

# Введение в технику физического эксперимента

Лектор – проф. Пальчиков Евгений Иванович

ВТФЭ-2016

# Звук – Акустика – Слух – Музыка

## Акустические измерения

Взгляд физика со знанием биологии и медицины

**Пальчиков Евгений Иванович**

д.т.н., проф. НГУ, в.н.с. ИГиЛ

***Новосибирский Государственный университет  
Сибирское Отделение Российской академии Наук***

Лекция № 14 – 09.12.2016, НГУ, БФА

© Пальчиков Е.И., 2016

© Новосибирский государственный университет, 2016

# Сравнение шкал излучений

## Механический и электромагнитный волновые спектры

| Механический волновой спектр |                                  |                     | Электромагнитный волновой спектр |                      |                      |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------|----------------------|
| Частота (Гц)                 | Название спектрального диапазона | Длина волны (мм)    | Название спектрального диапазона | Частота (Гц)         |                      |
| $2 \times 10^1$              | Аудио (слышимый)                 | $3 \times 10^4$     | Радиоволны                       | $3.0 \times 10^8$    |                      |
| $2 \times 10^3$              |                                  | $3 \times 10^2$     |                                  |                      |                      |
| $2 \times 10^4$              |                                  | $3 \times 10^0$     |                                  |                      |                      |
| $2 \times 10^7$              | Ультразвуковой                   | $3 \times 10^{-2}$  | Инфракрасное излучение           | $3.0 \times 10^{11}$ |                      |
|                              |                                  |                     |                                  |                      |                      |
| $2 \times 10^9$              | Гиперзвуковой                    | $3 \times 10^{-4}$  | Видимый                          | $4.0 \times 10^{14}$ |                      |
| $2 \times 10^{11}$           |                                  | $3 \times 10^{-6}$  |                                  | Ультрафиолет         | $3.0 \times 10^{16}$ |
| $2 \times 10^{13}$           |                                  | $3 \times 10^{-8}$  |                                  |                      |                      |
|                              | Вибрация кристаллической решетки | $3 \times 10^{-10}$ | Рентгеновские лучи               | $3.0 \times 10^{19}$ |                      |
|                              |                                  |                     |                                  |                      |                      |

# Зрение и слух – как спектральные анализаторы

Смешивание красного светового потока и зеленого светового потока дают глазу ощущение желтого светового потока



Любой спектроскоп, в отличие от глаза, видит два цвета

Смешивание звуков «Фа» и «Ля» не дают ощущение звука «Соль»



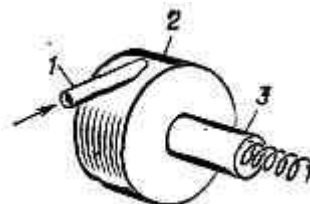
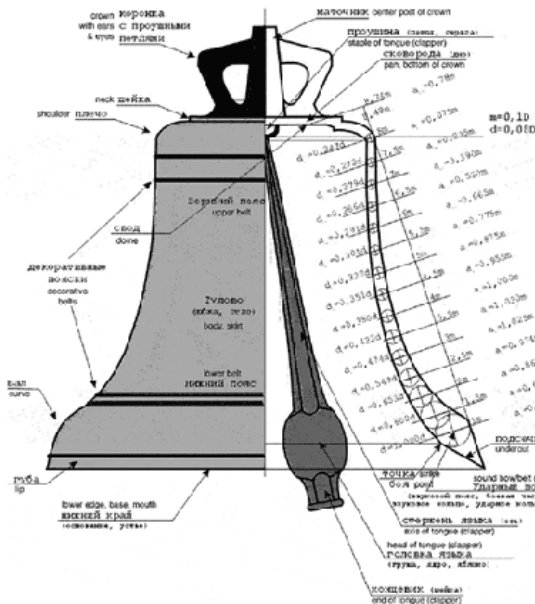
Ухо, в отличие от глаза, слышит при смешивании оба звука

# Источники звука

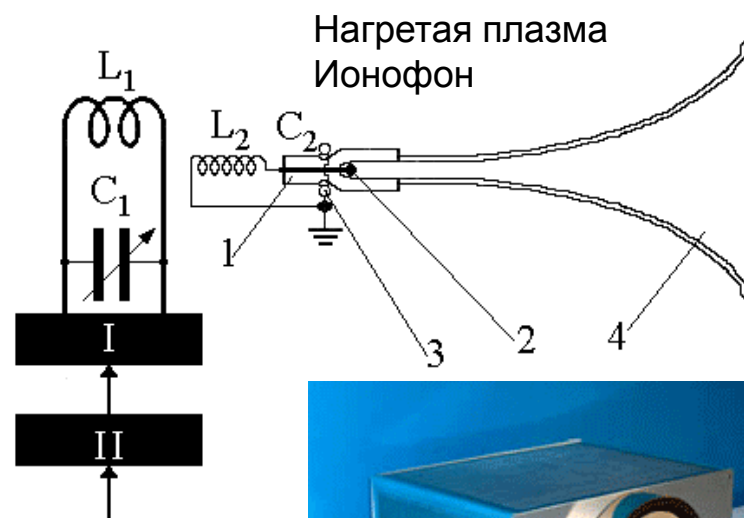
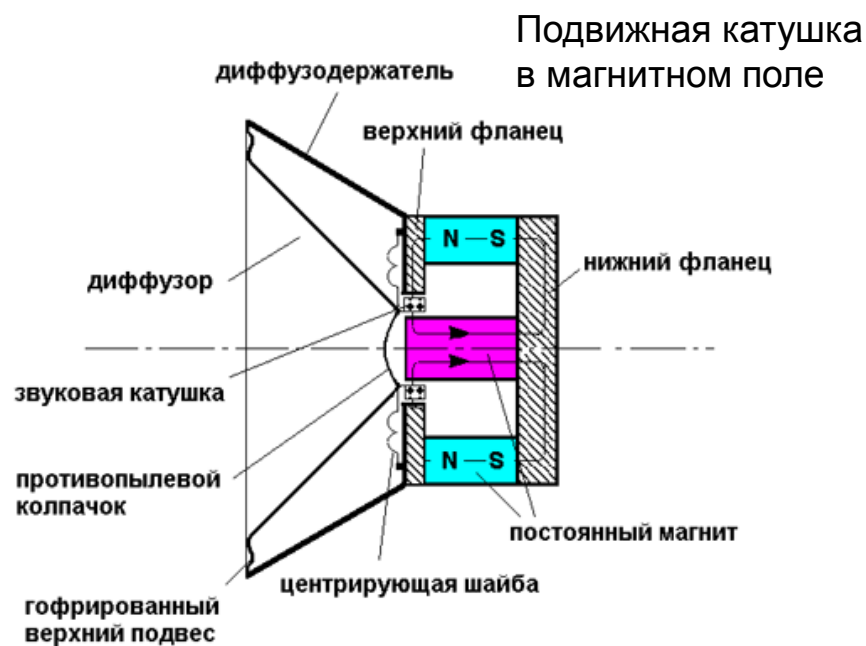
- Колеблющиеся и движущиеся предметы
- Колеблющиеся и движущиеся границы разных сред (твердое тело, жидкость, газ, плазма)
- Пульсации температуры и плотности среды во времени при поглощении ею энергии, поступающей извне
- Неустойчивости движения среды в пространстве



# Источники звука

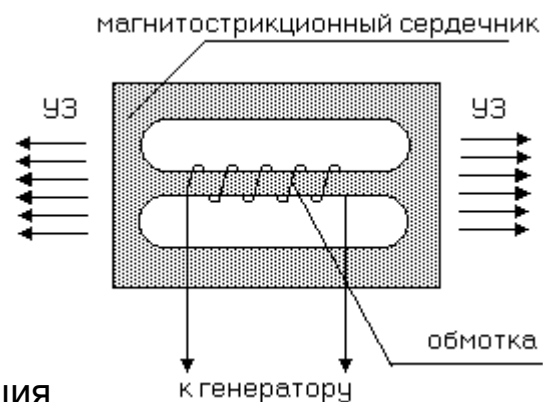


# Электроакустические преобразователи



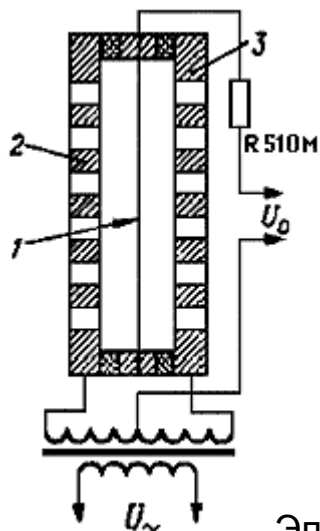
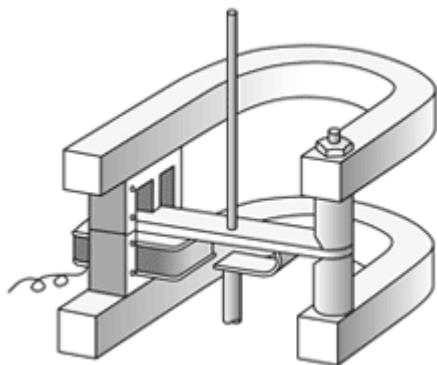
Пьезоэффект

Магнитострикция

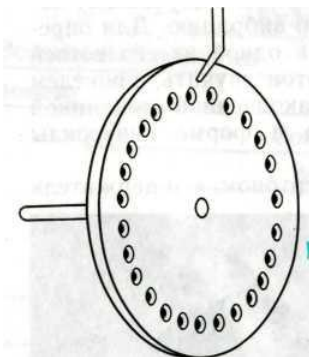


# Электроакустические преобразователи

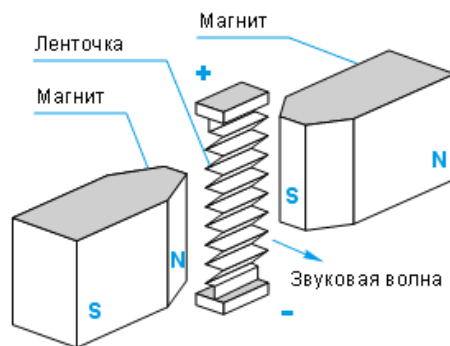
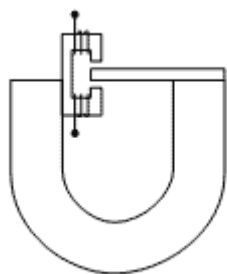
Электромагнитный излучатель



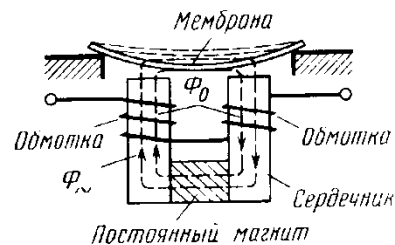
Электростатический излучатель



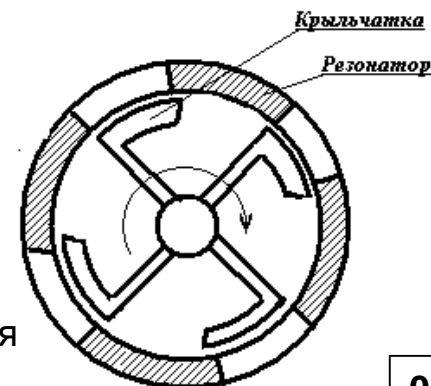
Сирена



Магнитный ленточный излучатель



Электромагнитный телефон



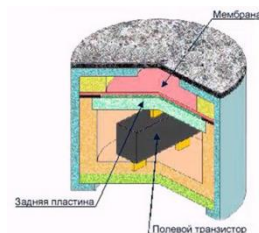
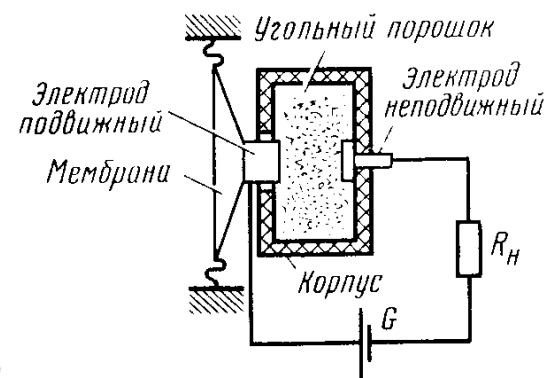
Динамическая сирена



