УДК 534.76+534.771+612.85.016.6

<https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-19-24>

Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника в норме и при сенсоневральной тугоухости 2–3-й степени

А. П. Гвоздева¹, Е. А. Клишова², Л. Е. Голованова², И. Г. Андреева¹

¹ Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова, Санкт-Петербург, 194223, Россия

² Городской гериатрический медико-социальный центр, Санкт-Петербург, 190103, Россия

Threshold duration of audio signals for assessment of approaching and receding of their source in normal condition and in 2nd and 3rd degree sensorineural hearing loss

A. P. Gvozdeva¹, E. A. Klishova², L. E. Golovanova², I. G. Andreeva¹

¹ Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Saint Petersburg, 194223, Russia

² Municipal Geriatric Medical and Social Center, Saint Petersburg, 190103, Russia

Исследование временных характеристик пространственного слуха у 10 пациентов в возрасте 68–83 лет с сенсоневральной тугоухостью (потеря слуха 41–62 дБ) было выполнено методом постоянных рядов с применением моделирования движения звуковых образов в условиях помещения с малым временем реверберации. В анамнезе у пациентов не было острых нарушений мозгового кровообращения, черепно-мозговых травм и острого инфаркта миокарда. Движущиеся звуковые образы создавали линейным изменением по амплитуде последовательностей широкополосных шумовых посылок в диапазоне частот 0,2–8 кГц, которые подавали с двух динамиков. По индивидуальным данным испытуемых с СНТ 2–3-й степени пороговая длительность сигналов, необходимая для уверенного определения направления движения приближающихся и удаляющихся звуковых образов, варьировала в пределах 300–800 мс. Средний порог по длительности в группе пациентов составил 400 мс, тогда как в норме он был равен 150 мс. Таким образом, пациентам с сенсоневральной тугоухостью требуется больше времени для правильной оценки направления движения звуковых образов, чем испытуемым с нормальным слухом. Эти изменения восприятия могут быть обусловлены суммарным эффектом изменения надпорогового кодирования звуковых сигналов и снижения порогов слуха, которое приводит к выключению высокочастотного бинаурального механизма.

Ключевые слова: сенсоневральная тугоухость, пространственный слух, слуховое восприятие движения, оценка расстояния.

Для цитирования: Гвоздева А. П., Клишова Е. А., Голованова Л. Е., Андреева И. Г. Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника в норме и при сенсоневральной тугоухости 2–3-й степени. *Российская оториноларингология*. 2020;19(1):19–24. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-19-24>

The study of temporal characteristics of spatial hearing was carried out in 10 patients aged 68–83 years with sensorineural hearing loss (SNHL) (hearing loss 41–62 dB) using the method of constant stimuli and moving sound image modeling in a room with short reverberation time. Patients had no acute cerebrovascular accidents, traumatic brain injuries and myocardial infarctions in their medical history. The moving sound images were created by linear variation of the amplitude of wideband noise burst sequences in the frequency range of 0.2–8 kHz, which were presented from two loudspeakers. According to the individual data obtained in the patients with SNHL of the 2nd -3rd degree, the threshold signal duration required for reliable determination of approaching and receding moving sound images varied within 300–800 ms. The average duration threshold in the group of SNHL patients was 400 ms, while in subjects with normal hearing it was 150 ms. Therefore, SNHL patients need more time for correct detection of the sound image motion direction than the subjects

with normal hearing. These changes in perception may be due to the combined effect of the change in supra-threshold sound coding and the failure of the high-frequency binaural mechanism as a result of the hearing thresholds decrease.

Keywords: sensorineural hearing loss, spatial hearing, auditory motion perception, evaluation of distance.

