

М. М. Давыдкин-Гогель, Д. С. Тарасенко
УХО И СЛУХ. ВОЗРАСТНЫЕ СТАНДАРТЫ
Научный руководитель – канд. биол. наук, доц. Е.Л. Овчинников
Кафедра медицинской физики, математики и информатики
Самарский государственный медицинский университет, Самара

Резюме. На основе акустической модели слуха представлено биофизическое моделирование частотно-временных изменений восприятия ухом звука и морфофункциональное моделирование изменения линейных параметров структур уха, а также влияние на ухо и слух апикальной связки мембран улиткового протока. Дано графическое представление этих процессов, а также их сочетанное влияние.

Ключевые слова: акустическая модель слуха, частотно-временной закон развития улитки, линейно-временной закон развития улитки, линейно-частотный закон развития улитки.

Resume. In work on the basis of the acoustic-wave model of hearing, biophysical modeling of frequency-temporal changes in ear perception of sound and morphofunctional modeling of changes in linear parameters of ear structures are presented, as well as the influence on the ear and ear of the apical ligament of membranes of the cochlear duct. A graphical representation of these processes, as well as their combined effect, is given.

Keywords: acoustic-wave model of hearing, frequency-temporal law of cochlear development, linear-temporal law of cochlear development, linear-frequency law of snail development.

Актуальность. Слуховые эффекты с возрастом сопровождаются изменением диапазона воспринимаемых ухом частот [1] и громкости звука.

Отмечается, что для слуха разных людей свойствен различный порог восприятия верхних частот поступающего в ухо звука [1]. Как правило, отмечается снижение его величины, особенно с возрастом. Проблема природы изменения диапазона восприятия ухом звука с установлением биофизических механизмов и характеристик этого временного (возрастного) процесса является важной диагностической, лечебной и профилактической задачей.

К звуковым явлениям, реально наблюдаемым в жизни человека, и связанным с изменением величины воспринимаемого им звукового диапазона помимо указанного ранее снижения верхнего порога относят и повышение с возрастом нижнего предела частоты воспринимаемого звука, а также искажение восприятия звука в любом частотном диапазоне.

Биофизической основой изменения пороговых частот восприятия звука является морфофункциональная акустическая модель слуха, разработанная на кафедре медицинской физики Самарского государственного медицинского университета [2, 3].

В настоящей работе обсудим природу восприятия диапазона частот и морфофункциональные изменения самого уха с возрастом.

Поэтому мы представим моделирование воспринимаемого ухом частотного диапазона, биофизическое обоснование изменению пороговых (верхней и нижней) частотных границ звукового диапазона и использование в практике наблюдаемого феномена.

Цель исследования: биофизическое моделирование процессов возрастной эволюции внутреннего уха.

Методы исследования: математическое моделирование.

1. Биофизическое (вероятностное) обоснование процесса изменения верхней частотной границы с возрастом

Для большого диапазона воспринимаемых человеком звуковых частот от минимальной ($f_0 = 20$ Гц) до максимальной ($f_{m0} = 20$ кГц) установим вероятностный (статистический) закон, выражающий зависимость воспринимаемой величины частотного диапазона от времени. Он основан на базе экспериментальных исследований Георга фон Бекеша, который установил, что снижение порога восприимчивости верхних частот составляет около 80 Гц за каждые полгода жизни человека, или примерно 1% за год.

Пусть с самого момента рождения человека за время Δt в области высоких частот (ВЧ) с предельной частотой восприятия 20 кГц теряется часть ощущаемых частот на 1% за год из общего звукового диапазона. Согласно вероятностным процессам о феномене, можно выдвинуть вероятностную гипотезу, по которой сокращение воспринимаемого диапазона с течением времени пропорционально первоначальной величине самого диапазона и длительности процесса, то есть

$$-\Delta f = r f_m \Delta t. \quad (1)$$

Переходя от конечных разностей в уравнении к бесконечно малым, получаем дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными

$$df = -r f_m dt. \quad (2)$$

Интегрируя это уравнение в определенных интегралах, получаем решение в виде уравнения экспоненциального характера уменьшения верхней пороговой частоты, которое можно назвать частотно-временным законом.