# Приемники звука

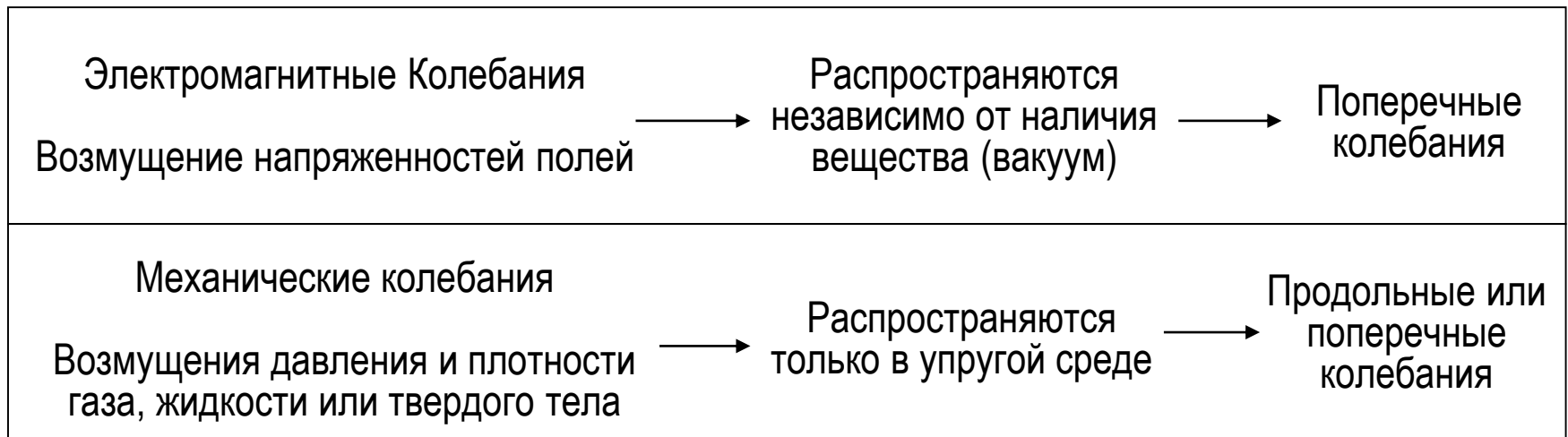
## Акустоэлектрические преобразователи

- Угольный
- Электродинамический
- Пьезокерамический
- Емкостный
- Магнитострикционный
- Тензорезистивный
- Электретный



# Типы волн

Волна – периодическое возмущение, которое перемещается в пространстве.

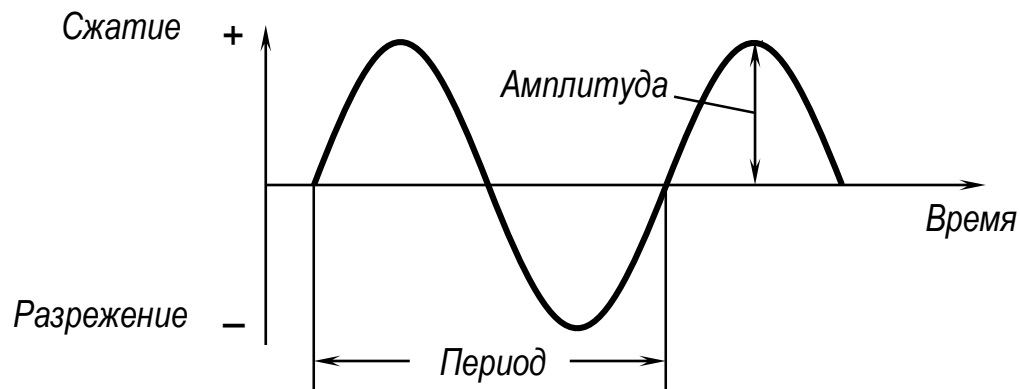


# **Характеристики звука**

# Характеристики звука

## Распространение звука

- Пифагор Самосский (580-500 до н.э.).
  - Звук – распространяющиеся во все стороны колебания воздуха.
  - Изменения давления  $P$  в воздухе, перенос механической энергии.
- Сжатие (высокое давление).
  - Разрежение (низкое давление).





# Характеристики звука

## Звуковое давление

$$P = P(t) - P_{\text{атмосферное}}$$

– гармонические колебания.

Единица измерения – паскаль [Па].

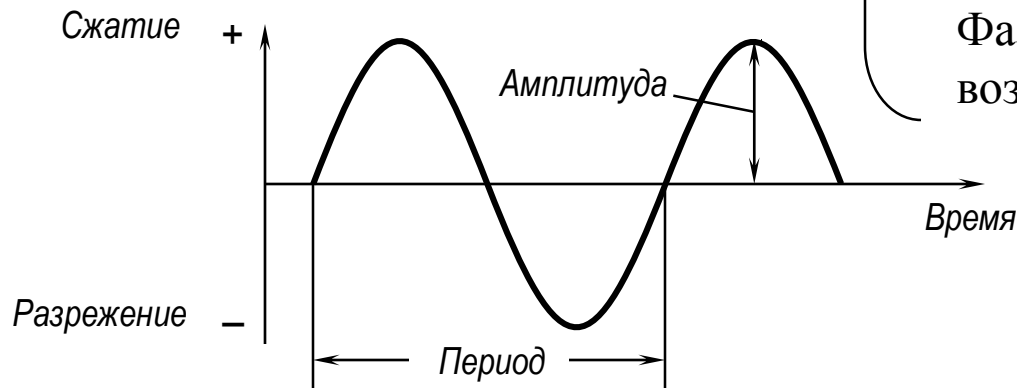
Длина волны ( $\lambda$ ) [м] или [мм] – расстояние между фазами сжатия и разрежения.

Частота ( $f$ ) [періодов в сек] = [Гц] – количество осцилляций за 1 сек. (скорость изменения давления).

Период ( $1/f$ ) [сек] – временная протяженность одного цикла колебаний.

Амплитуда – сила давления, отражает смещение частиц среды.

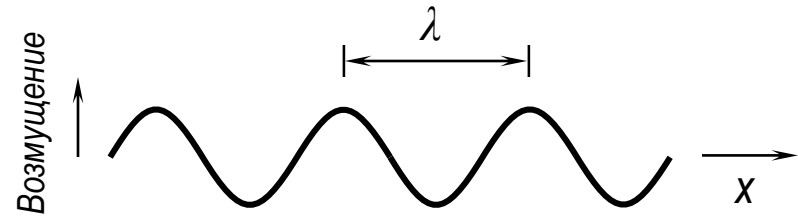
Фаза – отражает момент времени возникновения колебаний.



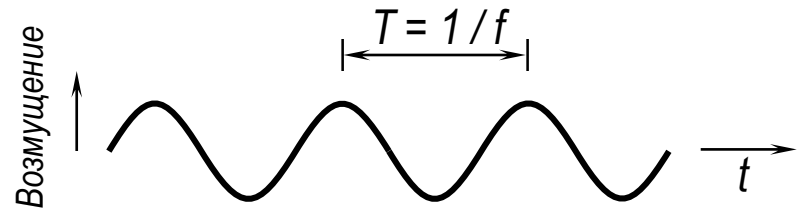
# Характеристики звука

## Распространение звука

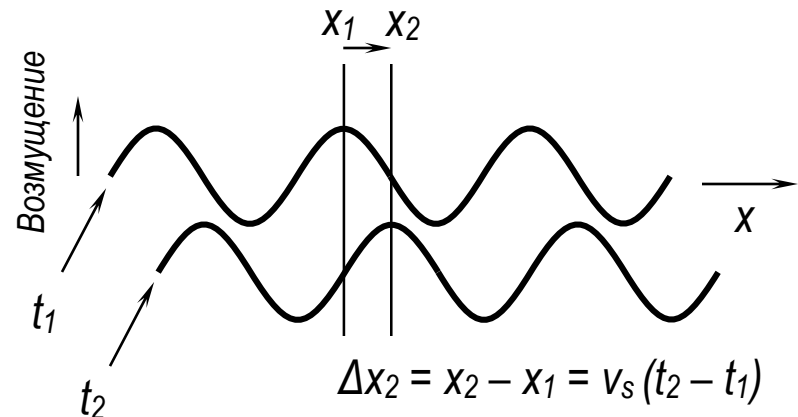
- Волна в данный момент времени  $t$ :



- Волна данной точке пространства  $z$ :

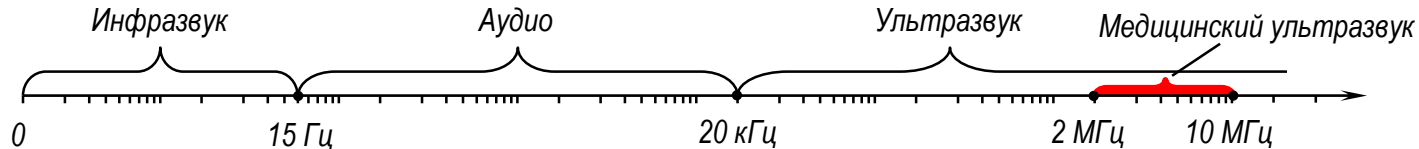


- Волна в два данных момента времени  $t$ , что отражает процесс распространения :



# Звуковая волна

## Распространение звука



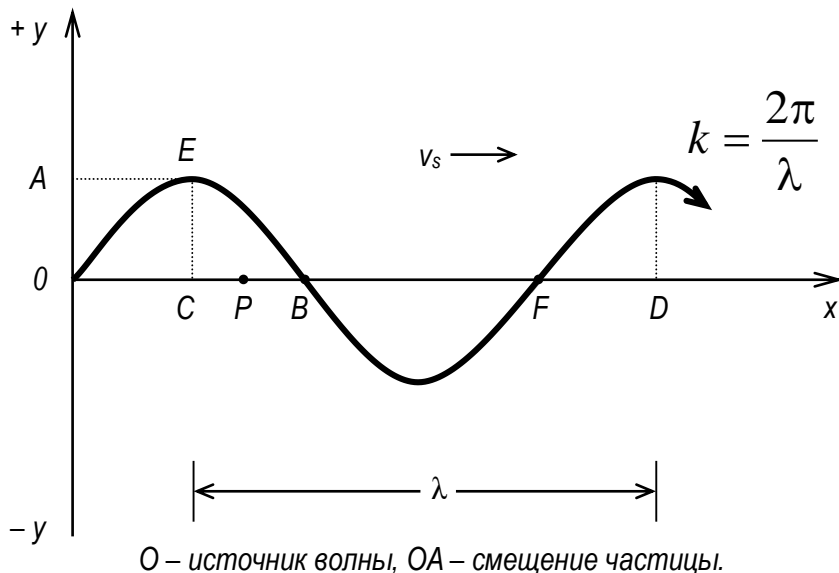
**Инфразвук** –  $f < 15 \text{ Гц}$

**Аудио** –  $15 \text{ Гц} < f < 20 \text{ кГц}$

**Ультразвук** –  $f > 20 \text{ кГц}$

(обычно **медицинский ультразвук** 2-10 МГц)

**Бегущая волна, движущаяся в положительном направлении оси  $x$**



В точке  $O$  частицы водной среды совершают гармонические колебания. Следовательно, смещение частицы относительно точки  $O$  во времени  $t$  можно записать в таком виде:

$$y = A \sin(\omega t - kx).$$

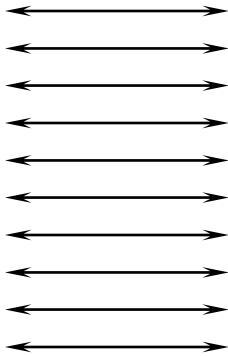
Скорость волны – расстояние, проходимое фронтом волны в единицу времени:

$$v_s = \frac{\omega}{k} = \frac{\lambda}{T}.$$

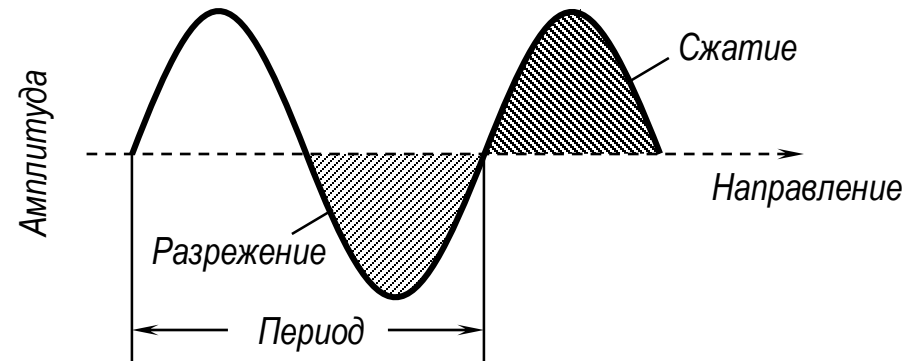
# Продольные или волны сжатия

- Распространяются в твёрдых телах, жидкостях и газах.

