



**COMPANY GROUP**  
**«INTELLEKT»**

**SCIENCECENTRE**

**Наука и образование в современном мире. Сборник научных трудов, выпуск 1: по материалам международной научно-практической конференции, Москва, 30 июня 2015 г.**

**Е.Л. Овчинников, К.А. Адыширин-Заде, Н.А. Ромашова,  
Т.Ю. Владимирова, Т.И. Минаева**

**Прикладная биоинформатика в исследовании слуха: 1. Статистические  
методы в обосновании распределения слуховых рецепторов  
по воспринимаемым частотам**

*Самарский государственный медицинский университет, Самара, Россия*

*DOI:10.18411/sc2015-06-4-6*

**Реферат**

**Цель:** Математическое обоснование к установлению распределения координат слуховых рецепторов по воспринимаемым ими звуковым частотам.

**Объекты и методы:** Исходными элементами являются результаты классической экспериментальной базы изучения слуха. Использовались статистические методы анализа, общетеоретический подход и математического моделирования.

**Результаты:** Представлено статистическое обоснование аналитического решения распределения слуховых рецепторов по воспринимаемым ими звуковым частотам.

**Ключевые слова:** акустическая модель слуха; экспериментально-теоретическое обоснование; статистическая гипотеза; распределение слуховых рецепторов по частотам

**ВВЕДЕНИЕ**

Согласно теории Н. Helmholtz [1], структуры слуховой системы зависимы от частоты звука, что было экспериментально доказано многими исследователями [2, 3]. Наиболее полно эта зависимость была отражена в

работах G. von Bekesy [4]; она стала весьма значимой, заслуженно получив статус классической: ее итоги "широко цитируются сегодня" [5]. Но научно-теоретического обоснования экспериментальная база не получила, "старые вопросы остаются без ответа" [6]. Аналитическое решение распределения слуховых рецепторов по частотам остается проблематичным.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **1. Общие замечания**

В соответствии с диалектическим познанием природы методологическая разработка теоретических знаний и установление новых закономерностей проводится на основе экспериментальных результатов с их математическим обоснованием в несколько этапов. Такой подход к слуховым эффектам представляется впервые. Для слуха – это:

- обнаружение явлений, в которых проявляется амплитудно-частотная зависимость структур внутреннего уха;
- экспериментальное установление координат рецепторов на базилярной мембране), реагирующих на тестируемые частоты звука.
- математическая обработка полученных результатов и обоснование установленных связей и закономерностей.

### **2. Обоснование метода построения модели**

Классическая экспериментальная база по исследованию слуховых феноменов была создана G. von Bekesy [4]. Из всего множества результатов G. von Bekesy выберем несколько наиболее удобных для математических вычислений. Это – такие, для которых частоты отличаются в 10 раз:  $f_1 = 20$ ,  $f_2 = 200$ ,  $f_3 = 2000$  и  $f_4 = 20000$  Гц, которым соответствуют координаты рецепторов на базилярной мембране  $x_1 = 31.5$ ,  $x_2 = 30$ ,  $x_3 = 24$  и  $x_4 = 0$  мм (рис. 1а, с графическим представлением на рис. 1б, тонкая линия).

Если взять базальный участок за начало координат, то апекс по оси абсцисс будет расположен на координате  $L_0 = 32$  мм. Преобразуем систему координат, взяв за начало отсчета апекс протока. Тогда координаты рецепторов относительно новой системы координат

$$\ell = L_0 - x \tag{1}$$

и будут соответствовать  $\ell_1 = 0.5$ ,  $\ell_2 = 2$ ,  $\ell_3 = 8$ ,  $\ell_4 = 32$  мм (рис. 1б, жирная линия). Приведем тестируемые частоты  $f$  выборки к виду десятичного логарифма их отношения к максимально воспринимаемой ухом частоте  $f_{mo} = 20$  кГц как

$$F = \lg(f/f_{mo}), \tag{2}$$

Таблица 1 Математическая обработка экспериментальных данных (G. von Bekesy, 1960)					Таблица 2 Построение гипотезы	
$F = \lg\left(\frac{f}{f_{mo}}\right)$	f, Гц	x, мм	$\ell = L_0 - x$ , мм	$D = \log_2\left(\frac{\ell}{L_0}\right)$	$\Delta F$	$\Delta D$
-3	20	31,5	1/2	-1	-	-
-2	200	30	2	1	1	2
-1	2000	24	8	3	1	2
0	20000	0	32	5	1	2

