

# ТЕМБР ТОНОВ КАК КАЧЕСТВО СЛУХА: ВИЗУАЛИЗАЦИЯ СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ ИЗМЕНЕНИЯ

## TONE TIMBRE AS HEARING QUALITY: VISUALIZATION OF THE CONDITION AND DYNAMIC PATTERN

Минаева Т.И.

Овчинников Е.Л.

Яшин С.С.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный  
медицинский университет» Минздрава России

Minaeva TI

Ovchinnikov EL

Yashin SS

Samara State  
Medical University

**Цель** — дефиниция воспринимаемого тембра тонов как качества слуха. Установление критерия качества слуха и оценки эффективности профилактики и лечения слуховых расстройств и сопутствующих патологий.

**Объекты.** Аудиометрические показатели, полученные с помощью всечастотного звукового генератора у пациентов с нарушениями слуха.

**Методы.** Аудиометрический с использованием всечастотного звукового генератора, методы математического расчета и анализа.

**Результаты.** На основе экспериментов и компьютерного моделирования дано представление о тембре воспринимаемого звука как о качестве слуха человека. Представлено использование критерия качества слуха как величины для оценки эффективности лечения слуховых расстройств и сопутствующих патологий, врачебных манипуляций и физиотерапевтических процедур для экспресс- и мониторинг-контроля состояния слуха.

**Выводы.** Оценка качества слуха и эффективности профилактических и лечебных процедур. Результаты исследования безопасны, воспроизводимы, мониторинг быстр, визуализирован и надежен.

**Ключевые слова:** тембр звуков (тонов), количественная оценка тембра, качество слуха

**Aim** — definition of perceived timbre of sounds (tones) as hearing quality; determining the criterion of hearing quality and assessment of effectiveness of the prevention and treatment of hearing disorders and concomitant pathologies.

**Materials.** Audiometric indicators obtained with the use of all-frequency sound generator in patients with hearing disorders.

**Methods.** Audiometric method with the use of all-frequency sound generator; methods of mathematical calculation and analysis.

**Results.** The performed experiments and computer simulation showed that the timbre of perceived sound represents the hearing quality. Hearing quality criterion can be used to assess the effectiveness of treatment of hearing disorders and concomitant pathologies, medical manipulations and physical therapy for rapid control and monitoring of the hearing state.

**Conclusions.** Assessment of the hearing quality and the effectiveness of preventive and therapeutic measures. Results of the study are safe and reproducible; monitoring is fast, visualized and reliable.

**Keywords:** sound (tone) timbre, quantitative evaluation of timbre, hearing quality

### ■ ВВЕДЕНИЕ

Звук на слух — тон — как слуховое ощущение принято оценивать его психофизическими коррелятами: высотой, громкостью и тембром. Эти величины с точки зрения акустики являются следствием изменения во времени всего трех физических параметров звука: частоты, силы (энергии, давления), интенсивности и гармонического спектра.

Характерным свойством любых источников звука является то, что они производят не только одночастотные (гармонические), но и сложные сигналы, состоящие из гармонических рядов. Ухо воспринимает звук как тоны, разбивая их на составляющие. Объективно такие звуки различаются по сложности и составу гармонического спектра. Субъективной оценкой восприятия звука, отражающей в целом характерность звучания сложных

сигналов, является тембр: слуховые ощущения представляются тонами определенной высоты, громкости и состава. Тембр тонов предполагает качественное описание воспринимаемого звука. Но оказывается, что воспринимаемый тембр тонов может быть подвержен количественным расчетам.

Поставленная проблема заключается в обосновании понятия тембра тонов (звуков) как характеристики качества слуха и его количественного расчета для оценки эффективности профилактических и лечебных мероприятий при слуховых расстройствах.

Существующий в настоящее время аудиометрический способ исследования остроты слуха определяет уровни громкости тонов на нескольких фиксированных частотах. Методика использования всечастотного звукового генератора, обладающая большей информативностью, еще не получила широкой распространенности. Но она использовалась в наших исследованиях, поскольку именно она необходима для оценки индивидуальных характеристик слуха (качество слуха).

## ■ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования проводились в аудиометрической лаборатории с использованием всечастотного звукового генератора для определения пороговых частотных и энергетических величин.

Акустическая модель слуха [1], основанные на ней физиологические, био- и психофизические представления и механизмы восприятия человеком частоты и интенсивности/давления звука [2] позволяют провести исследования восприятия тембра ощущаемых на слух тонов. Появляется возможность решать практические задачи по количественной оценке тембра как качества слуха. В этом случае характер звучания оценивался числом воспринимаемых тонов и совокупностью их количественных параметров: высотой (в мелах) и громкостью (в фонах).

