Овчинников Е.Л., Яшин С.С., Тарасенко Д.С., Давыдкин-Гогель М.М.,
Сахнова Е.В., Копаева Н.А.

Дифференциальные уравнения в обосновании возрастных свойств слуха. 2. Морфофункциональный подход

Самарский государственный медицинский университет
(Россия, Самара)

doi 10.18411/gq-30-11-2017-11

idsp 000001:gq-30-11-2017-11

Цель: морфофункциональное обоснование частотного восприятия звука

Результаты: представлен линейно-временной закон изменения структур уха с возрастом

Ключевые слова: акустическая модель слуха, частотное восприятие звука, частотно-временной закон восприятия звука, линейно-временной закон восприятия звука

Введение

Структурный морфо- и гистологический анализ строения внутреннего уха (рис. 1) позволяет использовать морфофункциональный подход к обоснованию временных (возрастных) изменений линейных параметров его элементов.

Напомним, что изменение частотного диапазона восприятия ухом звука связано с тем, что звуковые волны, действуя в течение всей жизни человека на улитковый проток, производят непрерывное разрушение незакрепленной у гелиотремы апикальной связки мембран и укорачивают его длину. Процесс этот обусловлен естественным развитием человека и его органа слуха [1, 2]. Но он может быть усилен рядом внешних и внутренних факторов: физических, физио- и фармакологических, временных (возрастных), климатических [3, 4]. По этой причине улитковый проток, и, соответственно, базилярная мембрана (как основная, несущая на себе сенсорные клетки, генерирующие нервные импульсы, приводя к слуховым ощущениям) и другие его структуры естественным образом в апикальной его части разрушаются, и длина их непрерывно сокращается. Этот феномен определен как эффект возрастной эволюции улиткового прохода и его структурных элементов [5-8].

Рис. 1. Улитковый проток, а: 1 – в базальной части: 2 – преддверная мембрана, 3 – система покровной и сетчатой мембран, 4 – базилярная мембрана, 5 – эндо-, 6 – корти- 7 – перилимфатический протоки, 8 – улитковый проток в апексе как апикальная связка мембран, б – фронтальный этап наблюдения поперечного среза улиткового протока.

Морфофункциональное обоснование линейно-временного закона возрастной эволюции улиткового протока

Пусть звуковые волны действуют на улитковый проток от момента рождения человека в течение t лет. За это время его длина уменьшится от первоначальной (стандартной) $L_0 = 32$ мм до $L_d(t) < L_0$.

Назовем целостностью улиткового протока величину

$$W(t) = \frac{L_d(t)}{L_o} \quad (1)$$

и примем, что целостность улиткового протока определяется только временем жизни человека, исключая влияние на его величину побочных эффектов, т.е. целостностью улиткового протока W – функция только времени: $W = W(t)$. По прошествии t лет от рождения длина улиткового протока станет равной

$$L_d(t) = L_o \cdot f(t) \quad (2)$$

и изменится на величину

$$\Delta L(t) = L_d(t) - L_o, \quad (3)$$

которую назовем укорочением протока [9-10].

Соотношение (2) предполагает, что естественный процесс ведет к тому, что величина разрушения ($-\Delta L$) прямо пропорциональна длине улиткового протока и длительности процесса Δt

$$-\Delta L = k L \Delta t, \quad (4)$$

или

$$k = - \frac{\Delta L / L}{\Delta t}, \quad (5)$$

где положительный коэффициент k (с единицей измерения $[k] = 1 \text{ год}^{-1}$) определяет относительное уменьшение длины улиткового протока при его возрастной эволюции (естественном старении) за единицу времени. Коэффициент k можно определить также и как скорость линейного (осевого) разрушения улиткового протока при его естественном развитии.