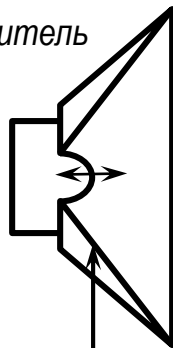
Колебание частиц



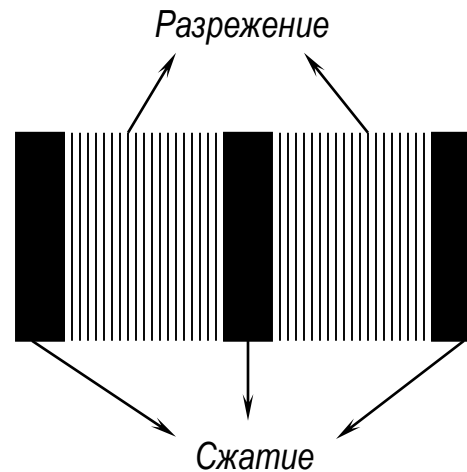
Распространение волны



Громкоговоритель



Мембрана  
(диффузор)

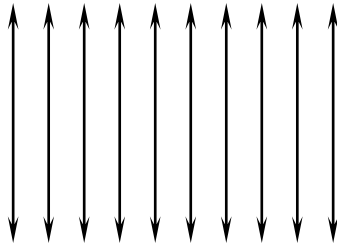




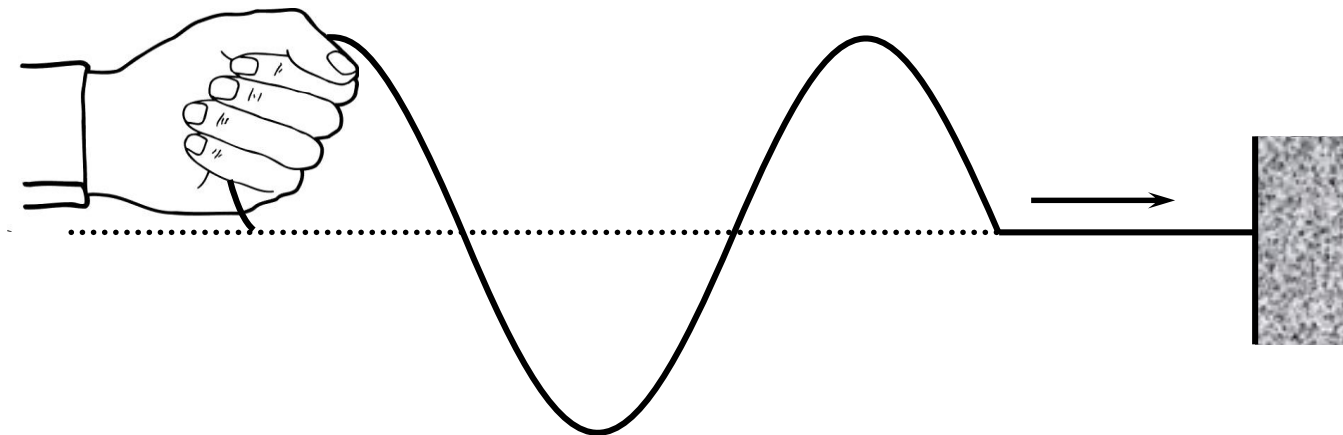
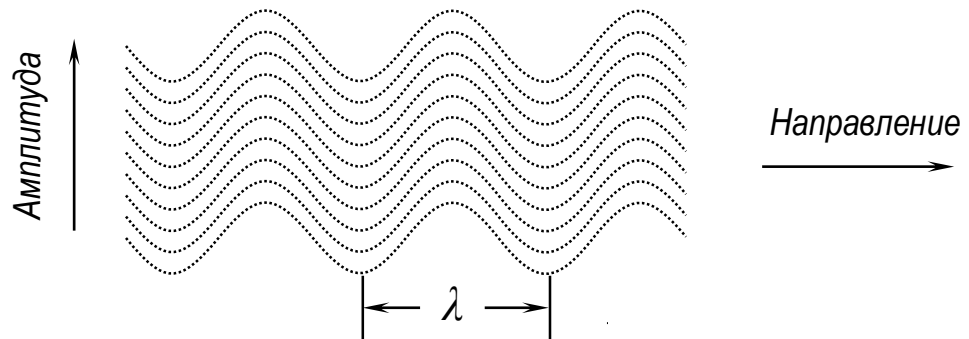
# Поперечные или волны сдвига

- Колебания частиц направлены поперёк направления распространения волнового движения.
- Могут передаваться только в твёрдых телах.

Колебание частиц



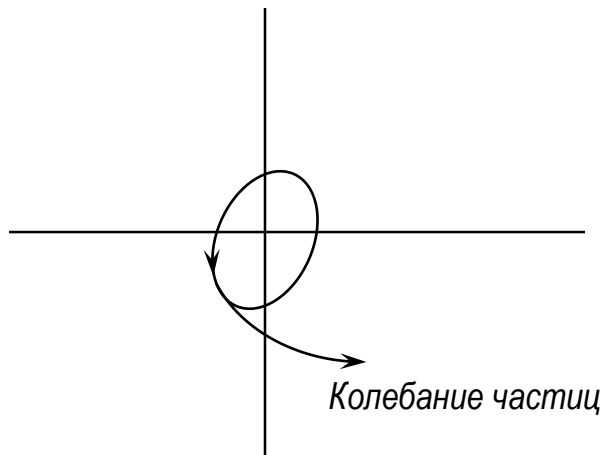
Распространение волны



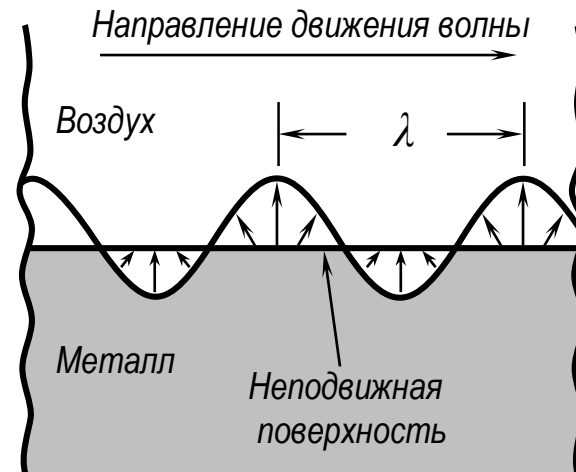
# Поверхностные волны Рэлея

- Распространяются вдоль плоской границы упругого полупространства (твёрдое вещество) и вакуума.
- Быстро затухают вглубь среды.

Колебание частиц



Распространение волны на поверхности  
металл – воздух



# Скорость звуковых волн

Звуковые волны распространяются со скоростью  $v_s$ , которая определяется свойствами среды. В общем случае скорость звука равна

$$v_s = \sqrt{C / \rho},$$

где  $C$  – это константа, характеризующая жесткость (или упругость) материала (в отсутствие теплового потока, т. е. в «адиабатических» условиях), а  $\rho$  – массовая плотность. В твердых веществах константа упругости может зависеть от направления распространения звуковой волны. Она равняется модулю Юнга  $Y$  для распространения компрессионных волн по стержню, длина которого намного больше ширины. Для стали  $v_s = 5960$  м/с. В текучей среде (жидкости и газы),  $C$  – это объемный модуль упругости  $B$  (адиабатический), который описывает, какой величины давление требуется для достижения данного уменьшения объема. В глазах  $B = \gamma P$ , где  $\gamma$  – это постоянная адиабата, то есть отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении ( $c_p$ ) и постоянном объеме ( $c_v$ ). (Отношение  $c_p / c_v$  находится в диапазоне от 1 – для очень больших молекул – до  $5/3$  для идеального одноатомного газа; для воздуха, который состоит из двухатомных газов, эта величина составляет 1,4.) скорость звука в газах

$$\sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma R T}{m}},$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная ( $R = 8,31$  Дж/моль/К), а  $m$  – молекулярная масса. Скорость звука в воздухе составляет 343 м/с (при 20°C), что в 15 раз медленнее, чем в стали, тогда как скорость звука в воде равны 1482 м/с.

# Интенсивность звуковых волн

**Интенсивность** звуковой волны  $I$  – это энергия, переносимая волной через единицы поверхности за единицу времени (с размерностью Дж/м<sup>2</sup>/с или Вт/м<sup>2</sup>). На расстоянии  $R$  от изотропного источника средней звуковой мощности  $P_{\text{power}}$ , интенсивность составляет

$$I = \frac{P_{\text{power}}}{4\pi R^2}.$$

Интенсивность равна кинетической энергии волны на единицу объема,  $\rho u_{\text{max}}^2/2$  умноженной на скорость звука  $v_s$ ,

$$I = \frac{1}{2} \rho u_{\text{max}}^2 v_s,$$

где  $u_{\text{max}} = (\Delta x_{\text{max}}) \omega$  – максимальная скорость молекул при максимальном смещении  $\Delta x_{\text{max}}$  в ходе возмущения.

$$I = \frac{1}{2} \rho v_s [(\Delta x_{\text{max}}) \omega]^2.$$

**Акустический импеданс** среды  $Z$  определяется как произведение массовой плотностью среды и скорости звука в ней,

$$Z = \rho v_s.$$



# ИНТЕНСИВНОСТЬ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Величина максимального изменения давления в звуковой волне связана с максимальным смещением уравнением

$$|P| = (\rho v_s) \omega |\Delta x_{\max}| = Z \omega |\Delta x_{\max}|.$$

Это вытекает из того факта, что давление — это сила, приходящаяся на единицу поверхности, а сила — это изменение импульса в единицу времени, и, таким образом, давление — это изменение импульса на единицу поверхности за единицу времени.

$$I = \frac{1}{2} Z (\Delta x_{\max})^2 \omega^2 = \frac{P^2}{2Z}.$$

$I$  измеряется в [Вт/м<sup>2</sup>].

# Физиологически обоснованное представление интенсивности звука

В аудиометрии за опорную величину принимается интенсивность  $I_{ref}$  звука, который на частоте 2000 Гц едва различим. Причем величины исчисляются в логарифмической шкале с основанием 10 (десятичный логарифм).

$$I_{ref} = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$$

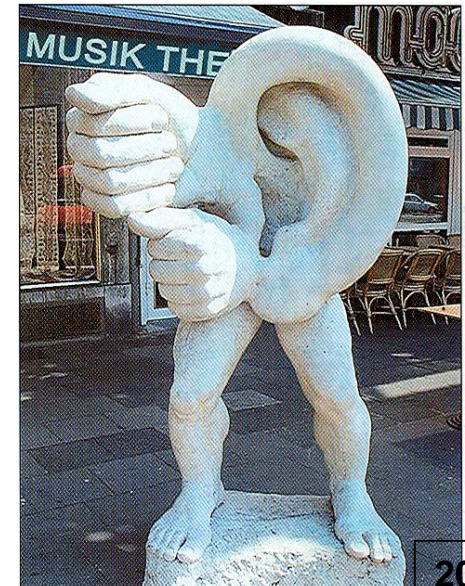
$$I_{db} \text{ (в дБ)} = 20 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_{ref}}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{P}{P_{ref}}\right)^2 = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_{ref}}\right) \text{ дБ}$$

Соответствующее звуковое давление

$$P_{ref} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ мкбар} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cong 2 \cdot 10^{-10} \text{ атм.}$$

$$1 \text{ Белл} = \lg \frac{I}{I_{ref}}; \quad \frac{1}{10} \text{ Белл} = 1 \text{ дБ}$$

Для справки:  $1 \text{ мкбар} = 1,02 \cdot 10^{-6} \text{ атм} = 0,1 \text{ Н/м}^2 = 0,1 \text{ Па}$ .



