шуме);
- оценка разборчивости односложных слов (в тишине и в шуме);
- субъективная оценка;
- анкета COSI;
- тест обнаружения паузы;
- тест чередующейся бинаурально речью;
- дихотический числовой тест;
- тональная пороговая аудиометрия по воздушной и кострой проводимости.

### III. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

#### A. Определение наличия или отсутствия ЦСР

Оценка центральных отделов слуховой системы (и решение о наличии/отсутствии ЦСР) проводится на основании 5 тестов, представленных в табл. I.

ТАБЛИЦА I. ЦЕНТРАЛЬНЫЕ ТЕСТЫ

Тест	Критерий невыполнения
Оценка разборчивости разнотонных слов	< 50%
Дихотический числовой тест	< 50%
Тест обнаружения паузы	>20 мс/failed
Русский матриксный фразовый тест (возраст ≥ 61)	> -4,7 dB
Русский матриксный фразовый тест (возраст < 61)	> -7,2 dB
Тест чередующейся бинаурально речью	>20%

Проводился статистический анализ с применением коэффициента корреляции Спирмена. Из рис. 1 видно, что наибольшее (обратное) влияние на наличие ЦСР у пациента оказывает дихотический числовой тест. Остальные же тесты оказались менее зависимыми.

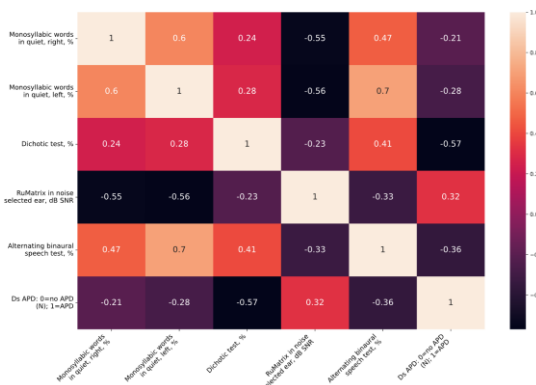


Рис. 1. Корреляция Спирмена

#### Условия наличия ЦСР:

- односложные слова в тишине в пределах нормы, а любые два других теста нет (среднеквадратичное отклонение (SD) более чем на 2 SD);
- односложные слова в тишине и любой другой тест не в пределах нормы (кроме теста чередующейся бинаурально речью);
- односложные слова в тишине не в пределах нормы, а другие да (или не проводились);
- односложные слова в тишине и тест чередующейся бинаурально речью не в пределах нормы, а другие да (или не проводились).

#### Условия отсутствия ЦСР:

- все тесты в пределах нормы;
- один тест не в пределах нормы (кроме односложных слов в тишине).

Проанализировав данные условия, был написан алгоритм на языке Python (как и все последующие алгоритмы).

Алгоритм может быть представлен следующими правилами: ЕСЛИ ([Разборчивость односложных слов в тишине, правое ухо, %] >= 50) ИЛИ ([Разборчивость

односложных слов в тишине, левое ухо %] >= 50) И ([Дихотический тест, %] < 50) + ([Тест обнаружения паузы, ms] > 20 мс ИЛИ [Тест обнаружения паузы, ms] == 'failed') + ([Матриксный фразовый тест в шуме, dB] > -4,7) И ([Возраст] > 60) + ([Матриксный фразовый тест в шуме, dB] > -7,2) И ([Возраст] < 61) + ([ΔЧБР] > 20)] >= 2 ТО [ЦСР] = 1

В результате выполнения программы, пользователь получает таблицу Excel с результатами анализа ЦСР.

#### B. Определение эффективности СА

Для оценки суммарной эффективности СА, была определена эффективность в тишине, в шуме и субъективная.

##### Условия эффективности СА в тишине:

- улучшение разборчивости фраз в тесте RuMatrix в тишине более 4,6 dB SPL;
- прирост разборчивости слов в тишине в СА более 10 %.

##### Если оценка происходит только в СА, то:

- разборчивость многосложных слов в тишине ≥ 90 %;
- разборчивость односложных слов в тишине ≥ 80 %;
- погрешность 7 %.