### 1. Дефиниция воспринимаемого тембра как качества слуха. Научно-теоретическое и методологическое обоснование

Спектр звуков, по определению, устанавливается как набор частот  $f$ , соответствующих амплитуд энергии/давления звуковых волн  $A$ , существующих в рассматриваемом волновом пакете. И частота звуков, и амплитуда энергии/давления могут быть измерены, именно поэтому спектр звуков является объективной их характеристикой. Акустическое поле, создаваемое всевозможными звуками, способными производить комфортное слуховое ощущение, геометрически представляется в системе координат «частота — амплитуда» прямоугольником со сторонами по частоте от минимально воспринимаемой  $f_o = 20 \text{ Гц}$  до максимальной  $f_{mo} = 20 \text{ кГц}$  и по амплитуде уровней энергии/давления от нулевой до максимальной  $A_{mo} = 130 \text{ дБ}_A$ . Для толерантных звуков, выдерживаемых ухом без структурных разрушений непродолжительное время, диапазон звуков несколько уширяется по уровням энергии/давления до максимального  $A_{max} = 150 \text{ дБ}_A$ . Для конкретного сигнала

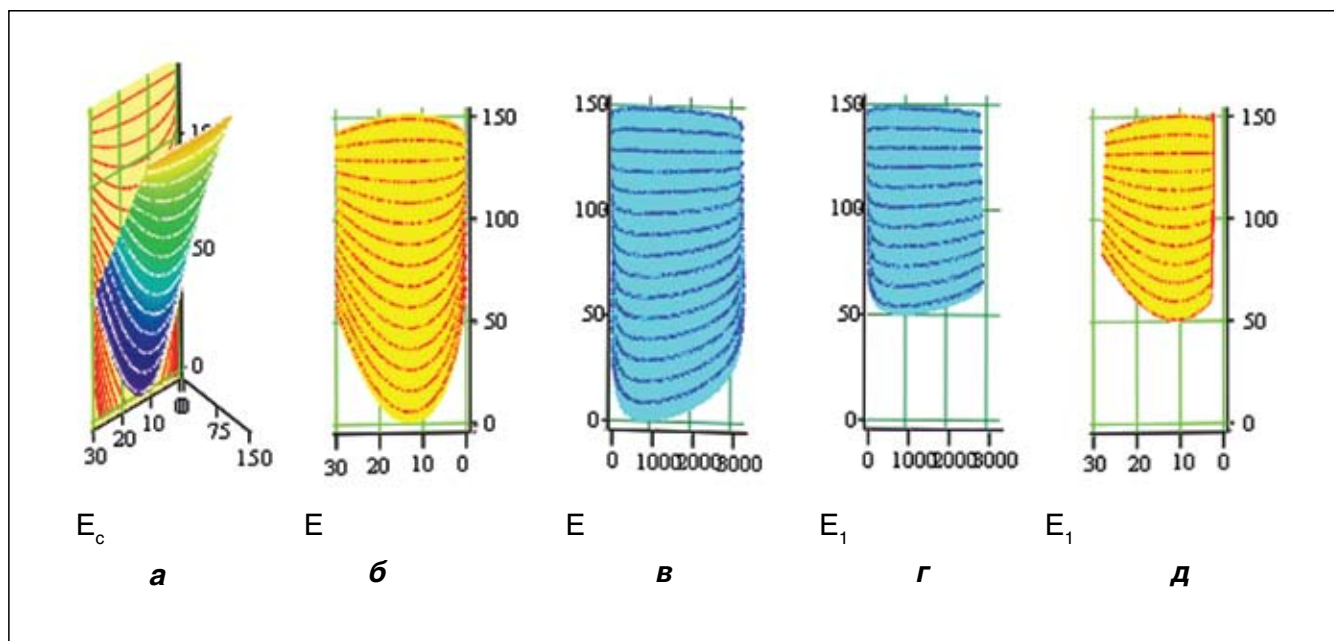
звуковое поле иллюстрируется точками в двумерной системе координат «частота — уровни энергии/давления»: чаще — огибающими кривыми (для сложного сигнала как сплошной спектр, например, в случае шума), или вертикальными параллельными прямыми  $A(f)$  (для сложных звуков нешумового характера как линейчатый спектр).