For citation: Gvozdeva A. P., Klishova E. A., Golovanova L. E., Andreeva I. G. Threshold duration of audio signals for assessment of approaching and receding of their source in normal condition and in 2nd and 3rd degree sensorineural hearing loss. *Rossiiskaya otorinolaringologiya*. 2020;19(1):19–24. <https://doi.org/10.18692/1810-4800-2020-1-19-24>

Введение

При нарушениях функции органа слуха, обусловленных старением организма, происходит прогрессирующая и необратимая двусторонняя симметричная возрастная сенсорная потеря слуха, вызванная дегенерацией улитки, сопутствующих структур внутреннего уха или слуховых нервов (пресбиакузис) [1–3]. Эти нарушения приводят к ухудшению восприятия речи и трудностям при пространственной ориентации по слуху [1, 4, 5]. Исследования нарушений локализации проводились преимущественно при локализации по азимуту [6, 7] и в значительно меньшей степени – по вертикали и по расстоянию [8–10]. Пресбиакузис представляет интерес как модель постепенного, в зависимости от степени тугоухости, выключения высокочастотного бинаурального механизма пространственного слуха. Наряду с повышением порогов высокочастотного слуха изменяется кодирование надпороговых сигналов – возникает феномен усиленного нарастания громкости [1]. Усиленное нарастание громкости неизбежно влияет на оценку расстояния по слуху, поскольку изменение громкости – один из основных признаков удаленности от источника звука, однако степень этого влияния не изучалась. Таким образом, как бинауральные, так и монауральные механизмы, используемые слуховой системой для оценки расстояния от слушателя до источника звука, должны функционировать иначе при сенсоневральной тугоухости по сравнению с нормальным слухом. В данной рабо-

те изучали состояние пространственного слуха у пациентов со 2–3-й степенью сенсоневральной тугоухости (СНТ) по показателю пороговой длительности для оценки приближения и удаления источников звука.

Методика исследования

В исследовании приняли участие 10 пациентов в возрасте от 68 до 83 лет с симметричной СНТ второй и третьей степени (из них 5 мужчин; средний возраст 76 лет). В анамнезе у пациентов не было острых нарушений мозгового кровообращения, черепно-мозговых травм и острого инфаркта миокарда. Двое из десяти пациентов постоянно носили слуховые аппараты, однако на время участия в эксперименте снимали их. Значения средней потери слуха на четырех аудиометрических частотах – 0,5; 1; 2 и 4 кГц – для левого и правого уха пациентов с СНТ представлены в таблице. Контрольная группа состояла из 6 взрослых здоровых испытуемых в возрасте от 25 до 66 лет (5 женщин, 1 мужчина; средний возраст 34 года) с нормальным слухом.

Движущиеся звуковые образы создавали линейным изменением по амплитуде последовательностей широкополосных шумовых посылок в диапазоне частот 0,2–8 кГц, которые подавали с двух динамиков [11]. Динамики располагали напротив слушателя на расстояниях 0,75 и 3 м. Для создания иллюзии приближения источника звука амплитуда последовательности шумовых посылок увеличивалась от начала к концу звучания на

Возраст и состояние слуха пациентов с СНТ

Т а б л и ц а

The age and hearing loss of patients

Table

Показатель	Номер пациента										Средние значения в группе
	1	2	3	4	5*	6*	7	8	9	10	
Правое ухо, дБ	41	46	46	51	52	52	54	54	55	60	51±5
Левое ухо, дБ	43	49	51	46	42	48	58	65	55	62	52±8
Продолжительность СНТ, лет	2	6	3	20	3	5	3	5	7	1	6±5
Возраст, лет	72	73	81	77	73	79	83	71	68	81	76±5

Примечание. Представлены пороги слуха, измеренные в дБ относительно 10⁻⁵ Па и усредненные по четырем аудиометрическим частотам: 0,5; 1; 2 и 4 кГц. Звездочками обозначены номера тех пациентов, которые носили слуховые аппараты. Для средних значений указаны стандартные отклонения.