# Единицы измерения

$$1 \text{ Белл} = \lg \frac{I}{I_{ref}}; \quad \frac{1}{10} \text{ Белл} = 1 \text{ дБ}$$

При  $I = 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 = 10^4 I_{ref}$ ,  $I \text{ (в дБ)} = 10 \lg (10^4) = 10 \cdot 4 = 40 \text{ дБ}$ .

Шкала децибел также применяется для того, чтобы показать относительные величины интенсивности, например  $I_2$  к  $I_1$ . При

$$I_1 \text{ (в дБ)} = 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_{ref}} \quad \text{и} \quad I_2 \text{ (в дБ)} = 10 \cdot \lg \frac{I_2}{I_{ref}},$$
$$I_2 \text{ (в дБ)} - I_1 \text{ (в дБ)} = 10 \lg \frac{I_2}{I_{ref}} - 10 \cdot \lg \frac{I_1}{I_{ref}} = 10 \cdot \lg \frac{I_2}{I_1}.$$

Повышение интенсивности звука на 20 дБ соответствует множителю  $10^2$  или 100-кратному увеличению  $I$ .

В ультразвуковой медицинской диагностике интенсивность импульса излучения может превышать интенсивность эхо импульса в  $10^6$  раз.

Логарифмическая функция «сжимает» большие отношения и «растягивает» маленькие в более обозримый диапазон.

# Взаимодействие звука с веществом

**Взаимодействие зависит от акустических свойств вещества**

## **Акустический импеданс**

### **Взаимодействия**

- **Отражение** возникает на границах материалов (акустический импеданс соседствующих веществ).
- **Преломление** – изменение направления движения передаваемой механической энергии.
- **Рассеяние** возникает при отражении или преломлении. Энергия рассеивается во многих направлениях.
- **Поглощение** – энергия звука переходит в тепло (теряется).
- **Затухание** – потеря интенсивности из-за поглощения и рассеяния.



# Взаимодействие звука с веществом

## Аналогия с оптикой

$$\lambda = v / f$$

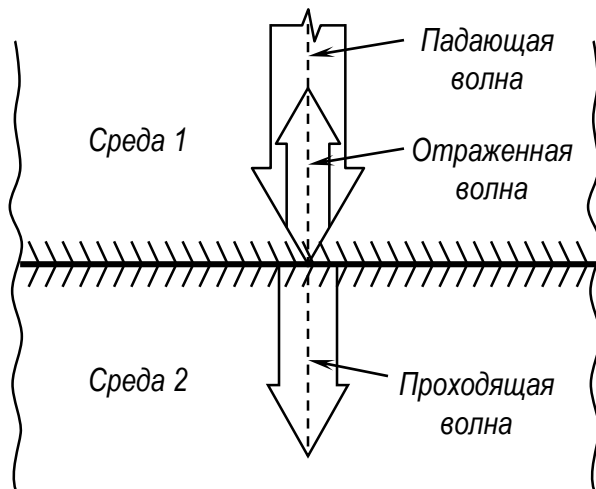
Длины волн слышимых звуков измеряются метрами, т. е. длина волны существенно больше размеров источника звука. Вследствие этого звуковые волны исходят из источника звука в виде сферических волн и распространяются в пространстве по всем направлениям.

С увеличением частоты распространение звука все больше напоминает распространение света. При высоких частотах распространение ультразвуковых волн происходит почти по прямой. В этой области применимы те же законы отражения, фокусировки, рассеяния, что и для света. Здесь могут применяться отражатели и звуковые линзы.

# Взаимодействие звука с границей раздела двух сред

## Аналогия с оптикой

Отражение и прохождение ультразвуковых волн на границе двух сред



Акустика ← Аналог → Оптика

$$Z = \rho v_s$$

$\rho$  – плотность

$v_s$  – скорость звука

Коэффициент  
преломления

$n$

- Коэффициент отражения – отношение интенсивностей отраженных к падающим волнам.

**Акустика**

$$R = \left( \frac{\rho_1 v_{s1} - \rho_2 v_{s2}}{\rho_1 v_{s1} + \rho_2 v_{s2}} \right)^2$$

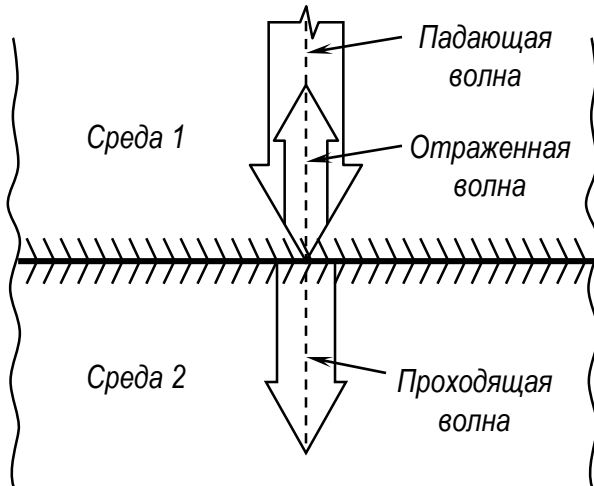
**Оптика**

$$\left( \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2$$

# Взаимодействие звука с веществом

## Отражение, пропускание и акустический импеданс

Отражение и прохождение звуковых волн на границе двух сред

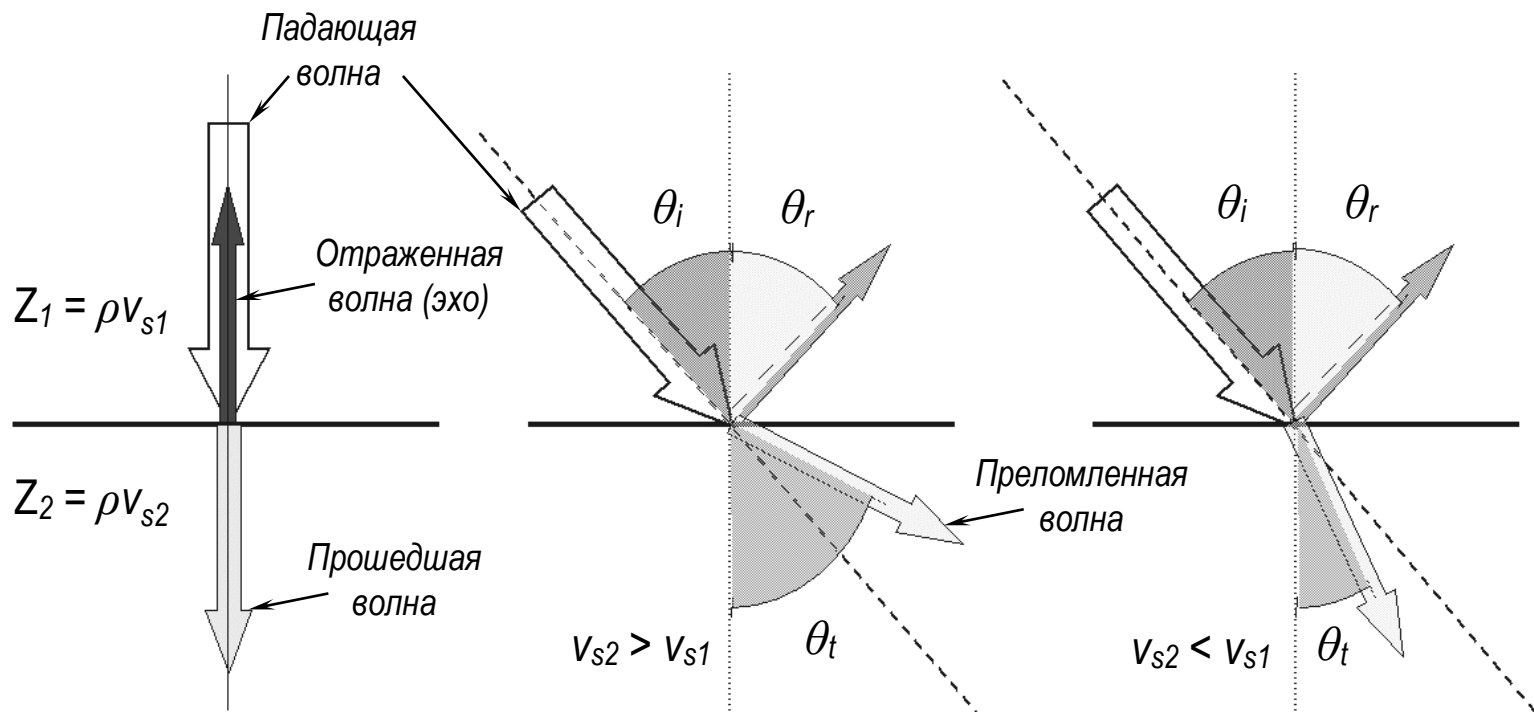


$$R_I = \frac{I_r}{I_i} = \left( \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2$$

- Интенсивность прошедшей волны.
- Коэффициент пропускания ( $T_I$ ) – доля падающей интенсивности, прошедшей через границу раздела тканей.
- Закон сохранения энергии –  $T_I = 1 - R_I$ .

# Взаимодействие звука с веществом

## Преломление на границе раздела



- Подобно свету звук преломляется, если падающая волна распространяется не по нормали к границе раздела сред.
- Частота звуковой волны не изменяется на границе раздела.
- Скорость звука (как прошедшего, так и отраженного) – изменяется.
- Углы отражения и преломления зависят от изменения скорости звука.

# Взаимодействие звука с веществом

## Преломление

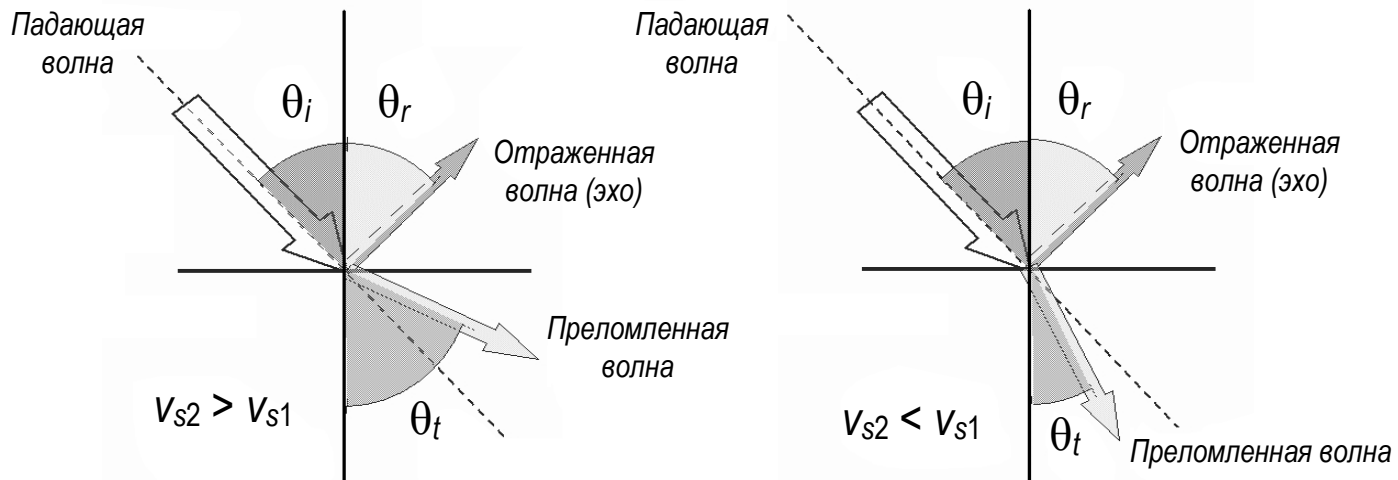
Угол преломления возрастает пропорционально разности скоростей и угла падения, согласно закону преломления Снелла:

$$\frac{\sin \theta_t}{\sin \theta_i} = \frac{v_{s2}}{v_{s1}}.$$

Если  $v_{s2} > v_{s1}$ , то  $\theta_2 > \theta_1$ .

Если  $v_{s2} < v_{s1}$ , то  $\theta_2 < \theta_1$ .

Отраженная часть падающего пучка движется от границы раздела под углом  $\theta_r = \theta_i$ .