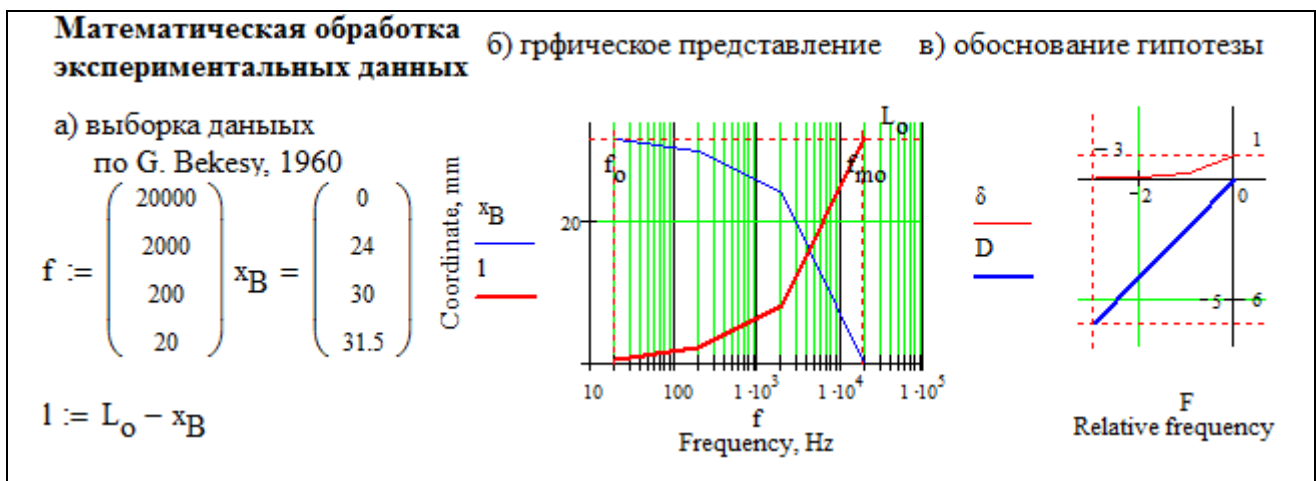


Рис. 1. Статистическая обработка экспериментальных данных (по [4]).

а координаты рецепторов  $\ell$  – к виду двоичного логарифма их отношения к стандартной длине базилярной мембраны  $L_0 = 32$  мм как

$$D = \log_2(\ell/L_{mo}). \quad (3)$$

Полученные результаты представим таблично. Как видно из таблицы 1, величины  $F$  и  $D$  коррелируют между собой, причем коэффициент корреляции равен 1, что означает наличие функциональной связи. Тогда рассмотрим приращения десятичного логарифма отношения тестируемой частоты к максимально воспринимаемой ухом частоте  $\Delta F$  и приращения двоичного логарифма отношения координат рецепторов к стандартной длине базилярной мембраны  $\Delta D$  (таблица 2). Анализ расчета дает право высказать удивительно простую гипотезу: приращение десятичного логарифма относительной частоты относительно максимально частоты  $\Delta F$  пропорционально приращению двоичного логарифма безразмерной координаты рецепторов относительно ее стандартной длины  $\Delta D$ .

Математически это можно представить в виде экспериментального соотношения

$$\Delta D = k \Delta F. \quad (4)$$

### **ОБСУЖДЕНИЕ**

Теоретическое обоснование этой гипотезы состоит в том, чтобы, переходя от конечных разностей к бесконечно малым, получить дифференциальное уравнение, решение которого может привести к искомому результату.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Таким образом, представлена статистическая гипотеза в виде уравнения линейной регрессии, решение которого позволит получить аналитическую функциональную зависимость распределения слуховых рецепторов на базилярной мембране (в органе Корти) по воспринимаемым ими звуковым частотам. Кроме теоретического значения установления соотношений [7, 8], они приобретают успешность в вычислительной биологии [9, 10]. Модель

получила серьезное научно-теоретическое обоснование, представленное как полумодель в патенте [11], статьях [12, 13], и как полная модель – в работе [14].

### **Литература**

1. Helmholtz H. Die Lehre den Tonempfindungen als physiologische Grundlage für die Theorie der Musik. Braunschweig: F. Vieweg und Sohn; 1863.
2. Koenig W. A new frequency scale for acoustic measurements. Bell Laboratory Record, 1949.
3. Schuknecht HF. Pathology of the Ear. A Commonwealth Fund Book. Harvard Univ. Press, Cambridge Massachusetts; 1974.
4. von Békésy G. The variations of phase along the basilar membrane with sinusoidal vibrations. // J. Acoust. Soc Am. 1947, 19:452–460.
5. Bell A. Hearing: Travelling Wave or Resonance? PLoS Biol, 2004; 2(10). 1521 – 1523.
6. Dallos P. Organ of Corti Kinematics. J. of the Association for Research in Otolaryngol, 2003; Springer-Verlag, NY, doi: 10.1007/s10162-002-3049-z.
7. 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.
8. 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.
9. 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.

10. 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.

11. Овчинников Е.Л., Ерёмина Н.В. Способ выявления биофизических процессов, реализующих механизм и биофизическую (волновую) модель слуха человека. // Патент RU № 2146878 С1 РФ от 27.03.2000 по заявке № 97111773 от 08.07.1997.

12. Овчинников Е.Л. Акустическая волновая модель слуха: биофизическая концепция. Клинические приложения. // Росс. оториноларингол.– 2002. – № 3(3). – С. 71 – 76.

13. Ovchinnikov EL. Acoustic-wave hearing model, initial stage: the sound transduction in the inner ear. / E.L. Ovchinnikov, V.V. Ivanov, Yu.V. Ovchinnikova // European Science and Technology: 3rd International scientific conference, Munich, Germany, 2012, p. 524-535.

14. 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>.

**E.L. Ovchinnikov, K.A. Adyshirin-Zade, N.A. Romashova, T.Yu. Vladimirova,**

**T.I. Minaeva**

*SamSMU, Samara, Russia*

## **APPLIED BIOINFORMATICS IN HEARING RESEARCH:**

### **1. STATISTICAL METHODS IN SUBSTANTIATION OF ACOUSTICAL RECEPTORS DISTRIBUTION ON THE PERCEIVED FREQUENCIES**

*Purpose:* Mathematical substantiation to establishment of distribution of coordinates of acoustical receptors on the sound frequencies perceived by them.

***Objects and Methods:*** Initial elements are results of classical experimental base of studying of hearing. Statistical methods of the analysis, general-theoretical approach and mathematical modeling were used.

***Results:*** Statistical justification to establishment of the analytical solution of distribution of acoustical receptors on the sound frequencies perceived by them is presented.

***Keywords:*** acoustic-wave hearing model; experimental and theoretical substantiation; statistical hypothesis; distribution of acoustical receptors on frequencies.