паста «СПЛАТ отбеливание Плюс», стоимость которой в 4 раза ниже. Таким образом, с целью профилактики и после завершения лечения дисколорита зубов целесообразно использовать зубные пасты, в состав которых входит фтор и гидроксиапатит, оказывающие отбеливающее, реминерализующее действие и повышение уровня гигиенического состояния полости рта.

1. Ерофеева Е.С. Повышение качества лечения пациентов с дисколоритами фронтальных зубов (экспериментально-клиническое исследование) // Дис ... к.м.н. Пермь. – 2010. – с. 156.
2. Коммунальная стоматология: учебно-методическое пособие / А.Н. Морозов и [др.]. – Воронеж, 2016. – 125 с.
3. Пропедевтика хирургической стоматологии: учебное пособие / А.Н. Морозов и [др.]. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. № 3. С. 158 - 159.
4. Профилактическая стоматология: Учебник / Э.М. Кузьмина, О.О. Янушевич. – М.: Практическая медицина, 2017. – 544 с.
5. Салтовец М.В. Клинико-лабораторная оценка эффективности зубных паст с отбеливающим эффектом: автореф. дисс...канд. мед. наук: - Москва, 2011, 24 с.
6. Чиркова Н.В. Аспекты влияния профессионального отбеливания на твердые и мягкие ткани полости рта / Н.В. Чиркова и [др.] // Medicus international medical journal. - 2017. № 4 (16). – С. 60-70.

**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. 1.
Частотно-временной закон восприятия звука**

*Самарский государственный медицинский университет
(Россия, Самара)*

doi 10.18411/gq-30-11-2017-10

idsp 000001:gq-30-11-2017-10

Резюме

Цель: теоретическое обоснование частотно-временного закона восприятия звука

Результаты: проанализированы результаты экспериментов и представлен теоретический результат в виде частотно-временного закона изменения восприятия звука с возрастом

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

Введение

Известно [1], что улитка внутреннего уха человека действительно напоминает по форме улитку – конусообразную спираль с $23/4$ завитками. Ее высота приближенно равна 5 мм, диаметр у основания около 9 мм и длина ее средней части около 35 мм. Отмечается [2], что после рождения улитка, а точнее ее костное образование, не развивается.

Слуховые эффекты сопровождаются, особенно с возрастом, изменением диапазона воспринимаемых ухом частот звука [3-5]. Отмечается, что для слуха разных людей свойствен различный порог восприятия верхних частот поступающего в ухо звука. Как правило, отмечается снижение его величины, особенно с возрастом: по данным G. von Békésy, 1960 [2], снижение порога восприимчивости верхних частот составляет после 40 лет около 80 Гц через каждые полгода жизни человека. Указывается [1] о существовании эффекта, который был назван "апикально-базальным" парадоксом: он проявляется потерей уха воспринимать звуки высокой частоты при разрушениях апикальной части базилярной мембраны, ответственной за восприятие низких звуков. Этиология и механизмы этих экспериментально установленных феноменов восприятия звука устанавливаются. Проблема природы изменения

диапазона восприятия ухом звука с установлением биофизических механизмов и характеристик этого временного (возрастного) процесса является важной диагностической, лечебной и профилактической задачей. В оториноларингологической практике решение этой проблемы не представлено.

Феноменология эффекта временной (возрастной) эволюции улиткового протока

К отмеченным звуковым явлениям, реально наблюдаемым в жизни человека и связанным с изменением величины воспринимаемого им звукового диапазона, таким как:

- снижение с возрастом верхнего предела частоты воспринимаемого звука,
- возрастание с возрастом нижнего предела частоты воспринимаемого звука;

можно отнести третье:

- искажение (с ослаблением вплоть до полной глухоты) восприятия звука в любом частотном диапазоне.

Эти эффекты сопряжены с изменением биологических характеристик улитки и ее физических свойств, которые склонны ко временным морфологическим изменениям [6]. Биофизической основой изменения пороговых частот восприятия звука является морфофункциональная акустическая теория слуха [7-11].

Биофизическое обоснование эффекта временной (возрастной) эволюции улиткового протока

Биофизический подход к проблеме предполагает, что звуковые волны, действуя в течение жизни человека на структуры улиткового протока, производят непрерывное разрушение его незакрепленной у геликотремы апикальной части, укорачивая длину протока. Этот процесс обусловлен естественным развитием человека (возрастными эффектами). Но он может быть также усилен рядом внешних и внутренних факторов: физических (температурой среды и организма, интенсивностью звука, другими воздействиями), физиологических (повышением давления крови и внутрилабиринтных жидкостей, физиопроцедур), фармакологических и пр [12, 13]. По этой причине улитковый проток и соответственно базилярная мембрана (как основная, несущая на себе рецепторные клетки, генерирующие нервные импульсы, приводя к слуховым ощущениям) и другие его структурные единицы естественным образом в апикальной части разрушаются, и длина их непрерывно сокращается.