ближнем динамике и уменьшалась на дальнем. Для создания иллюзии удаления амплитуда последовательности шумовых посылок менялась в противоположном направлении. Разница максимальной и минимальной амплитуд в последовательностях была постоянной и составляла 38,6 дБ для сигнала, поступающего на ближний динамик, и 39,1 дБ для сигнала, поступающего на дальний динамик. Максимальный уровень звукового давления сигналов в месте прослушивания был 65 ± 2 дБ. Продолжительность посылок составляла 22 мс с передним и задним фронтами по 4 мс. Пауза между шумовыми посылками равнялась 3 мс. Запаздывание сигнала, поступавшего с дальнего динамика, составляло около 2 мс по сравнению с сигналом с ближнего динамика. Было сформировано по семь приближающихся и удаляющихся стимулов длительностью от 0,3 до 1,4 с. Эксперименты проводили в комнате объемом 51 м куб., в которой для уменьшения реверберации использовали акустические звукопоглощающие панели типа «Пирамида-100» фирмы «АкустикСтройИнжиниринг» и ковровое покрытие. Время, за которое уровень реверберации падал на 60 дБ, измеренное методом прерываемого шума, составило 460 мс. Запаздывание первого отражения звука в месте прослушивания звуковых сигналов было 2 мс, соотношение уровня первой отраженной и прямой звуковых волн было -11 дБ. Акустические характеристики определяли при помощи предварительно откалиброванного микрофона Октава МК-012. Воспроизведение стимулов осуществляли на ноутбуке HP ProBook 450 со встроенной звуковой картой IDT High Definition

Audio, с которой аналоговый сигнал направляли на двухканальный усилитель мощности ONKYO A-9377, а затем – на два коаксиальных двухполосных громкоговорителя Morel SoundSpot SP-1.

Экспериментальная процедура в контрольной группе и группе пациентов с СНТ была одинакова. Эксперимент начинали с предъявления испытуемому нескольких звуковых сигналов максимальных длительностей. Его просили после каждого прослушанного сигнала в устной форме ответить на вопрос: «Приближается или удаляется звуковой образ?». Затем испытуемому было предложено прослушать серию из 70 стимулов, в которой в случайном порядке по 5 раз повторялись приближающиеся и удаляющиеся стимулы всех длительностей. Ответы фиксировались врачом-экспериментатором в специальном бланке. Пороговую длительность определяли на уровне 25% ошибок. Оценку достоверности различий в вероятностях ошибок между группой пациентов с СНТ и контрольной группой проводили с использованием одностороннего биномиального критерия.

Результаты исследования

В группе пациентов с СНТ индивидуальные результаты определения направления при движении звуковых образов с разной длительностью значительно варьировали (рис. 1 а, б). У пациентов № 1, 2, 6 и 9 доля ошибок в определении направления движения самых коротких стимулов составляла 40–50% и оказывалась ниже порогового значения в 25% для всех стимулов продолжительностью 500 мс и более. Пациенты № 3, 4, 7

Рис. 1. Индивидуальные вероятности ошибок при определении направления движения стимулов у испытуемых с СНТ 2–3-й степени: а – данные испытуемых № 1–5; б – данные испытуемых № 6–10. Разными символами обозначены индивидуальные данные, номера испытуемых соответствуют указанным в таблице (см. легенду). По оси абсцисс – продолжительность стимула, с; по оси ординат – вероятность ошибок, %. Прерывистой горизонтальной линией показан пороговый уровень в 25% ошибок. Число измерений $n = 10$.

Fig. 1. Individual percentage of mistakes in determining the direction of stimulus motion in SNHL patients: а – patients 1–5, б – patients 6–10. Different symbols stand for data obtained in different subjects. Number of patients corresponds to that in Table 1. Abscissa – stimulus duration, s; ordinate – percentage of mistakes, %. Dashed line – threshold level of 25% of mistakes. The number of measurements for each point $n = 10$.