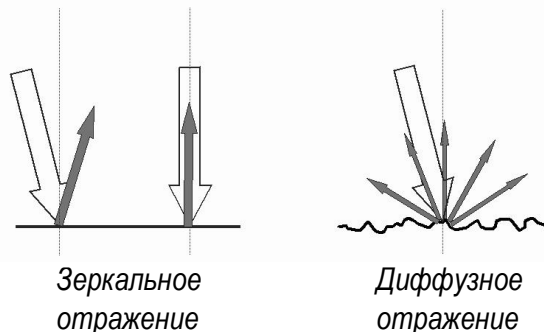


# Взаимодействие звука с веществом

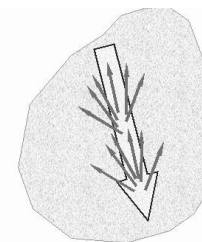
## Рассеяние

- Зеркальный отражатель – гладкая граница между средами; однородная среда.
- Диффузный отражатель – неровная поверхность или неоднородная среда:
  - отражает совсем небольшое эхо,
  - может вызывать уменьшение амплитуды эха вследствие деструктивной интерференции.
- Два случая рассеяния:
  - на границе – для более коротких длин волн граница становится «грубой» и отражение становится диффузным,
  - небольшие отражающие включения в среде – картина диффузного рассеяния характеризует специфический объект в среде или структуру среды.

Взаимодействия с границей



Взаимодействия внутри ткани.  
Акустическое рассеяние



Небольшие отражающие  
включения размером  $\leq \lambda$

# Взаимодействие звука с веществом

## Поглощение звука

- Поглощение звука – результат трения частиц вещества друг об друга.
- Большая часть поглощённой энергии преобразуется в тепло, меньшая – вызывает необратимые структурные изменения вещества.
- Зависит от среды и частоты звука. Коэффициент поглощения, показывающий как уменьшается интенсивность звука в среде, обычно пропорционален квадрату частоты.
- Глубина проникновения звука в среду – глубина при которой интенсивность уменьшается наполовину. Или в  $e$  раз (Обратно пропорциональна поглощению)



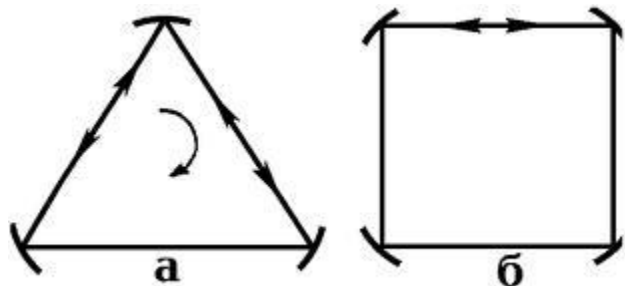
# Виды звуковых полей в реальных условиях

- **плоское звуковое поле:** Звуковое поле в открытом пространстве от плоского излучателя на расстоянии меньшем размера излучателя.
- **сферическое звуковое поле:** Звуковое поле в открытом пространстве от излучателя на расстоянии много большем размера излучателя.
- **свободное звуковое поле (free sound field):** Звуковое поле при условии, что стены комнаты оказывают пренебрежимо малое влияние на звуковые волны.
- **квазисвободное звуковое поле (quasi-free sound field):** Звуковое поле при условии, что стены комнаты оказывают незначительное влияние на звуковые волны.
- **диффузное звуковое поле (diffuse sound field):** Звуковое поле, которое имеет в данной области статистически однородную плотность энергии, причем направление его распространения изотропно.

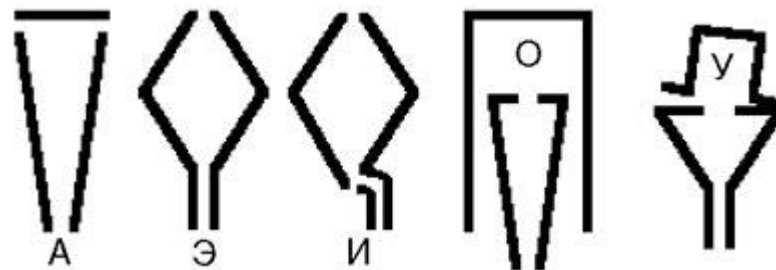
# Эффекты связанные с отражением, наложением (интерференцией), огибанием и рассеянием (дифракцией) волн

- Эхо
- Тень
- Диаграмма направленности излучения
- Реверберация
- Резонанс – в открытых и закрытых резонаторах
- Эффект Доплера

# Резонаторы



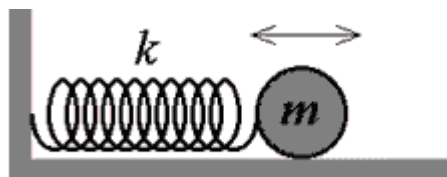
Отражение звука от стен. В резонаторе может быть две, три и более стенок. Он может быть открытым, или закрытым. Может быть одна стенка в виде трубы.



Резонаторы академика Христиана Кранцерштейна, 1779 г, Санкт-Петербург, выговаривали буквы «а, э, и, о, у».



Механический эквивалент резонатора Гельмгольца



Роль грузика играет воздух в горлышке, роль пружинки – воздух внутри объема

$$f_H = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{V_0 L}}$$

$f_H$  — частота, Гц;

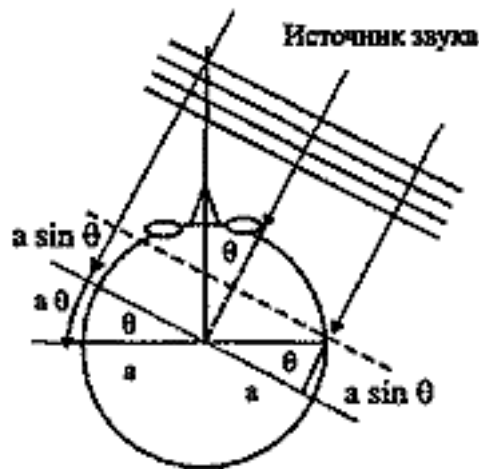
$v$  — скорость звука в воздухе (340 м/с);

$S$  — сечение отверстия, м<sup>2</sup>;

$L$  — длина отверстия, м;

$V_0$  — объем резонатора, м<sup>3</sup>.

# Оценка направления на источник

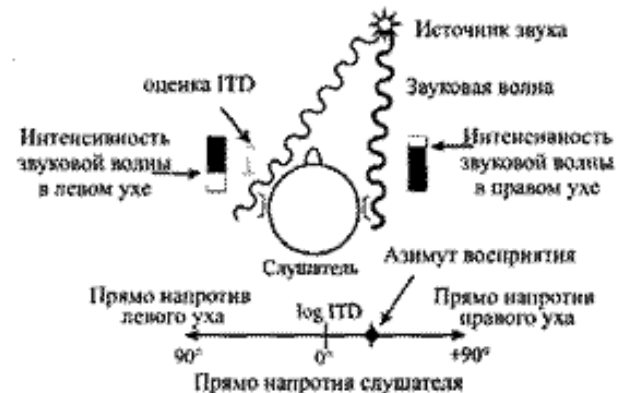
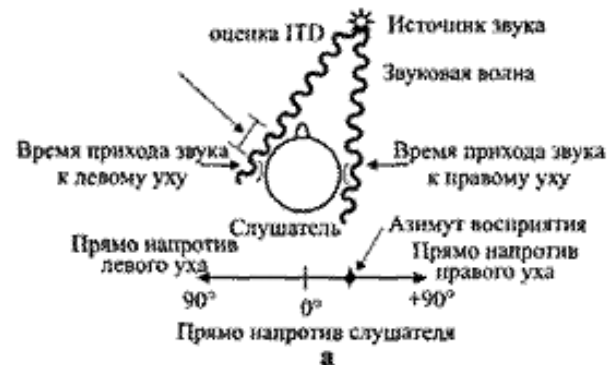


Расчет разности  
хода лучей (ITD) от источника  
до левого и правого уха

Такой способ определения направления прихода звука используется мозгом в полосе частот от 300 Гц до 1 кГц.

Направление прихода звука для частот выше 1 кГц определяется мозгом человека путем анализа громкости звука. Дело в том, что звуковые волны с частотой выше 1 кГц быстро затухают в воздушном пространстве.

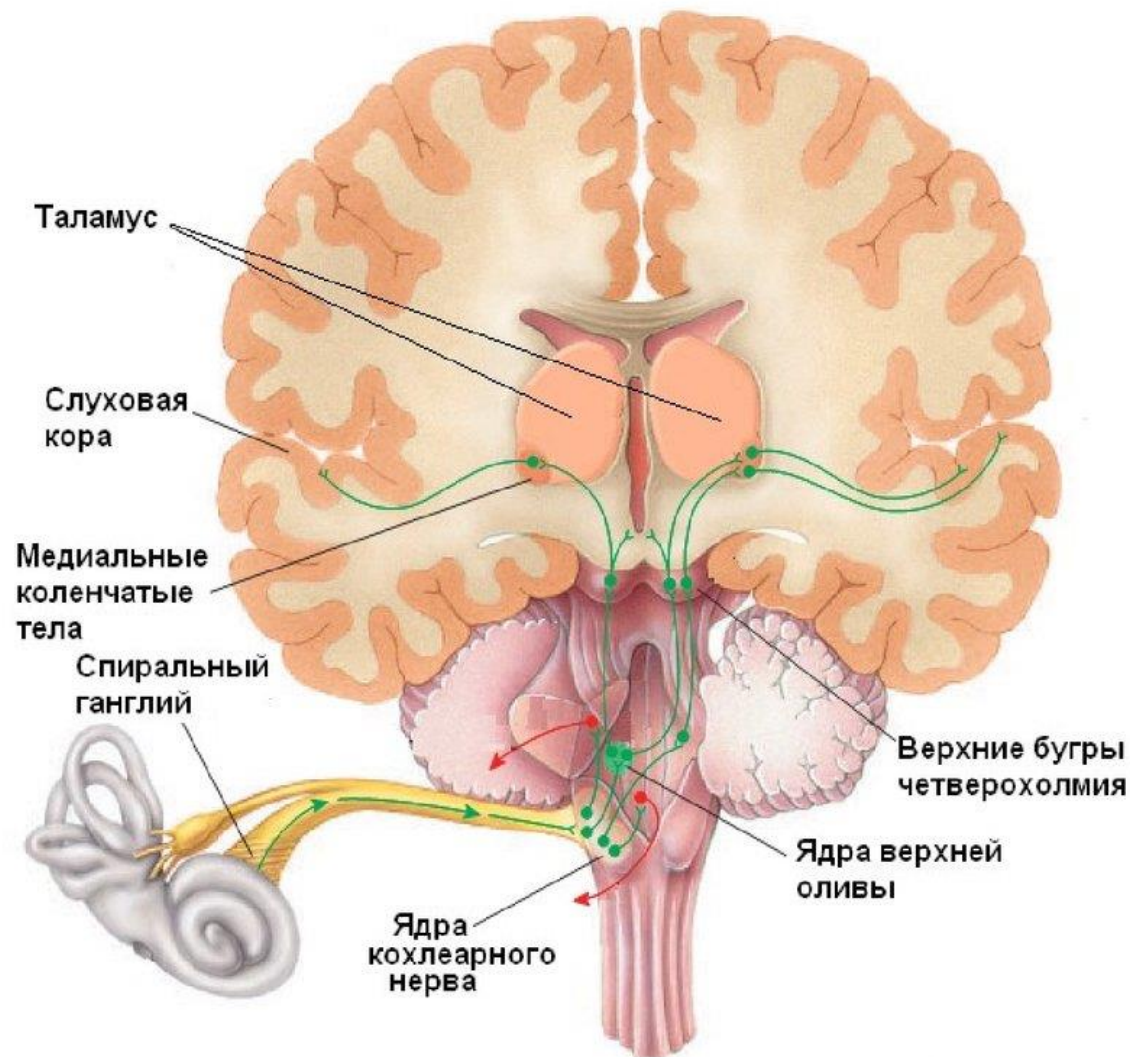
## Бинауральный эффект



Механизмы локализации в горизон-  
тальной плоскости:

а — разность хода лучей по времени — ITD;  
б — разность по интенсивности — ID

# Слуховой анализатор. Бинауральная система. Пути происхождения сигнала и узлы обработки сигнала



# Глубинная локализация (оценка расстояния до источника звука)

- При изменении расстояния до источника меняются одновременно *громкости тембр*, что и служит различительными признаками. Общая точность глубинной локализации не очень велика, при смещении широкополосного звукового источника от 50 до 150 см ошибки составляют 15-30%;
- Среди основных факторов, определяющих оценку глубины, можно выделить следующие:
  - **уменьшение уровня звукового давления с расстоянием**. При отсутствии визуального контроля в условиях свободного поля решающим признаком, по которому оценивается расстояние до источника, является уровень звукового давления в месте расположения эксперта.
  - **затухание звука**, которое начинает сказываться при больших расстояниях, проходимых звуковой волной (больше 15 м). При этом высокочастотные составляющие затухают быстрее и спектральный состав сигнала при удалении источника меняется (тембр становится «темнее»).
  - на близком расстоянии (менее 3 м) на глубинную локализацию начинает оказывать влияние также **дифракция на ушной раковине и голове**, т. е. сказываются разности уровней интенсивностей (выше 1500 Гц) и временные задержки (ниже 1500 Гц), как и в предыдущих случаях.
- Таким образом, существенную роль для глубинной локализации играет *личный опыт*: если слушателю знаком сигнал или если он имеет возможность сделать *визуальную оценку*, тогда точность глубинной локализации многократно увеличивается.
- Точность глубинной локализации звукового источника значительно повышается в закрытом помещении. При перемещении звукового источника по глубине меняется отношение энергии прямого звука к энергии отраженного (реверберационного) звука, что помогает точнее определить расстояние до источника.
- Важнейшее значение имеет также разность по времени между приходом прямого звука и приходом первых отражений и их соотношения по уровням.