Рис. 1. Схема воздействия звуковых волн в перилимфатической камере на апикальную связку мембран улиткового протока (L_r – длина улиткового протока, L_a – ширина апикальной связки для моментов времени 1 и 2).

Биофизическое обоснование линейно-частотного закона

Методом аудиометрии как исследованием спектральной характеристики уха на пороге чувствительности становится возможным установление эффекта возрастной (временной) эволюции улиткового протока внутреннего уха человека, разработка его

биофизических механизмов и характеристик, теоретическое обоснование и физиологическая интерпретация его законов [14].

Показано [15], что в перилимфатической камере выполняются распределение скорости звука и координат базилярной мембраны и по частотам как функции воспринимаемой ухом частоты звука. При этом устанавливается связь длины $L_d = \ell_s(f_{\max})$ базилярной мембраны с воспринимаемой ею максимальной (верхней пороговой) частотой $f_{\max}$ звука в сравнении с длиной $L_0 = 32$ мм стандартной базилярной мембраны, воспринимающей максимальную частоту $f_{m0} = 20$ кГц:

$$L_d = L_0 \cdot 2^{\lg \frac{f_{\max}}{f_{m0}}} \quad (1)$$

как основное уравнение акустической модели слуха. Соотношение (1) соответствует экспериментам G. von Békésy, 1947, для базилярной мембраны. Но она является структурной единицей улиткового протока внутреннего уха, также как и остальные его составляющие: преддверная, покровная и сетчатая мембраны, эндо- и кортилимфатическая камеры (протоки). Поэтому данное соотношение (1) можно расширить не только как простую связь длины базилярной мембраны с воспринимаемой ею максимальной частотой звука $f_{\max}$, но и как линейно-частотный закон (закон соответствия длины частоте) для улиткового протока и его структур (рис 2).

Рис. 2. Иллюстрация линейно-частотного закона возрастной эволюции улиткового протока.

Биофизическое обоснование частотно-временного закона

Для улиткового протока экспериментальный факт G. von Békésy (1960) о снижении восприятия частоты звука в области ВЧ можно принять как статистический феномен: он утверждал, что за каждые полгода человек теряет по 80 Гц (за год ~1%) ВЧ звукового диапазона. Для большого диапазона воспринимаемых человеком звуковых частот установим статистический закон, выражающий зависимость воспринимаемой величины частотного диапазона от времени.

Пусть за время Δt в области ВЧ с граничной частотой восприятия $f = f_{m0}$ теряется часть ощущаемых частот до $f_{\max}$ на величину $\Delta f = f_{m0} - f_{\max}$ из общего звукового диапазона. Можно считать, что сокращение воспринимаемого диапазона на $-\Delta f$ с течением времени пропорционально первоначальной величине самого диапазона и длительности процесса, то есть

$$-\Delta f = r \cdot f_m \Delta t, \quad (2)$$

где r – постоянная звукопотерь ВЧ слуховым органом с единицей измерения $[r] = 1 \text{ год}^{-1}$.

Для идеи G. von Békésy постоянная звукопотеря ВЧ имеет смысл вероятности смещения границы верхней пороговой частоты воспринимаемого звука в сторону ее снижения и является индивидуальной характеристикой каждого человека.

Переходя от конечных разностей в уравнении (2) к бесконечно малым, получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{df}{f} = -r \cdot dt. \quad (3)$$

Решением которого является функция

$$r = \frac{1}{t} \cdot \ln \frac{f_{mo}}{f_{max}(f)}. \quad (4)$$

Используя идею G. von Békésy (1960) о скорости смещения границы верхней пороговой частоты воспринимаемого звука в сторону ее снижения как начальное условие, рассчитаем величину коэффициента звукопотери ВЧ. Поскольку, по G. von Békésy, для типичного процесса человек за первый год жизни ($\Delta t = 1$ год) утрачивает восприятие верхней частоты звука примерно на 1%, то по прошествию этого промежутка времени его пороговая граница уменьшится от $f_{mo} = 20$ кГц до $f_{max} = 0.99 f_{mo} = 19.8$ кГц. Тогда

$$r = \frac{1}{\Delta t} \cdot \ln \frac{f_{mo}}{f_{max}}, \quad (5)$$

и количественно $r = 0.01$ год⁻¹.

Соотношение (4) являет собой частотно-временной закон возрастной эволюции улиткового протока. Результаты расчета по соотношению (4) показаны графически на рис. 3. Здесь заданы некоторые константы, характеризующие параметры уха: пороговые, нижняя $f_0 = 20$ Гц, и верхняя $f_{mo} = 20$ кГц, частоты, воспринимаемые стандартным ухом; представлена идея G. von Békésy (1960) о скорости звукопотери ВЧ в виде соотношения $f_{max} = 0.99 f_{mo}$ с численным расчетом $f_{max} = 19.8$ кГц; задана формула для расчета скорости звукопотери ВЧ r и приведено ее значение $r = 0.01$ год⁻¹. Представлено решение дифференциального уравнения (2.5) в виде функции (2.6). Внизу слева представлен график зависимости $f_{max}(t)$ в обычном масштабе, справа – в полулогарифмическом.