$$f_m(t) = f_{m0} \exp(-rt) \quad (3)$$

В этом уравнении имеет смысл постоянной звукопотерь (скорости снижения верхней частотной границы) ВЧ слуховым органом с единицей измерения $[r] = 1/\text{год}$. Воспользовавшись данными Бекеша о быстроте снижения верхней частоты, имеем $r=0.01/\text{год}$. Графически это уравнение можно интерпретировать в виде экспоненты.

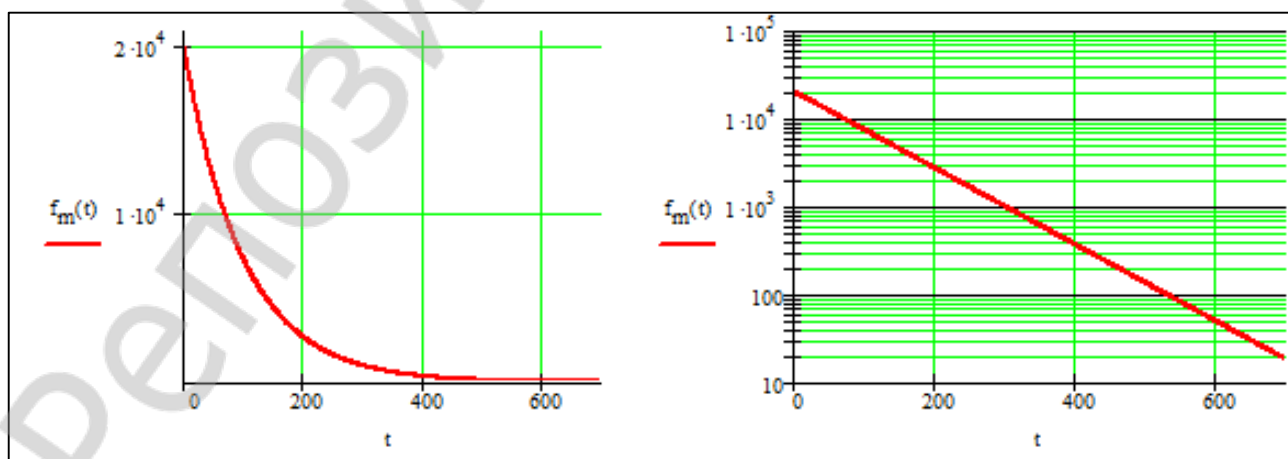


Рисунок 1 – Моделирование частотно-временного закона возрастной эволюции улиткового протока как иллюстрация изменения максимально воспринимаемой им частоты с течением времени

2. Морфофункциональное обоснование процесса изменения верхней частотной границы с возрастом

Этому же процессу можно дать морфофункциональное объяснение, основываясь на акустической модели слуха [4, 5], по которой длина улиткового протока, как параметр его структуры и верхняя пороговая частота связаны уравнением.

$$L(f) = L_0 \cdot 2^{2 \lg(fm/fm_0)} \quad (4)$$

Заменяя значение f выражением (3), получаем соотношение,

$$L(t) = L_0 \exp(-kt) \quad (5)$$

устанавливающее линейно-временной закон развития изменения улиткового протока. В этом законе $k = r \cdot 2 \lg 2 = 0,006/\text{год}$