и 8 совершали от 50 до 60% ошибок при определении направления движения самых коротких стимулов. С увеличением продолжительности стимулов число ошибок снижалось, при длительности 400 мс вероятность ошибок становилась ниже пороговой (от 0 до 20%). Таким образом, порог по длительности на уровне 25% ошибок для этих четырех пациентов составил 400 мс. Пациент № 5 даже при самой короткой длительности стимулов – 300 мс – допускал менее 25% ошибок в оценке направления движения. Пациент № 10 демонстрировал неравномерное снижение количества ошибок с ростом длительности стимулов от 300 до 800 мс (50, 20, 40 и 10% для длительностей 300, 400, 500 и 800 мс, соответственно). Стабильно низкий (ниже порогового значения) процент ошибок для этого испытуемого наблюдали при длительностях стимулов от 800 мс. Таким образом, по индивидуальным данным испытуемых с СНТ 2–3-й степени пороговая длительность сигналов, необходимая для уверенного опреде-

ления направления движения приближающихся и удаляющихся звуковых образов, варьировала в пределах 300–800 мс.

В контрольной группе испытуемых с нормальным слухом получили более низкие значения вероятности ошибок при определении направления движения, чем у пациентов с СНТ. При самой короткой длительности доля ошибочных ответов составляла не более 20% и далее снижалась с увеличением продолжительности стимулов. Пороговая длительность стимулов для этих испытуемых составляла не более 300 мс, что оказалось существенно меньше, чем в группе пациентов с СНТ.

Средние по группе пороги слухового восприятия приближения и удаления звуковых образов в группах испытуемых с СНТ и с нормальным слухом определяли как наименьшее из исследованных значений длительности стимулов, при которых средняя по группе вероятность ошибок была ниже порогового значения в 25% (рис. 2). Для группы испытуемых с СНТ пороговая длительность составила 400 мс (средняя по группе вероятность ошибок 24%). Для группы испытуемых с нормальным слухом даже при минимальной длительности стимулов 300 мс средняя вероятность ошибок оказалась значительно ниже порогового значения и составляла 7%. Таким образом, пороговая длительность стимула, необходимая для оценки приближения и удаления, в этой группе испытуемых была не более 300 мс. Достоверность различий в вероятностях ошибок при определении направления движения звуковых стимулов одинаковой длительности между группами испытуемых определяли с использованием одностороннего биномиального критерия. При определении направления движения стимулов длительностью 300–800 мс группа испытуемых с СНТ допускала достоверно больше ошибок, чем группа с нормальным слухом (для 300 мс: 47 и 7% ошибок, соответственно, $p < 0,001$; для 400 мс: 24 и 3%, $p < 0,001$; для 500 мс: 15 и 2%, $p < 0,01$; для 800 мс: 8 и 0%, $p < 0,05$). Для стимулов длительностью 1000 мс и более вероятность ошибок в обеих группах не превышала 5%, и достоверных различий между группами выявлено не было.

Рис. 2. Средние вероятности ошибок при определении направления движения приближающихся и удаляющихся звуковых образов в группах пациентов с СНТ 2–3-й степени и испытуемых с нормальным слухом. Обозначения групп см. на легенде. Звездочкой обозначены данные группы испытуемых с нормальным слухом из работы [4]. По оси абсцисс – продолжительность стимула, с; по оси ординат – вероятность ошибок, %. Указана стандартная ошибка среднего для биномиального распределения. Прерывистой линией обозначен пороговый уровень в 25% ошибок. Число измерений в каждой точке: $n = 100$ для группы пациентов с СНТ, $n = 70$ для группы испытуемых с нормальным слухом, $n = 160$ для группы с нормальным слухом из работы [4].

Fig. 2. Average percentage of mistakes in determining the sound image motion direction (approaching vs. receding) in SNHL patients and in subjects with normal hearing. Table of symbols is presented in the upper right corner. Asterisks indicate the data for subjects with normal hearing obtained in our previous work, in which stimuli with durations of 0.125–0.4 s were used [4]. Abscissa – stimulus duration, s; ordinate – percentage of mistakes, %. Standard errors of the mean for binomial distribution are presented. Dashed line – 25% threshold level. The number of measurements for each point $n = 100$ (SNHL patients), 70 (subjects with normal hearing), and 160 (subjects with normal hearing examined in our previous study [4]).