Установим течение возрастной эволюции (естественного развития, старения) улиткового протока. Переходя в (5) от конечных разностей к бесконечно малым, получаем дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными

$$k = - \frac{dL/L}{dt}. \quad (6)$$

Решением которого является линейно-временной закон развития улиткового протока [11-12]

$$L(t) = L_o e^{-kt}. \quad (7)$$

Величину k можно легко определить, используя соотношение для акустической модели слуха [13-18], определяющее связь между длиной базилярной мембраны и верхней пороговой границей воспринимаемого ухом звука $f_{\max}$ при стандартной $f_{m0} = 20 \text{ кГц}$, и получаем

$$k = \frac{2 \ln 2 \cdot \lg \frac{f_{m0}}{f_{\max}}}{t}. \quad (8)$$

Привлекая мысль G. von Békésy (1960) о скорости снижения частотной границы, но уточняя ее предположением, что убыль частоты осуществляется не линейно, а как однопроцентное изменение от существующей за год и используя (2.2) для $f_{m0} = 20 \text{ кГц}$, $f_{\max} = 19,8 \text{ кГц}$ и $\Delta t = 1 \text{ год}$, получаем

$$k = \frac{2 \ln 2 \cdot \lg \frac{f_{m0}}{f_{\max}}}{\Delta t} = 0,0060 \text{ год}^{-1}.$$

На рис. 2 представлена математическая интерпретация линейно-временного закона развития улиткового протока. Приведены начальные (на момент рождения человека) стандартные данные для улиткового протока: его длины $L_o = 32 \text{ мм}$ и воспринимаемая им верхняя частота $f_{m0} = 20 \text{ кГц}$. Указано значение частоты $f_{\max} = 19,8 \text{ кГц}$, соответствующее верхней пороговой частоте через $\Delta t = 1 \text{ год}$ после рождения. Проведен расчет коэффициента k . Приведена формула длины улиткового протока $L(t)$

как биофизическая иллюстрация эффекта его естественного развития. Представлен также расчет $\mu(t)$ как величины, показывающей долю $L_d(t)$ от стандартной.

Рис. 2. Иллюстрация линейно-временного закона возрастной эволюции улиткового протока. Расчет времени T_{fo} , в течение которого эффективная длина улиткового протока снизилась бы до апикальной связки его мембран ($T_{fo}/2$ – "срок службы" органа слуха: $T_{fo}/2 \sim 350$ лет).

Связь, обратная основному уравнению акустической модели слуха, представленная функцией

$$f_m = f_{mo} (L_d/L_0)^{1/(2 \log 2)}, \quad (9)$$

устанавливают, что наблюдаемое снижение верхнего значения частоты структурно объясняется сокращением длины улиткового канала и может быть вызвано его разрушением и уменьшением его длины [19-21].

Подобное основному уравнению акустической модели соотношение вида

$$f_a = f_o (L_a/L_0)^{1/(2 \log 2)} \quad (10)$$

описывает наблюдаемое повышение нижней частоты звука, который создается путем уширения апикальной связки мембран улиткового канала (рис. 2). одновременное смещение с возрастом в сторону повышения нижней и понижения верхней пороговых частот звукового диапазона находит биофизическое обоснование сочетанным влиянием эффектов возрастной эволюции улиткового протока и апикальной связки его мембран.

Они приводят к тому, что функциональная (эффективная) длина базилярной пластинки L_f , на которой находятся слуховые рецепторные клетки, определяется очевидной разностью

$$L_f = L_d(t) - L_a(t). \quad (11)$$

Заключение

Таким образом, диапазон воспринимаемых среднестатистическим ухом частот звуков в типичных (стандартных) условиях определяется возрастом человека. Функциональная (эффективная) длина базилярной мембраны может служить количественной мерой скорости разрушения структур внутреннего уха (рис. 31).

Этот эффект морфологически также обусловлен естественным развитием человека и его органа слуха и протекает длительное время, в течение всей жизни человека.

Рис. 3. Расчет частоты звука, раздражающей рецепторы на координате x (тонкая линия), или на координате l (жирная линия) : а – в обычной, б – в полулогарифмической системе координат.