# Музыкальная нотация



UT queant laxis  
REsonare fibris  
MIra gestorum  
FAMuli tuorum  
SOLve polluti  
LABii reatum  
Sancte Ioannes

- Современная музыкальная нотация восходит к трудам Гвидо д'Ареццо первой половины XI века (990 — 1050), который начал записывать ноты на четырёхлинейном нотном стане с обозначением высоты звука на каждой линии начальными буквами латинского алфавита (используются и поныне), и ключ.
- Впоследствии система дорабатывалась (добавилась пятая линейка, изменился внешний вид нот и ключи и т. д.), и в современном виде она существует с XVII века.
- В дидактических целях (быстрое разучивание незнакомых песнопений) Гвидо д'Ареццо придумал систему сольмизации, в которой установил сохранившиеся до наших дней слоговые названия ступеней звукоряда (ut, re, mi, fa, sol, la) на основе акростиха молитвы к Иоанну Крестителю из шести нот. В дальнейшем *ut* был заменён на *до* (Дж. Дони, около 1540 года) и добавлена нота *си*.
- Около 1700 года немецкий ученый и музыкант Андреас Веркмейстер предложил логарифмически равномерную двенадцатитоновую музыкальную шкалу и изготовил фортепиано, настроенное в соответствии с ней.



# Скрипичный ключ



Есть подозрение (моё личное), что форма скрипичного ключа навеяна формой раковины, слегка разрушенной прибором. Это видно на фотографии такой раковины, которую я держу в руке.



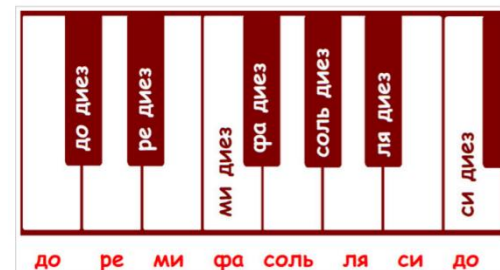
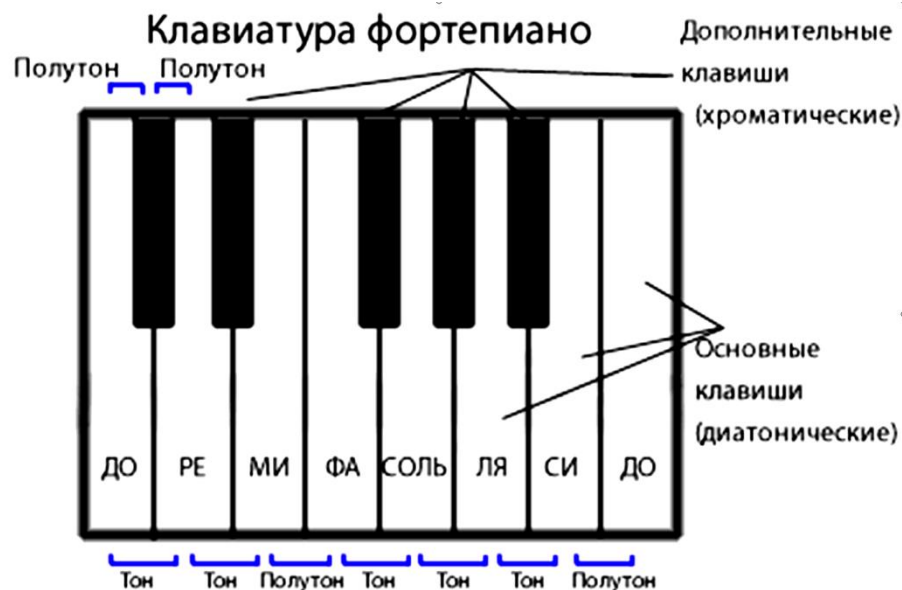
# Басовый ключ



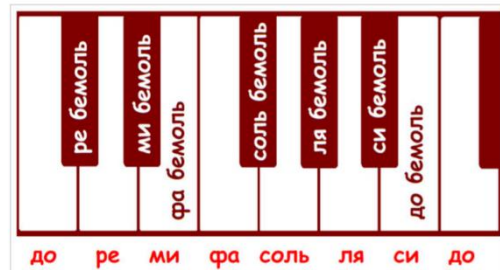
Есть подозрение (моё личное), что форма басового ключа навеяна формой раковины, разрушенной прибоем. Это видно на фотографии обломков раковин, приведенных на снимке.

# Равномерно темперированный строй

- В настоящее время приняты следующие названия нот (в том порядке, в котором они соответствуют белым клавишам фортепиано): **до, ре, ми, фа, соль, ля, си**. Ноты, расстояние между которыми кратно октаве, называются одинаково.
- За эталон частоты ноты берётся нота ля первой октавы, частота которой должна быть равной 440 Гц.
- Шкала между нотами на нотном стане НЕРАВНОМЕРНАЯ. На одну октаву из 7 нот приходится 12 полутонов (12 клавиш фортепиано):  
до, **до-диез**, ре, **ре-диез**, ми, **фа**, **фа-диез**, **соль**, **соль-диез**, **ля**, **ля-диез**, **си**.
- В равномерно темперированном строе отношение частот двух соседних полутонов (например, до и до-диез) равно  $\sqrt[12]{2}$
- Таким образом, можно видеть, что отношение частот нот, отстоящих друг от друга на октаву, равно двум.



Неоднозначность обозначений

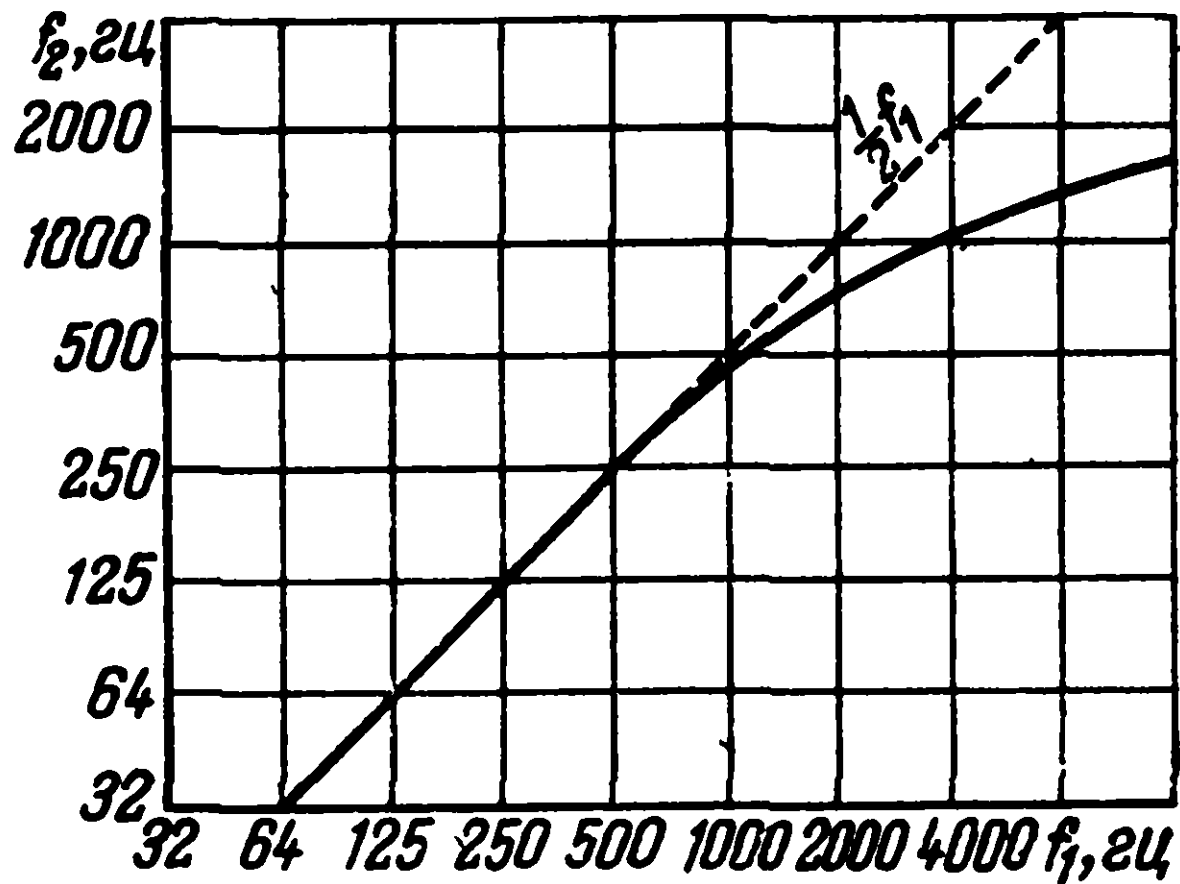


# Музыкальная гармония

- Первичный объект гармонии — музыкальные интервалы, художественное освоение которых составляет основной стержень исторического развития музыкального искусства.
- «Согласное» звучание звуков даёт первую категорию гармонии — консонанс, противопоставляемый диссонансу.
- Для человеческого слуха отношения между частотами звуковых колебаний, составляющих приятные созвучия, отвечают ряду отношений целых чисел, представляющих интервалы:
  - 1:1 и 1:2 (унисон и октава),
  - 2:3 и 3:4 (квинта и кварта),
  - 4:5 и 5:6 (терции) и т. д.
- Очевидно, что с помощью логарифмической равномерно темперированной шкалы, в которой отношения частот между соседними нотами равно иррациональному числу  $\sqrt[12]{2}$ , можно соблюсти перечисленные целые пропорции только для унисона и октавы. Все остальные интервалы будут ПРИБЛИЗИТЕЛЬНЫМИ.
- Также оказалось, что из-за нелинейности спектральных ощущений слуха человека даже целочисленная шкала работает только в нижнем диапазоне частот, а начиная с 500 Гц и выше гармония в ней не соблюдается
- Именно приблизительность интервалов и нелинейность шкал делают музыку неповторимым искусством.