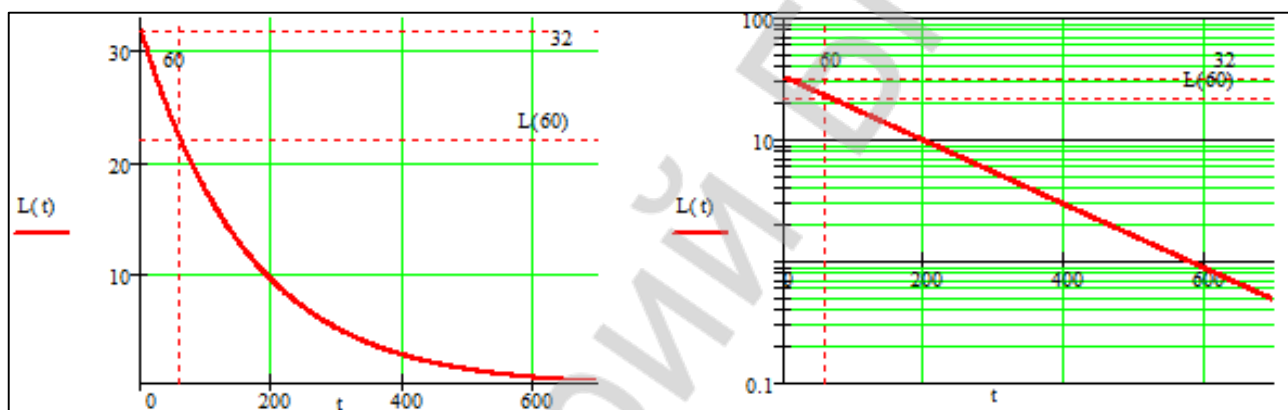


Рисунок 2 – Моделирование линейно-временного закона возрастной эволюции улиткового протока.

3. Биофизическое обоснование изменения восприятия нижней пороговой частоты.

Сама модель (4) дает возможность обосновать наличие нижней границы воспринимаемого звука. Это осуществляется с помощью т.н. апикальной связки мембран [6, 7], новой структуры, проблемы которой разрабатываются на кафедре медицинской физики СамГМУ. С помощью этой модели мы устанавливаем морфологические характеристики связки мембран, в частности, ее ширину. Расчет по этой формуле показывает, что ее стандартная ширина в продольном направлении равна 0,5 мм. Для нее можно провести аналогичное исследование, которое приводит к повышению нижней пороговой частоты. Частотно-временной закон будет также аналогичен, при этом знак коэффициента звукопотерь окажется положительным.

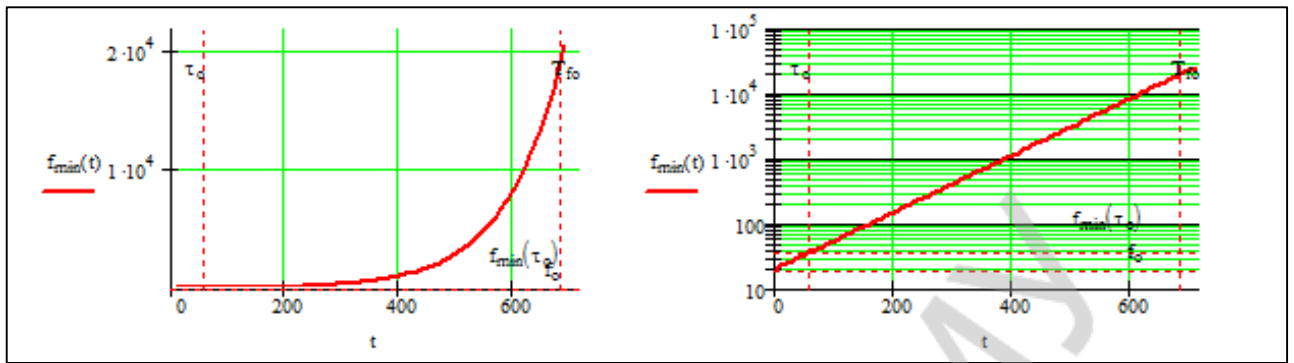


Рисунок 3– Моделирование линейно-временного закона возрастной эволюции апикальной связки мембран.

4. Результаты экспериментов

Мы провели эксперимент с использованием низкочастотного звукового генератора с аттенуатором и головными стереотелефонами. 36 человек в возрасте 18-20 лет прошли исследование. Результаты с вероятностью до 98% совпали с биофизическим моделированием.