Закключение

Полученные данные свидетельствуют о том, что пациентам с СНТ требуется в среднем больше времени для правильной оценки направления движения звуковых образов. Пациенты совершают большее число ошибок в определении направления приближающихся и удаляющихся звуковых образов относительно коротких (до 800 мс) длительностей, чем испытуемые с нормальным слухом. Пороги по длительности для восприятия приближения и удаления у пациентов с СНТ 2–3-й степени существенно отличаются от таковых у ис-

пытуемых с нормальным слухом и составляют в среднем 400 мс. Ранее нами было выполнено исследование, в котором оценили влияние снижения слуха путем фильтрации широкополосного сигнала на высоких частотах [11]. Сопоставление вероятностей ошибок у испытуемых с нормальным слухом при оценке направления движения источников широкополосного шума и при моделировании снижения слуха не выявило различий – порог восприятия приближения и удаления в обоих случаях составил 150 мс (рис. 2). Исследование восприятия направления движения звуковых образов, которые представляли собой полосовые шумы низких частот, обнаружило увеличение порогов до 300 мс [12]. Увеличение порогов по длительности объясняли исключением высокочастотного бинаурального механизма слуха, так как аналогичный результат возникал не только при исключении из спектра сигнала доли высоких частот, но и в случае латерального

движения звукового образа, когда преимущество одного из ушей становилось максимальным [6]. С учетом такого исключения пороги все же оказывались на 100 мс меньше, чем полученные в настоящем исследовании средние пороги для пациентов с СНТ. Таким образом, результаты пациентов с СНТ нельзя объяснить только бинауральными эффектами. По-видимому, в увеличении порогов определенную роль играет нарушение надпорогового кодирования сигналов, которое может влиять на процесс временной суммации сигнала и приводить к дополнительному повышению порогов по длительности при оценке направления движения.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФАНО России (тема № АААА-А18-118013090245-6) при частичной поддержке РФФИ (проект № 18-015-00296).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Moore B. C. J. Cochlear hearing loss: physiological, psychological and technical issues. 2nd ed. Willey, 2007. 344 p.
2. Голованова Л. Е. Анализ консультативной деятельности Санкт-Петербургского сурдологического центра для взрослых. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2015;21(3):56–62 [Golovanova L. E. Saint-Petersburg audiology center for adults: advisory activities analysis. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2015;21(3):56–62 (in Russ.)]. http://foliaopr.spb.ru/wp-content/uploads/2016/05/Folia_21_3_2015.pdf
3. Бобошко М. Ю., Ефимова М. В., Гарбарук Е. С. Возрастная тугоухость у женщин. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2018;24(2):71–79 [Boboshko M. Yu., Efimova M. V., Garbaruk E. S. Age-related hearing loss in women. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2018;24(2):71–79. (in Russ.)]. http://foliaopr.spb.ru/wp-content/uploads/2018/02/Folia_24_2_2018.pdf
4. Огородникова Е. А., Балякова А. А., Жилинская Е. В., Охарева Н. Г., Пак С. П., Бобошко М. Ю. Слуховая тренировка как метод реабилитации пациентов с нарушениями слуха и речи. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017;23(1):33–42 [Ogorodnikova E. A., Baliakova A. A., Zhilinskaia E. V., Ohareva N. G., Pak S. P., Boboshko M. Yu. Auditory training as a rehabilitation method for patients with hearing and speech impairments. *Folia Otorhinolaryngologiae et Pathologiae Respiratoriae*. 2017;23(1):33–42 (in Russ.)] http://foliaopr.spb.ru/wp-content/uploads/2017/09/Folia_23_1_2017.pdf
5. Keating P., King A.J. Developmental plasticity of spatial hearing following asymmetric hearing loss: context-dependent cue integration and its clinical implications. *Front. Syst. Neurosci.* 2013;27(7):123.
6. Altman J. A., Andreeva I. G. Monaural perception and binaural perception of approaching and withdrawing auditory images in humans. *Int. J. Audiol.* 2004;43(4):227–235.
7. Carlile S., Leung J. The perception of auditory motion. *Trends in Hearing*. 2016;20:1–19.
8. Lundbeck M., Grimm G., Hohmann V., Laugesen S., Neher T. Sensitivity to Angular and Radial Source Movements as a Function of Acoustic Complexity in Normal and Impaired Hearing. *Trends Hear.* 2017;21.
9. Ahveninen J., Kopco N., Jääskeläinen I. P. Psychophysics and Neuronal Bases of Sound Localization in Humans. *Hear Res.* 2014;307:86–97.
10. Baumgartner R., Majdak P., Laback B. Modeling the Effects of Sensorineural Hearing Loss on Sound Localization in the Median Plane // *Trends Hear.* 2016; 22:20.
11. Андреева И. Г., Гвоздева А. П., Огородникова Е. А. Пороговая длительность звуковых сигналов для оценки приближения и удаления их источника при моделировании снижения высокочастотного слуха. *Сенсорные системы*. 2018; 32(4):277–284 [Andreeva I. G., Gvozdeva A. P., Ogorodnikova E. A. Threshold duration of sound signals for their sources approaching and withdrawing under condition of high-frequency hearing loss modeling. *Sensory systems*. 2018;32(4):277–284 (in Russ.) doi: 10.1134/S0235009218040029]
12. Андреева И. Г. Пороговая длительность сигналов при восприятии человеком радиального движения звуковых образов различного спектрального состава. *Сенсорные системы*. 2004;18(3):233–238 [Andreeva I. G. The Threshold Duration of Signal in Human Perception of Radial Motion of Sound Image with Different Spectral Bands. *Sensory systems*. 2004; 18(3):233–238 (in Russ.)]