| Интервал        | Равномерно темперированные интервалы                                       | Натуральные интервалы                                        | Разница в центах |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------|
| Прима           | $\sqrt[12]{2^0} = 1 = 0 \text{ Cent}$                                      | $\frac{1}{1} = 1 = 0 \text{ Cent}$                           | 0                |
| Малая секунда   | $\sqrt[12]{2^1} = \sqrt[12]{2} \approx 1,059463 = 100 \text{ Cent}$        | $\frac{16}{15} \approx 1,066667 \approx 111,73 \text{ Cent}$ | -11,73           |
| Большая секунда | $\sqrt[12]{2^2} = \sqrt[6]{2} \approx 1,122462 = 200 \text{ Cent}$         | $\frac{9}{8} = 1,125 \approx 203,91 \text{ Cent}$            | -3,91            |
| Малая терция    | $\sqrt[12]{2^3} = \sqrt[4]{2} \approx 1,189207 = 300 \text{ Cent}$         | $\frac{6}{5} = 1,2 \approx 315,64 \text{ Cent}$              | -15,64           |
| Большая терция  | $\sqrt[12]{2^4} = \sqrt[3]{2} \approx 1,259921 = 400 \text{ Cent}$         | $\frac{5}{4} = 1,25 \approx 386,31 \text{ Cent}$             | 13,69            |
| Кварта          | $\sqrt[12]{2^5} = \sqrt[12]{32} \approx 1,334840 = 500 \text{ Cent}$       | $\frac{4}{3} \approx 1,333333 \approx 498,04 \text{ Cent}$   | 1,96             |
| Тритон          | $\sqrt[12]{2^6} = \sqrt{2} \approx 1,414214 = 600 \text{ Cent}$            | $\frac{45}{32} \approx 1,406250 \approx 590,22 \text{ Cent}$ | 9,78             |
| Квинта          | $\sqrt[12]{2^7} = \sqrt[12]{128} \approx 1,498307 = 700 \text{ Cent}$      | $\frac{3}{2} = 1,5 \approx 701,96 \text{ Cent}$              | -1,96            |
| Малая секста    | $\sqrt[12]{2^8} = \sqrt[3]{4} \approx 1,587401 = 800 \text{ Cent}$         | $\frac{8}{5} = 1,6 \approx 813,69 \text{ Cent}$              | -13,69           |
| Большая секста  | $\sqrt[12]{2^9} = \sqrt[4]{8} \approx 1,681793 = 900 \text{ Cent}$         | $\frac{5}{3} \approx 1,666667 \approx 884,36 \text{ Cent}$   | 15,64            |
| Малая септима   | $\sqrt[12]{2^{10}} = \sqrt[6]{32} \approx 1,781797 = 1000 \text{ Cent}$    | $\frac{16}{9} \approx 1,777778 \approx 996,09 \text{ Cent}$  | 3,91             |
| Большая септима | $\sqrt[12]{2^{11}} = \sqrt[12]{2048} \approx 1,887749 = 1100 \text{ Cent}$ | $\frac{15}{8} = 1,875 \approx 1088,27 \text{ Cent}$          | 11,73            |
| Октава          | $\sqrt[12]{2^{12}} = 2 = 1200 \text{ Cent}$                                | $\frac{16}{8} = 2 = 1200 \text{ Cent}$                       | 0                |

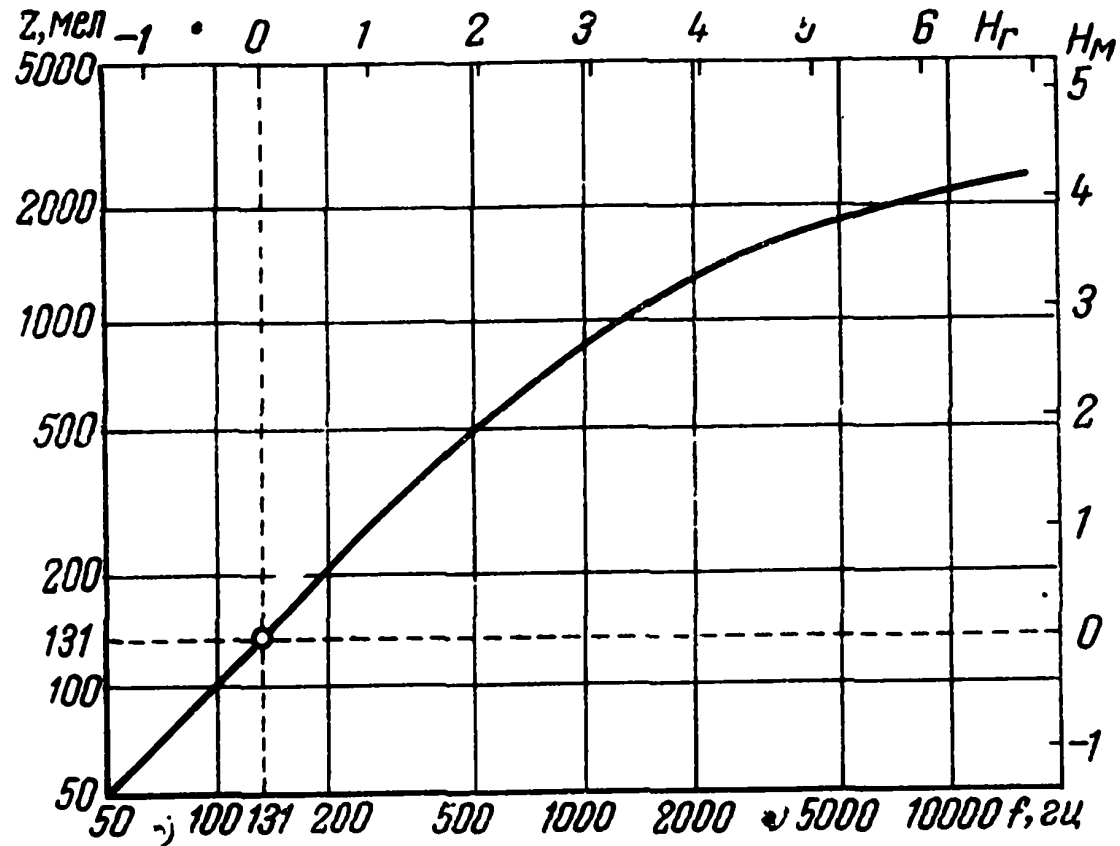
## Высота тона как параметр раздражения и как параметр ощущения



Частота  $f_2$  тонов, высота которых ощущается, как вдвое более низкая, чем частота  $f_1$ .

- Только на частотах  $f_1$  ниже 500 Гц,  $f_2 = \frac{1}{2} f_1$ , что соответствует определению частоты звука в физике.
- На частоте выше 500 Гц частота  $f_2$  становится все меньше и меньше половины  $f_1$ .
- Именно здесь параметр ощущения «высота звука» начинает отличаться от параметра раздражения, называемого частотой.

# Зависимость субъективно ощущаемой высоты тона $z$ от частоты $f$



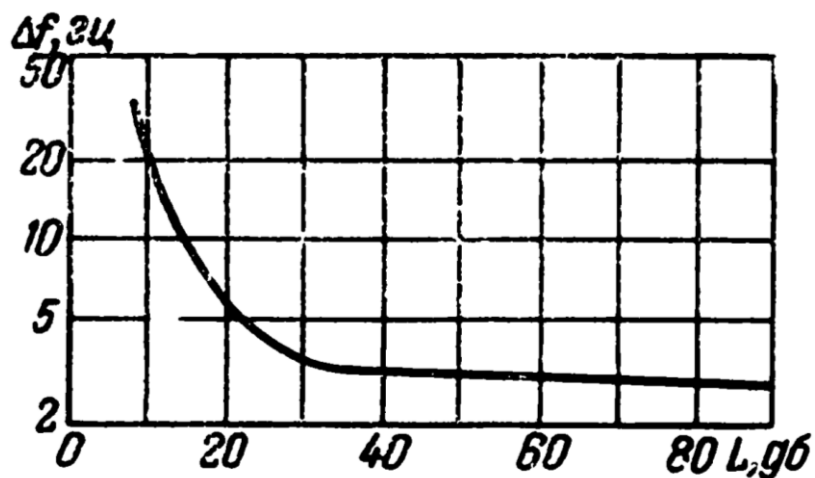
Следует различать:

- Частоту тона как физический параметр раздражения (шкала в Герцах) .
- Гармоническую высоту тона, которая используется при нотной записи и в основе своей является ничем иным, как логарифмом частоты, т.е. параметром раздражения.
- Высоту тона, как субъективный параметр ощущения (шкала в МЕЛах)
- По аналогии с с гармонической высотой – мелодическую высоту тона, которая образуется логарифмированием субъективной высоты тона.

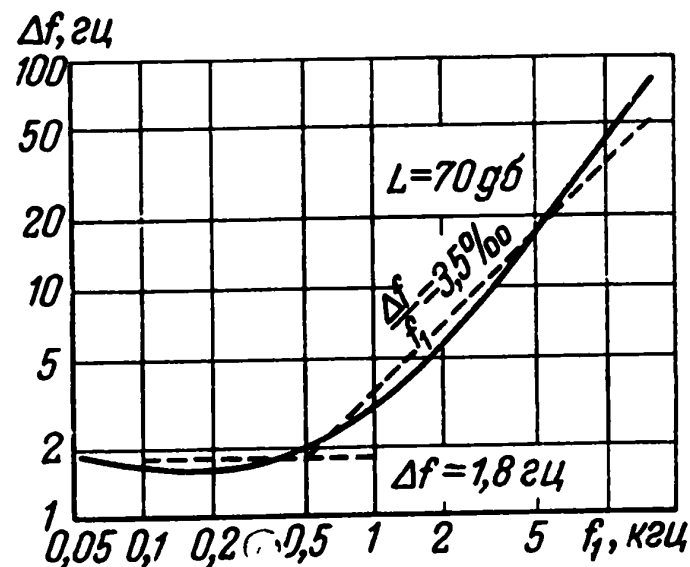
Видно, что на 7 гармонических октавах  $H_g$  уместается 4,3 мелодических  $H_m$  октав .



# Пороги различимости чистоты тонов

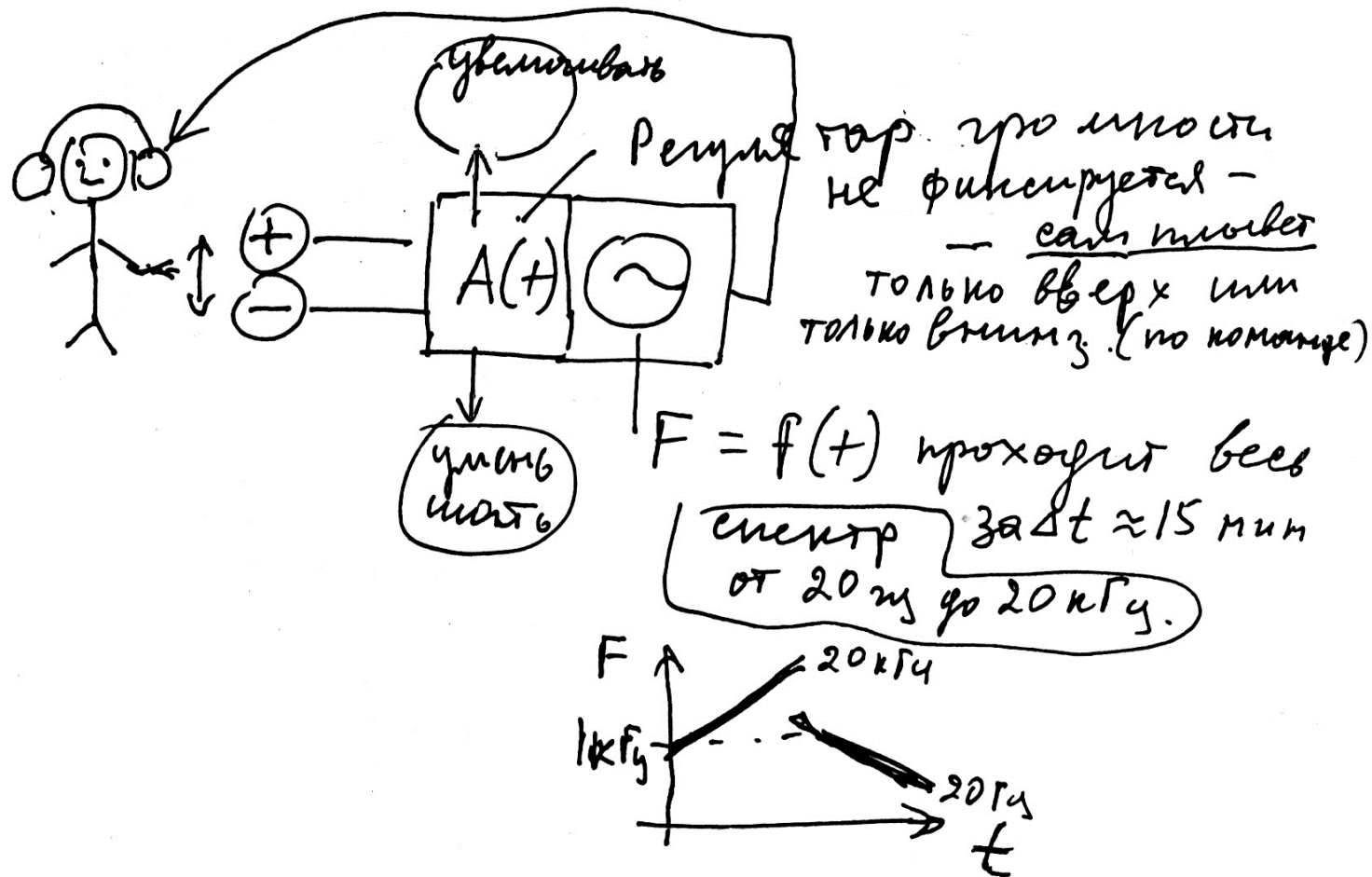


Минимально ощущаемая девиация  $\Delta f$  тона частоты 1 кГц в функции уровня звукового давления  
(частота модуляции 4 Гц)