Инструментально можно измерить частоту и давление звука, но человек ощущает эти характеристики как высоту и громкость, которые составляют тембр. Однако эти величины не могут быть подвержены измерениям: именно поэтому тембр тонов является субъективной характеристикой воспринимаемых звуков. Первый эвристический расчет числа воспринимаемых тонов приведен в работе [2], согласно которому человек способен различать порядка 100 уровней громкости, на каждом из которых до 3000 тонов по высоте. При таком подходе человек оказывается способным к восприятию около 300 тысяч различных по высоте и громкости тонов.

Взгляды о восприятии звуков становятся более информативными после обоснования представления громкости тонов, производимых звуками произвольной частоты и интенсивности/давления с учетом закона Вебера—Овчинникова [2, 3]. Звуковое поле, определяемое на слух, при этом устанавливается двумя инвариантами: функцией громкости тонов  $E(L, F)$  как зависимости от уровней интенсивности/давления  $L$  и частоты звуков  $F$  и функцией  $E$  громкости тонов  $(L, P)$  как зависимости от уровней интенсивности/давления  $L$  и высоты тонов  $P$ . В акустике ось частот обычно представляется в логарифмической шкале. Удобнее частотную ось выбрать линейной при определении самой частоты как десятичного логарифма относительной частоты относительно максимально воспринимаемой  $f_{mo}$ , т.е.  $F = \log(f/f_{mo})$  с единицей измерения децибел частоты,  $1 \text{ дБ}_F$ . При таком подходе воспринимаемое акустическое поле иллюстративно представляется также двумя инвариантными поверхностями. Для всевозможных комфортных звуков частотой от минимально воспринимаемой ( $F_o = -3 \text{ дБ}_F$ ) до максимальной ( $F_{mo} = 0 \text{ дБ}_F$ ) и уровнями давления от нулевого до максимально комфортного  $L_{mo} = 130 \text{ дБ}_A$  воспринимаемое акустическое поле можно изобразить в 3D представлении (рис. 1а). Эффектно эти поверхности  $E(L, F)$  и  $E(L, P)$  выглядят при их обзоре сверху — как проекции на координатные плоскости (рис. 1б-с), для толерантно воспринимаемых звуков тех же частот с уровнями давления от нулевого до максимального  $L_{max} = 150 \text{ дБ}_A$  [4].

Рационализм такого представления заключается в том, что, во-первых, данные поверхности описывают воспринимаемые звуки как соответствующий им тембр тонов, а во-вторых, площадь криволинейной поверхности может быть рассчитана с использованием двойного интеграла  $\iint ds$ .

Элемент площади  $dS$  приобретает смысл для уровня интенсивности/давления и частоты звуков  $dS = dL \cdot dF$  и для уровня интенсивности/давления и высоты тонов  $dS = dL \cdot dP$ . Для нормально-го слуха (рис. 1а) заменой переменных интеграл



**Рисунок 1.** 3-D представление расчета громкости воспринимаемых тонов: а – в общем виде как зависимость  $E(L, F)$ , фон, от уровней интенсивности/давления звука  $L$ ,  $dB_A$ , ось направлена вверх, и относительной частоты  $F = \lg(f/f_{mo})$ ,  $dB_F$ , ось с масштабом 10 единиц  $= -1 dB_F$  направлена влево-вниз, с проекцией на координатную плоскость в виде равногромких кривых, ось громкости  $E$  направлена вправо-вниз; б, в – как проекция поверхности  $E(L, F)$  на координатную плоскость  $L, F$ ; г, д – как проекция инвариантной поверхности  $E(L, P)$  на координатную плоскость  $L, P$  с осями уровней интенсивности/давления звука  $L$  и высоты тонов  $P$ , мел.

легко сводится до значения  $-F_o \cdot L_{mo}, dB_F \cdot dB_A$  (для звуков тех же частот, но толерантных громкостей (рис. 1б), не приводящих, однако, к деформации структур уха, значение интеграла увеличивается до  $-F_o \cdot L_{max}, dB_F \cdot dB_A$ ).

Инвариант с определением высоты тонов приводит к аналогичному результату: для тонов, громкость которых устанавливается от нулевой до комфортной  $L_{mo}, dB_A$ , а высота тонов – от нулевой до максимальной  $P_{mo} \sim 3250$  мел, имеем  $\iint ds = L_{mo} \cdot P_{mo}, (s)$

мел· $dB_A$ . Для толерантных звуков тех же частот с уровнями интенсивности от минимального  $L_{min}$  до максимального  $L_{max}$  (рис. 1 в) имеем тембр, определяемый значениями до  $(L_{max} - L_{min}) \cdot P_{mo}$ , мел· $dB_A$ .