1. Helmholtz H. Die Lehre den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Braunschweig: F. Vieweg und Sohn; 1863.
2. von Békésy G. Experiments in Hearing. NY – Toronto – London: McGraw-Hill Book Co.; 1960.
3. Яшин С.С., Дроб В.В., Ширязданов Р.У. Сравнительная характеристика влияния различных типов наушников на слух // В сб.: Современные аспекты профилактики заболеваний Сборник материалов II Межрегиональной студенческой научно-практической конференции с международным участием. 2017. С. 202-203.
4. Ovchinnikov E.L., Peskov P.V., Ivanov V.V., Ovchinnikova Y.V. Real human hearing: damage detection and monitoring of the treatment effectiveness. // Key Engineering Materials. 2013. Т. 569-570. С. 997-1004.
5. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Математическое обеспечение проблем биоакустики и психофизики слуха. 1. Дифференциальные уравнения в обосновании распределения слуховых рецепторов по частотам. // Сб.: Образование и наука: современное состояние и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 112-118.
6. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Математическое обеспечение проблем биоакустики и психофизики слуха. 2. Дифференциальные уравнения в обосновании возрастных изменений слуха. // Сб.: Образование и наука: современное состояние и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 118-124.
7. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Вычислительная биология внутреннего уха: апикальная связка мембран улиткового протока – от гипотезы к обсуждению. // Сб.: Наука и образование: проблемы и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 117-121.
8. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Вычислительная биология внутреннего уха: расчет линейных параметров улиткового протока. // Сб.: Наука и образование: проблемы и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 121-125.
9. Ovchinnikov E.L. The organ of hearing and human hearing. Part 1. Biophysical substantiation of age standards // 54th Workshop and Symposium on Inner Ear Biology. Hannover, 2017. P.n. 131.
10. Ovchinnikov E.L., Yashin S.S. The organ of hearing and human hearing. Part 2. Frequent perception standards // 54th Workshop and Symposium on Inner Ear Biology. Hannover, 2017. P.n. 127.
11. Tarasenko D.S., Yashin S.S., Davydkin-Gogel M.M., Krivonos A.S., Ovchinnikov E.L. The organ of hearing and human hearing. Part 3. Age frequency standards // 54th Workshop and Symposium on Inner Ear Biology. Hannover, 2017. P.n. 128.
12. Yashin S.S., Tarasenko D.S., Davydkin-Gogel M.M., Krivonos A.S., Ovchinnikov E.L. The organ of hearing and human hearing. Part 3. Age morphological standards // 54th Workshop and Symposium on Inner Ear Biology. Hannover, 2017. P.n. 132.
13. Овчинников Е.Л. Акустоволновая модель слуха: биофизическая концепция. Клинические приложения. // Росс. оториноларингол. – 2002. – № 3(3). – С. 71 – 76.
14. Яшин С.С., Ширязданов Р.У., Дроб В.В., Колдомасов И.В. Акустоволновая модель слуха по Овчинникову – новый этап в развитии отологии. // Наука и образование в современном мире. 2015. № 7 (7). С. 35-39.
15. Ovchinnikov E.L. Acoustic-Wave Hearing Model, The Initial Stage-C: Hydroacoustics of the Inner Ear (Sound Field Formation in the Cochlea) // J. Appl. Bioinform. Comput. Biol., 2014, 3:2, p. 1 of 6. <http://dx.doi.org/10.4172/2329-9533.1000112>.
16. Овчинников Е.Л. Акустоволновая модель слуха. Монография. / Е.Л. Овчинников // Изд. ScienceCentre, 2016, 128 с.
17. Овчинников Е.Л. Акустический Декамерон: ДесятиГлава о дифференциальных уравнениях в биоакустике и психофизике слуха//Science Centre. – 192 с.
18. Овчинников Е.Л. Звук и слух: эксперименты, теория, практика. // Изд. СНЦ РАН, 2012.
19. Овчинников Е.Л., Марков И.И. Морфофункциональная организация слуховых рецепторов на базилярной мембране улитки. Морфологические ведомости. 2011. № 4. С. 7-18.
20. Овчинников Е.Л., Яшин С.С. Морфофункциональная основа механизмов влияния звука на слуховые рецепторы. // Сб. Научный диалог: Вопросы медицины, по материалам международной научно-практической конференции 15 июня 2017 г. – С. 30-36.
21. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Ромашова Н.А., Владимирова Т.Ю., Минаева Т.И. Компьютерная биология внутреннего уха: 2. Апикальная связка мембран улиткового протока, неинвазивный расчет осевых параметров. Наука и образование в современном мире. 2015. № 2 (2). С. 9-11.