##### Условия эффективности СА в шуме:

- улучшение разборчивости фраз в тесте RuMatrix в шуме более 1,1 dB SNR;
- прирост разборчивости слов в шуме в СА более 10%.

##### Если оценка происходит только в СА, то:

- разборчивость многосложных слов в шуме ≥ 70 %;
- разборчивость односложных слов в шуме ≥ 60 %.

##### Условия субъективной эффективности СА:

- результат анкеты COSI ≥ 60 %;
- субъективная оценка ≥ 3,5.

#### C. Определение степени тугоухости

Отдельно для правого и левого уха рассчитывается средний порог слуха по 4 частотам (500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz и 4000 Hz) по воздушной проводимости (АС). После чего определяем степень тугоухости по полученным значениям. Степени указаны в табл. II.

ТАБЛИЦА II. СТЕПЕНИ ТУГОУХОСТИ

Степень	Порог АС (dB)
Нормальный слух	<26
1	26-40
2	41-55
3	56-70
4	71-90
Глухота	>90

#### D. Определение типа тугоухости

Отдельно для правого и левого уха рассчитывается средний порог слуха по 4 частотам (500 Hz, 1000 Hz,

2000 Hz и 4000 Hz) по костной проводимости (BC). Далее рассчитывается разница между средним порогом по воздушной и костной проводимости и на основании полученных значений определяется тип тугоухости по табл. III.

ТАБЛИЦА III. ТИПЫ ТУГОУХОСТИ

Тип	Разница (дБ)	Порог ВС (дБ)
Смешанная	> 15	≥ 26
Проводящая	> 15	< 26
Сенсонервальная	≤ 15	

### Е. Определение вида аудиограммы ТПА

Для определения вида аудиограммы ТПА рассматриваются значения уровня слуха на частотах 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz и 4000 Hz по воздушной проводимости отдельно для каждого уха.

В источнике [3] приведено описание видов аудиограмм ТПА. В данной работе рассматривалась плоская потеря, нисходящая потеря, потеря в виде укуса печени и обратная потеря в виде укуса печени. Нисходящая потеря была разделена на плавно нисходящую и круто нисходящую.

#### Плоская потеря:

- все значения находятся не только в диапазоне от -10 dB до 25 dB;
- разница уровня слуха между всеми частотами ≤ 30 dB;
- разница уровня слуха между частотами 1000 Hz, 2000 Hz, и 4000 Hz ≤ 15 dB;
- погрешность 5 dB.

На рис. 2 можно увидеть пример данных аудиограмм. В нашем исследовании получилось 82 пациента с данным видом аудиограммы для правого уха и 75 для левого.

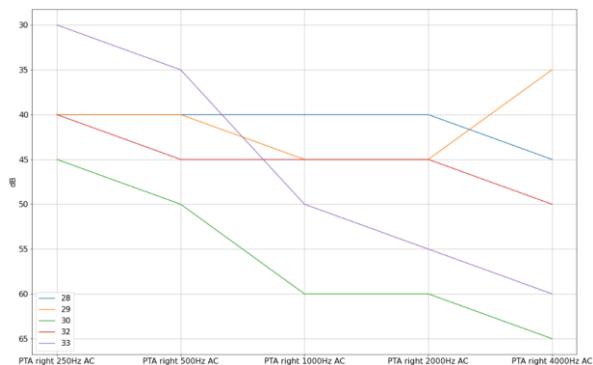


Рис. 2. Аудиограммы «Плоская потеря»

#### Плавно нисходящая потеря:

- значения уровня слуха начиная с частоты 1000 Hz ≤ последующих значений;
- разница уровня слуха между частотой 1000 Hz и 2000 Hz > 10 dB и разница уровня слуха между частотой 2000 Hz и 4000 Hz > 10 dB или разница уровня слуха между частотой 1000 Hz и 4000 Hz ≥ 15 dB;
- разница уровня слуха между частотой 250 Hz и 4000 Hz ≥ 40 dB;

- разница уровня слуха между частотой 1000 Hz и 2000 Hz ≤ 20 dB или разница уровня слуха между частотой 2000 Hz и 4000 Hz ≤ 20 dB;
- погрешность 5 dB.