Тембр тонов конкретного сигнала иллюстрируется точками на этих поверхностях: по их количеству и плотности распределения можно судить о воспринимаемом тембре.

С одной стороны, для каждого отдельного уровня громкости число тонов составляет  $P_{mo}$  мел. Однако, используя правило Рэля, по которому два соседних рецептора не могут одновременно принимать внешние раздражители раздельно, введем коэффициент  $\eta = 1/2$ , уменьшающий число различаемых тонов вдвое, получим число тонов, воспринимаемых на каждом отдельном уровне  $\eta \cdot P_{mo}$  мел.

Однако, с другой стороны, для уха при определении сигнала с вероятностью до  $\mu = 1/2$  (сигнал слышимый или неслышимый) число распознаваемых по громкости тонов уменьшается вдвое и будет составлять  $\mu \cdot L_{mo} dB_A$ . Тогда с одновременным учетом обоих обстоятельств число всех воспринимаемых стандартным ухом человека тонов составит  $\eta \mu \cdot P_{mo} \cdot L_{mo}$  мел· $dB_A$ .

В среде MathCAD имеется возможность взять указанный интеграл программными средствами. Согласно приведенным выше соображениям, число комфортно воспринимаемых ухом тонов, различных по высоте и громкости, может составить для нормального слуха около  $97.5 dB_F \cdot dB_A$  ( $10.5 kB_A \cdot \text{мел}$ ). Для возможных толерантных тонов, допустимо увеличить уровень интенсивности до  $150 dB$ . В этом случае их количество несколько возрастет и составит  $112.5 dB_F \cdot dB_A$  ( $12.2 kB_A \cdot \text{мел}$ ).

С возрастом восприятие звуков меняется. Чаще всего это касается лишь ощущений высоты тонов, связанных с изменениями частотного характера (от возрастных стандартов  $P_{minB} (F_{minB})$  по нижней границе до  $P_{max} (F_{maxR})$  по верхней, соответственно), без нарушений восприятия громкости (рис. 1д–е). Пороговые значения высоты тонов и частот звуков, характерные для каждого человека, можно установить лишь с использованием всечастотного звукового генератора.

Рассчитанный таким образом тембр воспринимаемых тонов становится величиной, характеризующей качество слуха. Индивидуальный характер слуха при этом можно оценить критерием качества слуха  $HQ$ , как относительной величины числа воспринимаемых тонов в данном возрасте к первоначальному их количеству. Предлагаемый нами критерий  $HQ$  является универсальной характеристикой: его значение не зависит ни от выбора частоты звука или высоты тонов, ни от давления звука, ни от единиц их измерения. Более того, из-за малости  $f_{min}$  по сравнению с  $f_{max}$ , и технических проблем с измерением  $f_{min}$ , сложностью измерения этой величины, последней можно пренебречь и расчет тембра значительно упрощается.

$$f_{\max ER_i} = f_{\max EL_i} = HQR\%_i = HQ_L\%_i =$$

2750	8050	61.7	79
2750	6230	61.7	71.4
3780	8200	64.2	79.7
6230	8500	71.4	81.3
6290	8690	71.6	82.3
7510	8990	76.4	84.1