Информация об авторах

Гвоздева Алиса Петровна – кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории сравнительной физиологии сенсорных систем, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова Российской Академии наук (194223, Россия, Санкт-Петербург, Тореца пр., д. 44); тел.: +7-965-061-49-45, e-mail: kukumalu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7813-731X>

Клишова Евгения Александровна – врач сурдолог-оториноларинголог сурдологического отделения, Городской гериатрический медико-социальный центр (190103, Россия, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, д.148); тел.: +7-981-845-33-92, e-mail: klishova@gmail.com

Голованова Лариса Евгеньевна – кандидат медицинских наук, заведующая сурдологическим отделением, Городской гериатрический медико-социальный центр (190103, Россия, Санкт-Петербург, наб. реки Фонтанки, д. 148); тел.: +7-921-940-45-43, e-mail: lgolovanova@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2577-7804>

Андреева Ирина Германовна – доктор биологических наук, и. о. заведующей лабораторией сравнительной физиологии сенсорных систем, Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова Российской академии наук (194223, Россия, Санкт-Петербург, Тореца пр., д. 44); тел.: +7-981-833-13-39, e-mail: ig-andreeva@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9963-7519>

Information about the authors

Alisa P. Gvozdeva – PhD in Biology, research associate of the Laboratory of Comparative Physiology of Sensorineural Systems, Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences (44, Toreza ave., Saint Petersburg, 194223, Russia); tel.: +7-965-061-49-45, e-mail: kukumalu@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7813-731X>

Evgeniya A. Klishova – surdologist-otorhinolaryngologist, Surdology Department, Municipal Geriatric Medical and Social Center (148, Fontanka Embankment, Saint Petersburg, 190103, Russia); tel.: +7-981-845-33-92, e-mail: klishova@gmail.com

Larisa E. Golovanova – MD Candidate, Head of Surdology Department, Municipal Geriatric Medical and Social Center (148, Fontanka Embankment, Saint Petersburg, 190103, Russia); tel.: +7-921-940-45-43, e-mail: lgolovanova@inbox.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2577-7804>

Irina G. Andreeva – D. Sc. in Biology, Acting Head of the Laboratory of Comparative Physiology of Sensorineural Systems, Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences (44, Toreza ave., Saint Petersburg, 194223, Russia); tel.: +7-965-061-49-45, e-mail: +7 981 833 13 39, e-mail: ig-andreeva@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9963-7519>