На рис. 3 можно увидеть пример данных аудиограмм. В нашем исследовании получилось 87 пациента с данным видом аудиограммы для правого уха и 52 для левого.

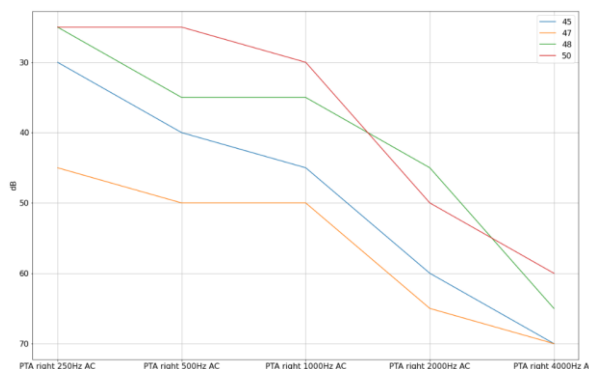


Рис. 3. Аудиограммы «Плавно нисходящая потеря»

#### Круто нисходящая потеря:

- значения уровня слуха начиная с частоты 1000 Hz ≤ последующих значений;
- разница уровня слуха между частотой 1000 Hz и 2000 Hz > 10 dB и разница уровня слуха между частотой 2000 Hz и 4000 Hz > 10 dB или разница уровня слуха между частотой 1000 Hz и 4000 Hz ≥ 15 dB;
- разница уровня слуха между частотой 250 Hz и 4000 Hz ≥ 40 dB;
- разница уровня слуха между частотой 1000 Hz и 2000 Hz > 20 dB или разница уровня слуха между частотой 2000 Hz и 4000 Hz > 20 dB;
- погрешность 5 dB.

На рис. 4 можно увидеть пример данных аудиограмм. В нашем исследовании получилось 34 пациента с данным видом аудиограммы для правого уха и 32 для левого.

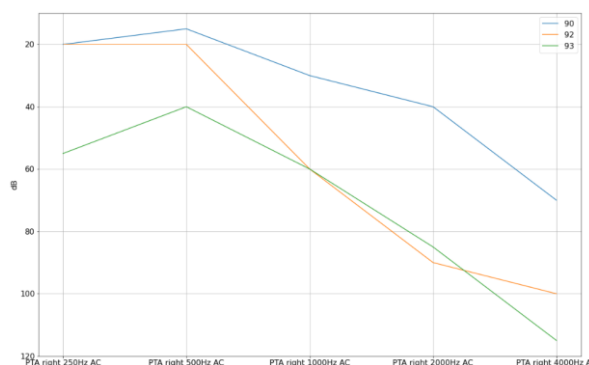


Рис. 4. Аудиограммы «Круто нисходящая потеря»

#### Потеря в виде укуса печени:

- значение уровень слуха повышается при частоте 500 Hz/1000 Hz/2000 Hz, а после снижается при частоте 1000Hz/2000Hz/4000Hz соответственно;
- погрешность 5 dB.

На рис. 5 можно увидеть пример данных аудиограмм. Такие случаи встречаются довольно редко. В нашем случае – 9 пациентов для правого уха и 5 для левого.

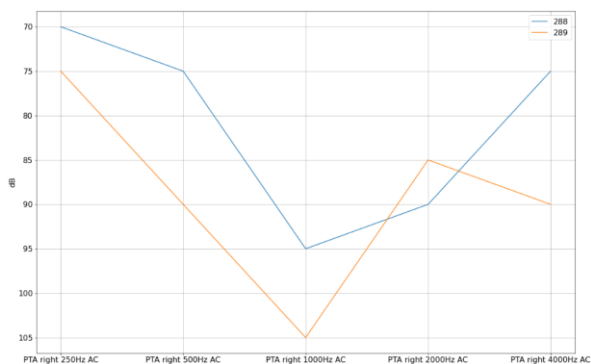


Рис. 5. Аудиограммы «Потеря в виде укуса печени»

Обратная потеря в виде укуса печени:

- значение уровень слуха снижается при частоте 500 Hz/1000 Hz/2000 Hz, а после повышается при частоте 1000 Hz/2000 Hz/4000 Hz соответственно;
- погрешность 5 dB.