$$L_{\max} = 15 \text{ Bel} \quad L_{\min} = 0 \text{ Bel}$$

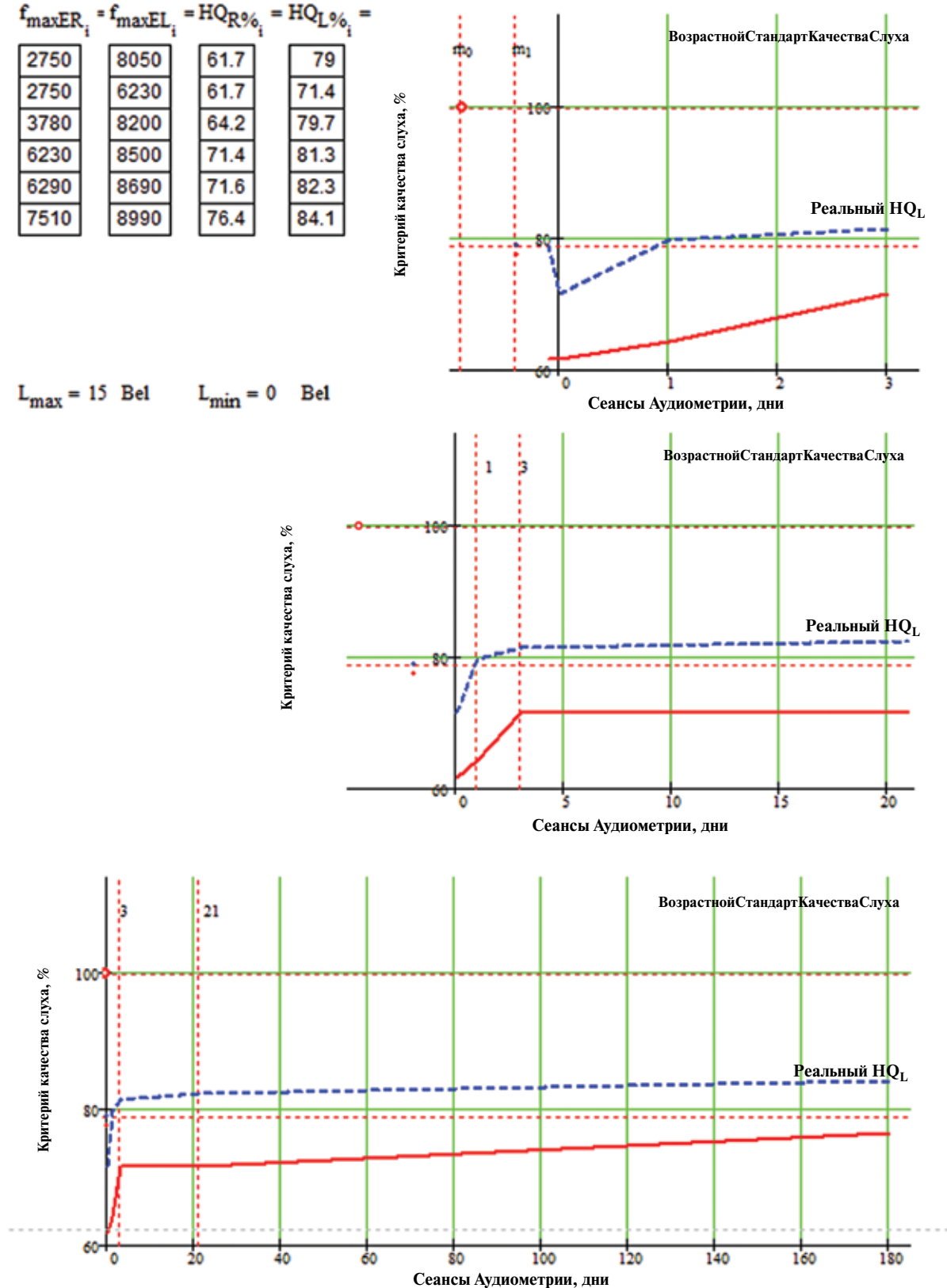
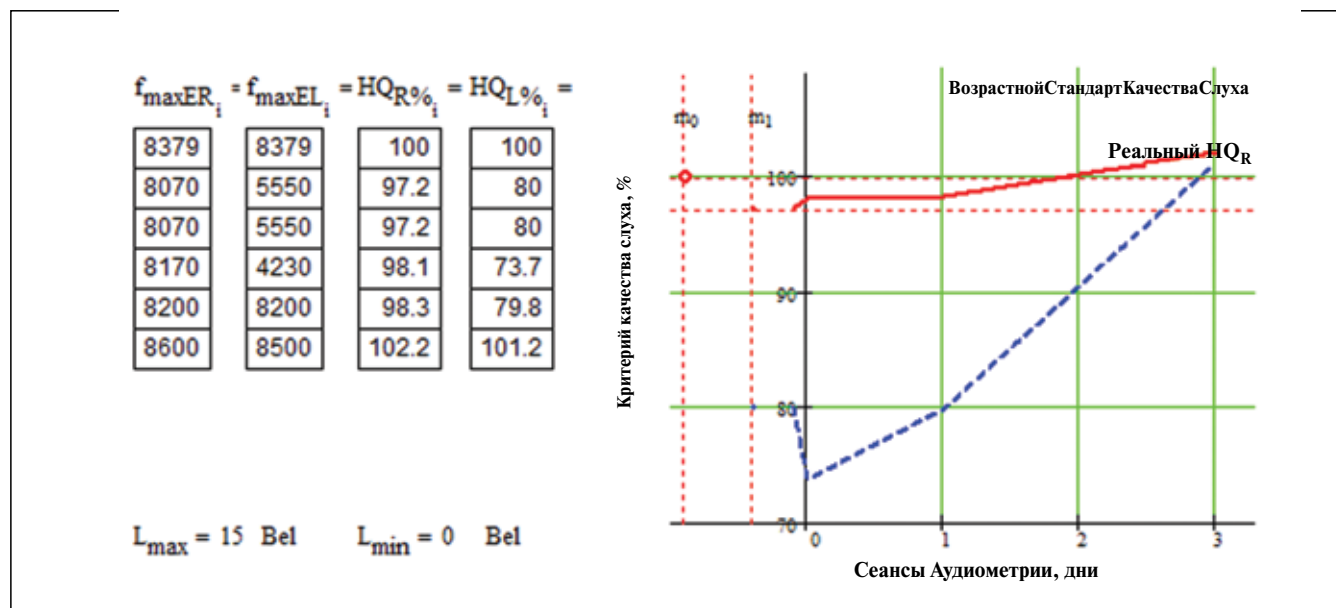