Обсуждение. Можно отметить интересную особенность одновременного изменения верхней и нижней пороговых частот в стандартных условиях (что и происходит в природе): графическое решение показывает, что сужение диапазона окажется возможным на протяжении 350 лет с запасом прочности в 3,5 раза, как в технологических стандартах [8, 9]. Такое моделирование представлено на рисунке 4.

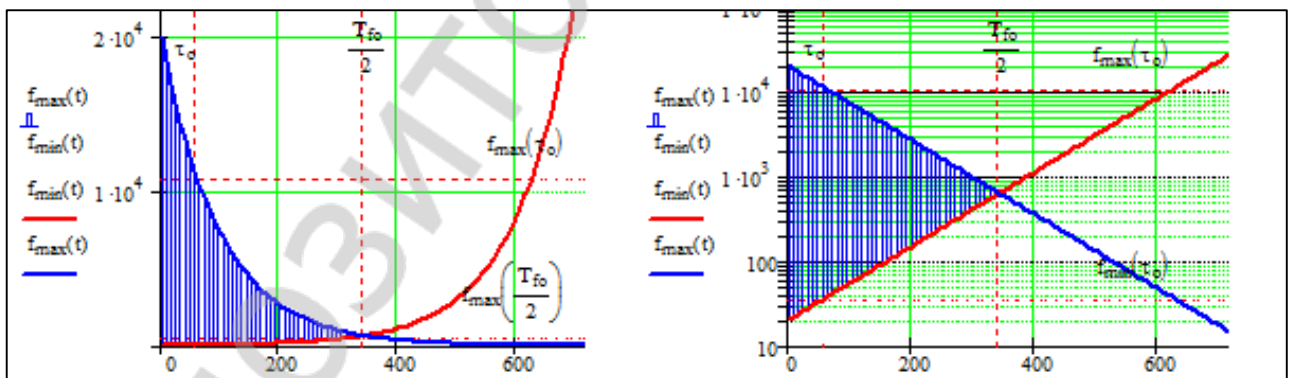


Рисунок 4– Графическое представление сочетанного проявления линейно-временных механизмов влияния звука на улитковый проток

Выводы:

Таким образом, мы подтвердили соответствие экспериментальных результатов их биофизическому моделированию. Сама акустическая модель слуха соответствует объединенному линейно-временному и частотно-временному законам, а также проведенным экспериментам.

Davydkin-Gogel M.M., Tarasenko D.S.
EAR AND HEARING. AGE STANDARDS
Scientific Head – PhD, ass. prof. E.L. Ovchinnikov
Department of Medical Physics, Mathematics and Informatics
Samara State Medical University, Samara

Литература

1. von Békésy G. Experiments in Hearing. NY – Toronto – London: McGraw-Hill Book Co.; 1960.
2. Овчинников Е.Л. Звук и слух: эксперименты, теория, практика. Самара, 2012.
3. Овчинников Е.Л. Акустический Декамерон: ДесятиГлава о дифференциальных уравнениях в биоакустике и психофизике слуха. – Самара.: ScienceCentre.– 192 с.
4. Овчинников Е.Л. Акустоволновая модель слуха: биофизическая концепция. Клинические приложения. // Российская оториноларингология. 2002. № 3. С. 71.
5. Яшин С.С., Ширьязданов 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.
6. Овчинников Е.Л., Марков И.И. Дефиниция и неинвазивный расчёт морфобиологических параметров внутреннего уха человека. // Морфологические ведомости. 2010. № 2. С. 7-16.
7. 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.
8. Минаева Т.И., Овчинников Е.Л., Яшин С.С. Тембр тонов как качество слуха: визуализация состояния и динамики изменения. Наука и инновации в медицине. 2018. № 1 (9). С. 59-65.
9. Овчинников Е.Л., Яшин С.С., Минаева Т.И. Мониторинг-контроль шумовой опасности окружающей среды. Наука и инновации в медицине. 2018. № 1 (9). С. 69-72.