Рис. 3. Иллюстрация частотно-временного закона возрастной эволюции улиткового протока. Расчет времени T_{fo} , в течение которого верхняя пороговая частота f_{mo} снизилась бы до нижней f_0 (T_{fo} – "срок службы" органа слуха: $T_{fo} \sim 700$ лет).

Для апикальной связки мембран улиткового протока можно провести аналогичное обоснование частотно-временного закона при установлении возрастных изменений нижней пороговой частоты при стандартной минимально воспринимаемой нижней частоте $f_0 = 20$ Гц [16, 17]. Его можно представить в виде (4) с измененным знаком в экспоненте:

$$f_{\min}(t) = f_0 \cdot e^{rt}. \quad (6)$$

Закон (6) объясняет противоположный эффект: рост со временем (с возрастом) нижней пороговой частотной границы воспринимаемого звука $f_{\min}$. Об этом феномене в своих работах G. von Békésy не упоминает, хотя в реальной жизни эффект наблюдается всегда. Апикальной связкой мембран улиткового протока поглощены приапикальные слуховые рецепторы, ответственные за восприятие НЧ звукового диапазона, а ее шириной ограничена нижняя пороговая граница ощущаемого звука.

Соотношение (6) можно определить как частотно-временной закон возрастной эволюции апикальной связки мембран улиткового протока и структур внутреннего уха [18-19]. Графическое решение (6) представлено на рис. 4, для продолжительного промежутка времени.

Рис. 4. Иллюстрация частотно-временного закона для апикальной связки мембран улиткового протока.

Совместное проявление обоих законов вычленяет из общего звукового интервала $20 \text{ Гц} \div 20 \text{ кГц}$ тот диапазон, который оказывается воспринимаемым для определенного возраста. Такой процесс представлен на рис. 5, на котором показана стандартная динамика изменения воспринимаемого диапазона звука за продолжительный промежуток времени [20].

Рис. 5. Иллюстрация общего частотно-временного закона: совместное действие на улитковый проток и апикальную связку.

Заключение

Таким образом, представлен закон частотно-временного изменения восприятия звука, основанный на экспериментальных данных Бекеша.

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. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Ма-тематическое обеспечение проблем биоакустики и психофизики слуха. 1. Дифференциаль-ные уравнения в обосновании распределения слуховых рецепторов по частотам. // Сб.: Образование и наука: современное состояние и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 112-118.
4. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Ма-тематическое обеспечение проблем биоакустики и психофизики слуха. 2. Дифференциаль-ные уравнения в обосновании возрастных изменений слуха. // Сб.: Образование и наука: со-временное состояние и перспективы развития. Тамбов, 2014. С. 118-124.
5. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Вы-числительная 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.
6. Овчинников Е.Л., Адыширин-Заде К.А., Александрова Н.А., Владимирова Т.Ю. Вы-числительная биология внутреннего уха: расчет линейных параметров улиткового протока. // Сб.: Наука и образование: проблемы и перспективы развития: Тамбов, 2014. С. 121-125.
7. Овчинников Е.Л. Акустоволновая модель слуха: биофизическая концепция. Клини-ческие приложения. // Росс. оториноларингол.– 2002. – № 3(3). – С. 71 – 76.
8. 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 совре-менном мире. 2015. № 7 (7). С. 35-39.
9. 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>.
10. Овчинников Е.Л. Акустоволновая модель слуха. Монография . / Е.Л. Овчинников // Изд. ScienceCentre, 2016, 128 с.
11. Овчинников Е.Л. Акустический Декамерон: ДесятиГлава о дифференциальных уравнениях в биоакустике и психофизике слуха//Science Centre. – 192 с.
12. Яшин С.С., Дроб В.В., Ширьязданов Р.У. Сравнительная характеристика влияния различных типов наушников на слух // В сб.: Современные аспекты профилактики заболева-ний Сборник материалов II Межрегиональной студенческой научно-практической конфе-ренции с международным участием. 2017. С. 202-203.
13. 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.
14. Овчинников Е.Л. Звук и слух: эксперименты, теория, практика. // Изд. СНЦ РАН, 2012.
15. Овчинников Е.Л., Марков И.И. Морфофункциональная организация слуховых ре-цепторов на базилярной мембране улитки. Морфологические ведомости. 2011. № 4. С. 7-18.
16. Ovchinnikov E.L. The organ of hearing and human hearing. Part 1. Biophysical substan-tiation of age standards // 54th Workshop and Symposium on Inner Ear Biology. Hannover, 2017. P.n. 131.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
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.