Рисунок 2. Клиническая картина динамики состояния слуха пациента Г., 60 лет (пояснения в тексте).

В реальной ситуации наряду с частотным изменением восприятия звука наблюдается и потеря чувствительности уха к восприятию громкости до  $L_{real}$ . Расчет критерия качества достаточно прост при одинаковом снижении слуха на всех частотах (искомый уровень громкости звуков при этом достаточно определить

лишь для одной частоты, например, для стандартной частоты  $f_c = 1 \text{ кГц}$ ). В этом случае для расчета критерия  $HQ$  (в процентах), можно использовать очень простое соотношение, заменив и относительную частоту  $F$  ее фактическим значением:  $HQ = (f_{\max R}/f_{\max B})/(\Delta L/L_{\max}) \cdot 100\%$ , где  $\Delta L = L_{\max} - L_{real}$ .



**Рисунок 3.** Клиническая картина динамики состояния слуха пациента К., 87 лет (пояснения в тексте).

Расчет коэффициента качества несколько усложняется, если слух снижается на нескольких отдельных участках звукового диапазона неодинаково. Тогда весь воспринимаемый диапазон делится на поддиапазоны, на каждом из которых устанавливается пороговый уровень слуха, и суммарный результат приобретает смысл искомой величины.

## 2. Клинические приложения

Проиллюстрируем применение предлагаемого метода на конкретных примерах в клинической практике при болезни Меньера.

На приведенных фрагментах историй болезней представлена визуализация динамики во времени коэффициент качества слуха  $HQ$  для правого  $R$  и левого  $L$  ушей, полученная по результатам аудиометрии при установлении пороговой верхней частоты  $f_{\max}$  и нижней  $f_{\min}$  и пороговом уровне соответствующей воспринимаемой громкости  $L_{\min}$ .

Первая строка в таблицах соответствует возрастной частотной норме, вычисленной по акустической модели [1], вторая — фиксирует реально воспринимаемые пороговые частоты, устанавливаемые с помощью аудиометрии при поступлении пациента. Третья и четвертая строки указывают на реально воспринимаемые верхние пороговые частоты, выявляемые непосредственно до и сразу после первичной процедуры. Следующие строки фиксируют результаты аудиометрии в конце первого и третьего дня, предпоследняя — через 3 недели, а последняя — через полгода после проведенной процедуры. В первых двух столбцах таблицы зафиксированы аудиометрически установленные пороговые верхние частоты воспринимаемых звуков, в правых — расчетные значения критерия качества слуха для правого и левого ушей, соответственно.

Расчет критерия качества слуха проводится по предложенному методу. На графиках возрастная частотная норма отмечена красным кружком с белой