На рис. 6 можно увидеть пример данных аудиограмм. Данные случаи на практике встречаются еще реже, чем потеря в виде укуса печени. В нашем исследовании оказался только один подобный случай для правого и левого уха.

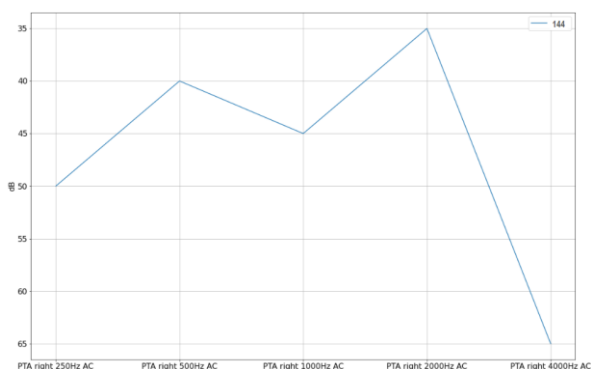


Рис. 6. Аудиограммы «Обратная потеря в виде укуса печени»

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье мы представили разработку программного комплекса, специально созданного для оценки показателей слуха. Наша работа была основана на обзоре литературы и предыдущих исследований, которые пролили свет на значимость слухопротезирования и улучшение его эффективности.

Мы также рассмотрели другие работы в данной области и выделили их основные достижения и недостатки.

В ходе нашего исследования мы разработали и представили несколько алгоритмов, которые способны автоматически определять различные параметры, связанные с функциональностью СА. Эти алгоритмы предоставляют важные инструменты для измерения и анализа качества восприятия звуков, разрешающей способности и распознавания речи у пользователей СА.

Наши разработки имеют потенциал значительно улучшить качество жизни людей с нарушениями слуха. Предоставление точной и надежной оценки показателей слуха позволяет медицинским специалистам лучше понять индивидуальные потребности каждого пациента и настроить СА для достижения оптимальных результатов.

Дальнейшее развитие нашей работы может включать усовершенствование алгоритмов, расширение функциональности программного комплекса и включение в него методов машинного обучения. Мы надеемся, что наша работа станет отправной точкой для дальнейших исследований в области оценки показателей слуха и разработки более эффективных СА.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Samira Saak, David Huelsmeier, Birger Kollmeier, Mareike Buhl. A flexible data-driven audiological patient stratification method for deriving auditory profiles. *Frontiers in Neurology*. 2022; 13. DOI: 10.3389/fneur.2022.959582. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9520582/> (accessed 27 May 2023)
- [2] Hantai Kim, JaeYeon Park, Yun-Hoon Choung, Jeong Hun Jang, JeongGil Ko. Predicting speech discrimination scores from pure-tone thresholds—A machine learning-based approach using data from 12,697 subjects. *Plos One*. 2021. DOI: 10.1371/journal.pone.0261433 Available at: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0261433> (accessed 29 May 2023)
- [3] Kinds of Hearing Losses (2016). Available at: <https://hearinglosshelp.com/blog/kinds-of-hearing-losses/> (accessed 18 May 2023)
- [4] Josef Schlittenlacher, Richard E. Turner, Brian C. J. Moore. Audiogram estimation using Bayesian active learning. *J Acoust Soc Am* 144, 421–430 (2018). DOI: 10.1121/1.5047436. Available at: <https://pubs.aip.org/asa/jasa/article-abstract/144/1/421/855567/Audiogram-estimation-using-Bayesian-active?redirectedFrom=fulltext> (accessed 29 May 2023)
- [5] Nikolai Bisgaard, Marcel S. M. G. Vlaming, Martin Dahlquist. Standard Audiograms for the IEC 60118-15 Measurement Procedure. *Trends in Amplification* 14(2) 113–120, 2010. DOI: 10.1177/1084713810379609. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/epdf/10.1177/1084713810379609> (accessed 29 May 2023)
- [6] The Bizarre World of Extreme Reverse-Slope Hearing Loss (or Low Frequency) Hearing Loss (2019) Available at: <https://hearinglosshelp.com/blog/the-bizarre-world-of-extreme-reverse-slope-hearing-loss/> (accessed 18 May 2023)