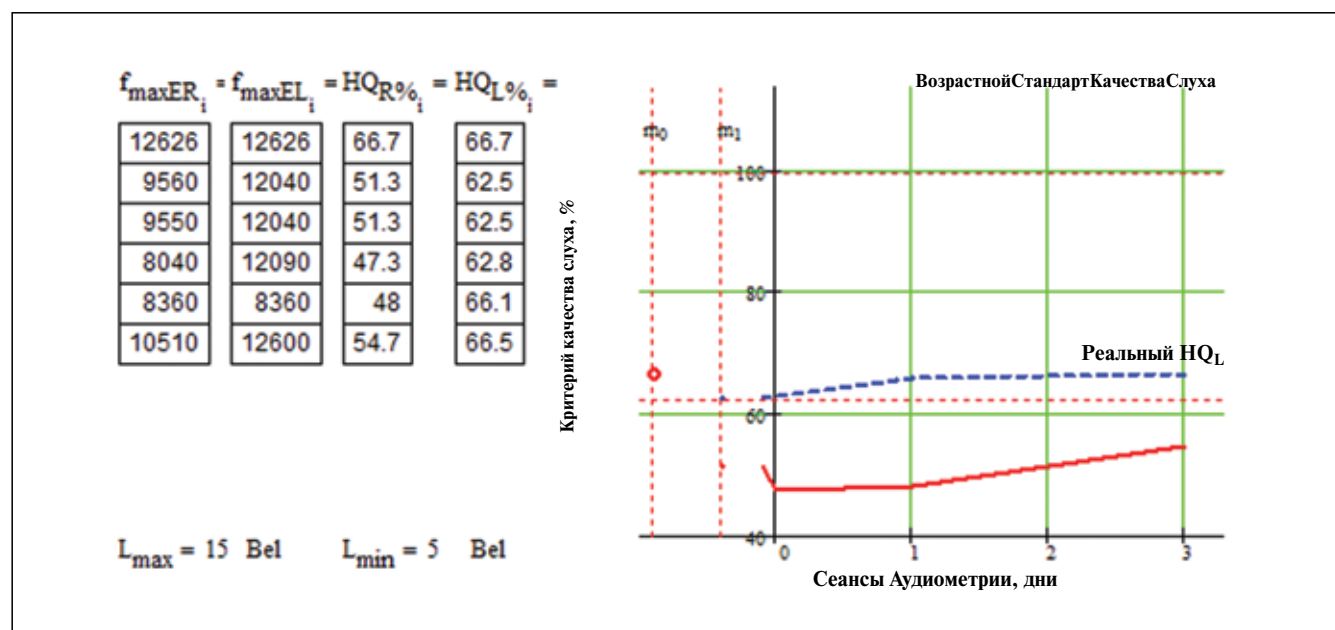
точкой, реальные первичные значения критерия — красным кружком для левого уха и синим для правого уха. Динамика критерия качества слуха представлена графически экспериментальной ломаной (сплошная красная линия соответствует течению процесса для левого уха, пунктирная синяя — для правого уха).

На **рисунке 2** представлены результаты для пациента Г. в возрасте 60 лет. С помощью клинических исследований, проб и тестов [5] был поставлен диагноз: болезнь Меньера, правостороннее поражение. Для пациента при поступлении была рассчитана возрастная норма верхней частоты  $f_{\max B} = 10976$  Гц и нижней  $f_{\min B} = 48$  Гц. Аудиометрически была установлена верхняя пороговая частота для правого уха  $f_{\max EL} = 7750$  Гц, для левого  $f_{\max ER} = 8070$  Гц, и нижняя для правого уха  $f_{\min ER} = 50$  Гц, для левого уха  $f_{\min EL} = 72$  Гц, не изменившиеся перед процедурами. Критерий качества слуха составил для левого уха 79,0%, для правого — 77,5%, снизившийся перед лечением до 61,7%.

Стандартное лечение [5] сразу после манипуляции не дало изменений для правого уха и привело к ухудшению картины для левого уха снижением критерия до 71,4%. Это могло вызвать сомнение в эффективности процедуры для левого уха.

Однако дальнейшее изменение критерия нивелирует этот факт, обнаруживая прогресс в лечении, достигший возрастного стандарта качества слуха для левого уха через сутки, и медленно, но неуклонно по истечении трех суток приближающийся к нему — для правого уха. Выявлен процесс улучшения качества слуха в динамике. Этот факт подтверждают графики, отражающие динамику изменения критерия на протяжении наблюдения до трех недель и особенно — до шести месяцев. Прогноз в отношении слуха — оптимистичен, лечение — эффективно.

Несколько иная динамика лечения представлена на **рисунке 3** для пациента К. экзотического возраста 87 лет с диагнозом болезнь Меньера, двустороннее поражение [5].



**Рисунок 4.** Клиническая картина динамики состояния слуха пациента А., 46 лет (пояснения в тексте).

Сразу после стандартных манипуляций [5] лечение привело к положительному сдвигу критерия качества слуха для правого уха (при его достаточно большом начальном значении в 97,2%), но для левого уха вызвало снижение с 80,0 до 73,7%.

Дальнейшее изменение критерия качества слуха демонстрирует прогресс в лечении, ведущий к превышению возрастного стандарта качества слуха в динамике.

Совсем другая ситуация представлена на **рисунке 4** для пациента А. в возрасте 46 лет с диагнозом болезнь Меньера, двустороннее поражение [6]. Объективно обнаружено и сокращение частотного диапазона, и снижение чувствительности анализатора до уровня 5 дБ (50 фон) с постоянным ощущением ушного шума. Расчет введенного критерия  $HQ$  показал его заниженное значение в 66,7% для обеих ушей. Стандартное лечение [6] к исходу первых суток вызвало положительный сдвиг для левого уха до возрастного стандарта, а для правого уха это произошло значительно позже и медленнее. Но процесс улучшения качества слуха в динамике заметен. Навязчивость сопутствующего ушного шума исчезла. Прогноз — оптимистичен.

## ■ ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, критерий качества слуха ( $HQ$ ) как характеристика воспринимаемого пациентом тембра тонов (звуков) может служить мерой эффективности профилактики и лечения слуховых расстройств. Данный метод визуализации оценки состояния и качества медицинского вмешательства при лечении слуховых расстройств повторяем, прост в применении, легок и доступен. Он может быть использован в изучении влияния сопутствующих заболеваний, оценке побочного действия фармацевтических препаратов, физиотерапевтических и фитнес-процедур и/или социально-производственных факторов на основе тестирования слуха с использованием всечастотного звукового генератора.

Анализируя результаты исследований и расчетов, приходим к выводу, что расчет восприятия тембра тонов (звуков) разными испытуемыми объясняет разное восприятие звуков и разное качество слуха как составной части качества здоровья и жизни человека.

Метод отражает не только текущее состояние, но и динамику качества слуха и может служить в качестве экспресс- и мониторинг-контроля врачебных вмешательств. ■

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ovchinnikov EL, Ivanov VV, Ovchinnikova YuV. Acoustic-wave hearing model, initial stage: the sound transduction in the inner ear. *European Science and Technology: 3<sup>rd</sup> International scientific conference, Munich, Germany, 2012*:524—535.
2. Ундриц В.Ф., Темкин Я.С., Нейман Л.В. Руководство по клинической аудиологии. М.: Медгиз, 1962. [Undrits WF, Temkin YaS, Neyman LV. *Rukovodstvo po klinicheskoi audiologii*. М.: Medgiz, 1962. (In Russ.).]
3. Овчинников Е.Л. Громкость звуков различных частот и интенсивностей: обобщенный закон Вебера для

слуха. *Наука и инновации в медицине*. 2016;(1):14—18. [Ovchinnikov EL. Loudness of sounds of different frequency and intensity: the generalized Weber law for hearing. *Nauka i innovacii v medicine*. 2016;(1):14-18. (In Russ.).]

4. Ovchinnikov EL, Ivanov VV. Theoretical basis of comfortable, tolerable and destructive effects of sounds and noise. *J. of Physics: CS*. 2011;(V305):10. doi: 10.1088/1742-6596/305/1/012128

5. Paparella MM. Meniere's Disease. *Otolaryngol. Clinics of North America, Philadelphia: Saunders*, 2002.

**Участие авторов**

Концепция и дизайн исследования, редактирование: Овчинников Е.Л.

Биофизическое моделирование, написание текста: Овчинников Е.Л., Яшин С.С.

Клиническая интерпретация: Минаева Т.И.

Конфликт интересов отсутствует.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Минаева Т.И.** – врач-оториноларинголог  
Клиник СамГМУ.  
E-mail: galla15@rambler.ru

**Овчинников Е.Л.** – к.б.н., доцент  
кафедры медицинской физики,  
математики и информатики СамГМУ.  
E-mail: E.L.Ovchinnikov@ya.ru

**Яшин С.С.** – студент V курса  
лечебного факультета СамГМУ.  
E-mail: yashinss@rambler.ru

**INFORMATION ABOUT AUTHORS**

**Minaeva TI** – otorhinolaryngologist  
of Samara State Medical University Clinics.  
E-mail: galla15@rambler.ru

**Ovchinnikov EL** – PhD, associate professor  
of the Department of Medical Physics,  
Mathematics and Informatics  
of Samara State Medical University.  
E-mail: E.L.Ovchinnikov@ya.ru

**Yashin SS** – 5th-year student  
of the Department of general medicine  
of Samara State Medical University.  
E-mail: yashinss@rambler.ru

**Контактная информация**

**Яшин Сергей Сергеевич**  
Адрес: ул. Пугачевский тракт, 59, кв. 176,  
Самара, Россия, 443101.  
E-mail: yashinss@rambler.ru  
Телефон: + 7 (927) 739 42 10.

**Contact information**

**Yashin Sergey Sergeevich**  
Address: 59 Pugachevskiy tract, ap. 176,  
Samara, Russia, 443101.  
E-mail: yashinss@rambler.ru  
Phone: + 7 (927) 739 42 10.