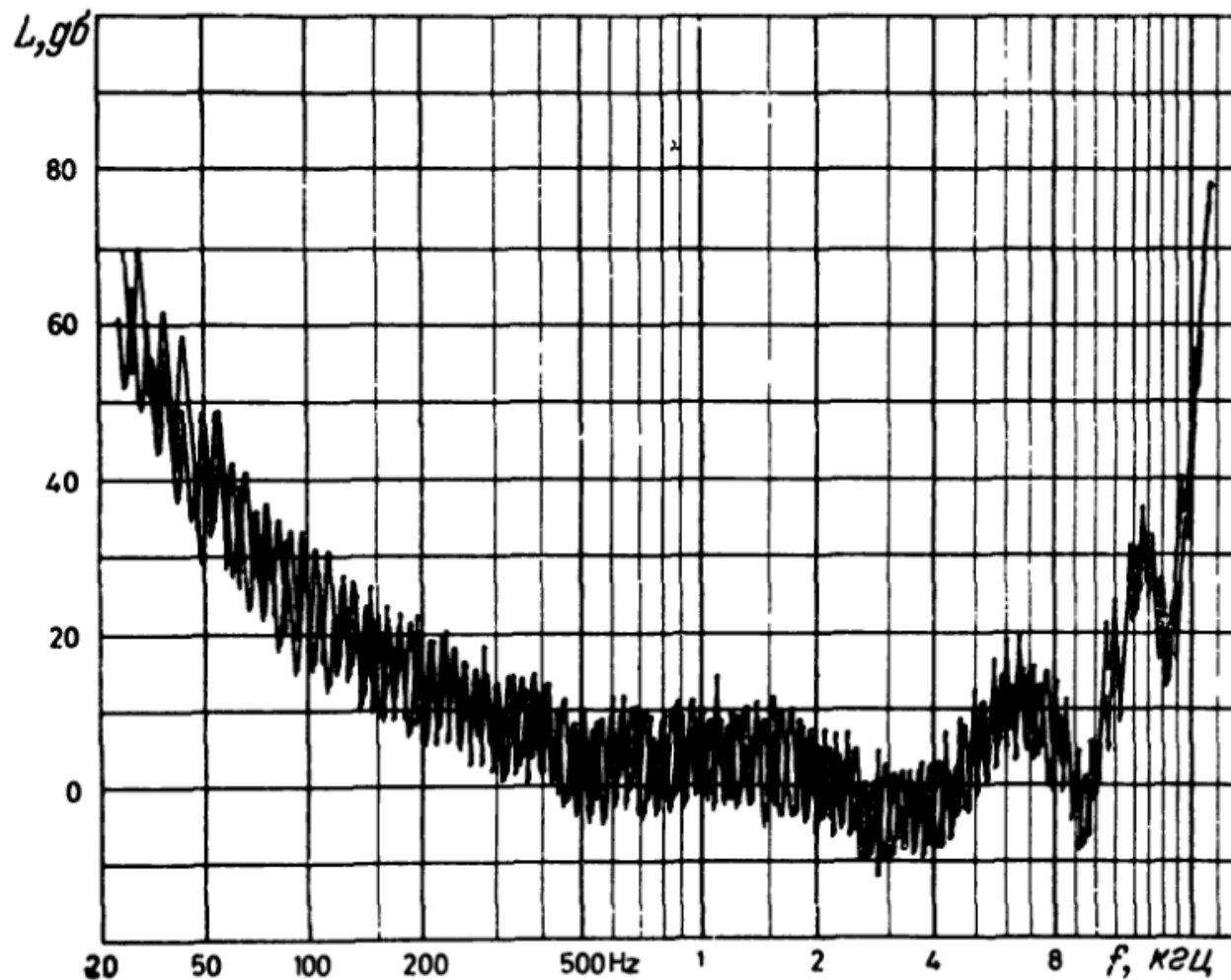
Минимально ощущаемая девиация  $\Delta f$  тона в функции его частоты  
(частота модуляции 4 Гц)

# Аудиометр Бекеша

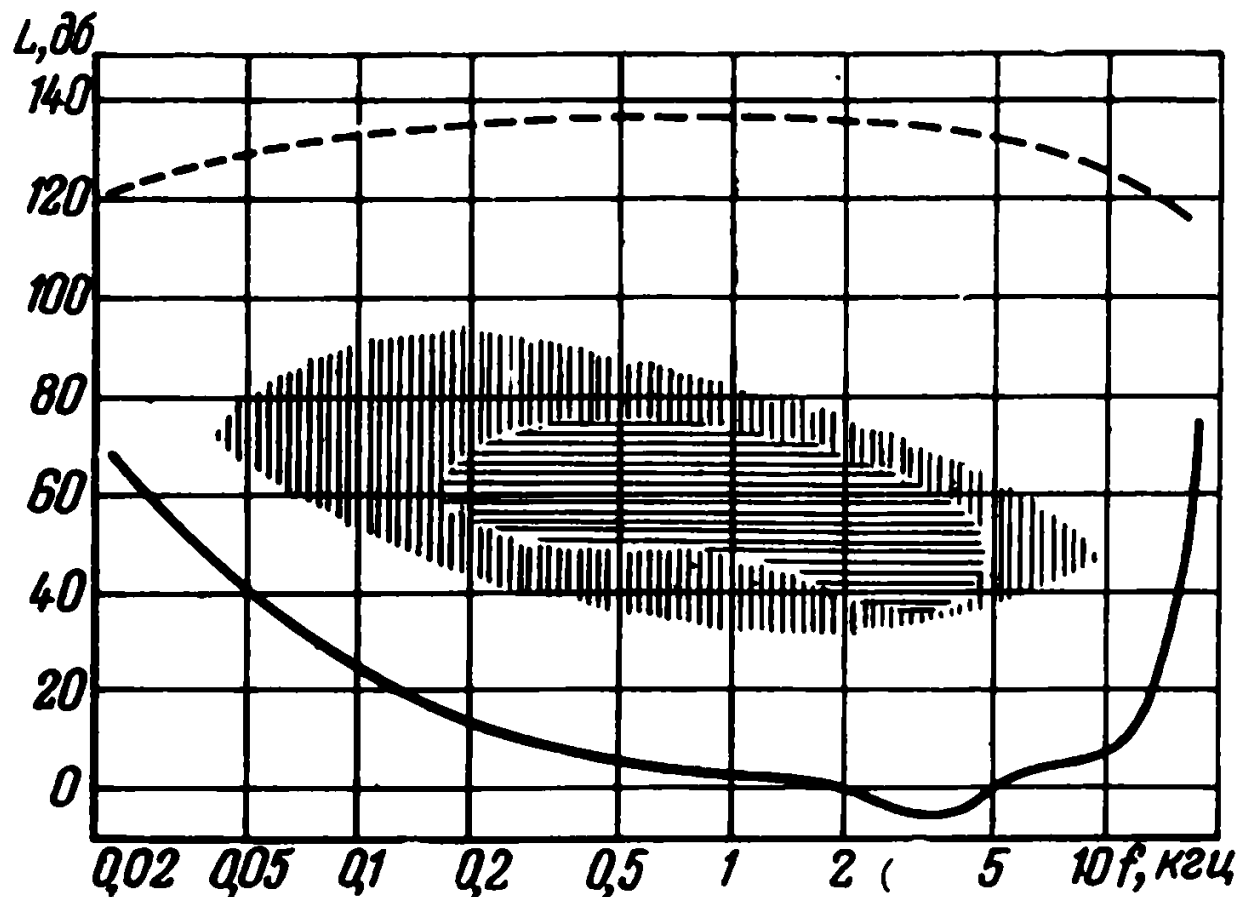




# Кривая порога слышимости

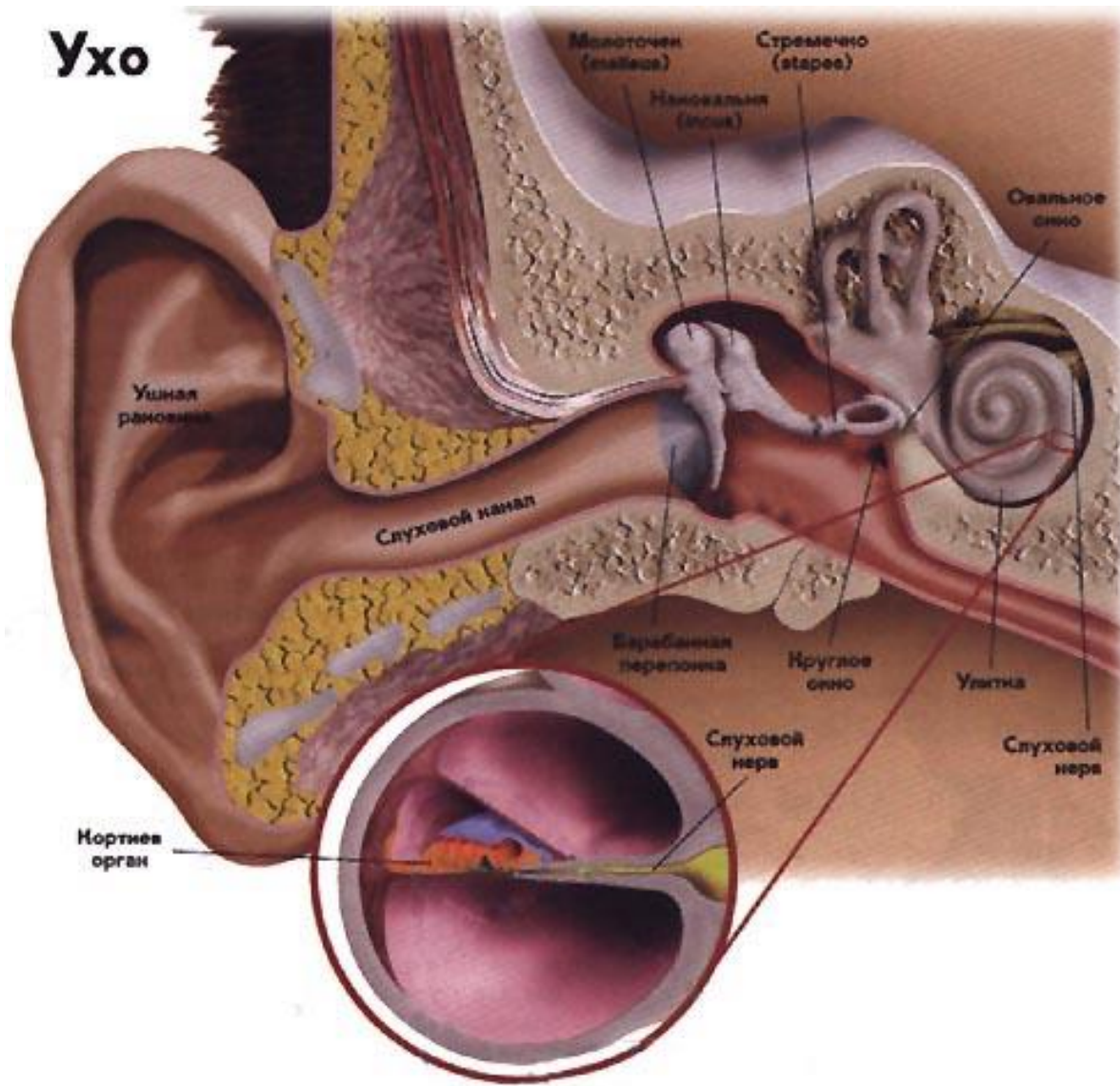


# Плоскость слышимости

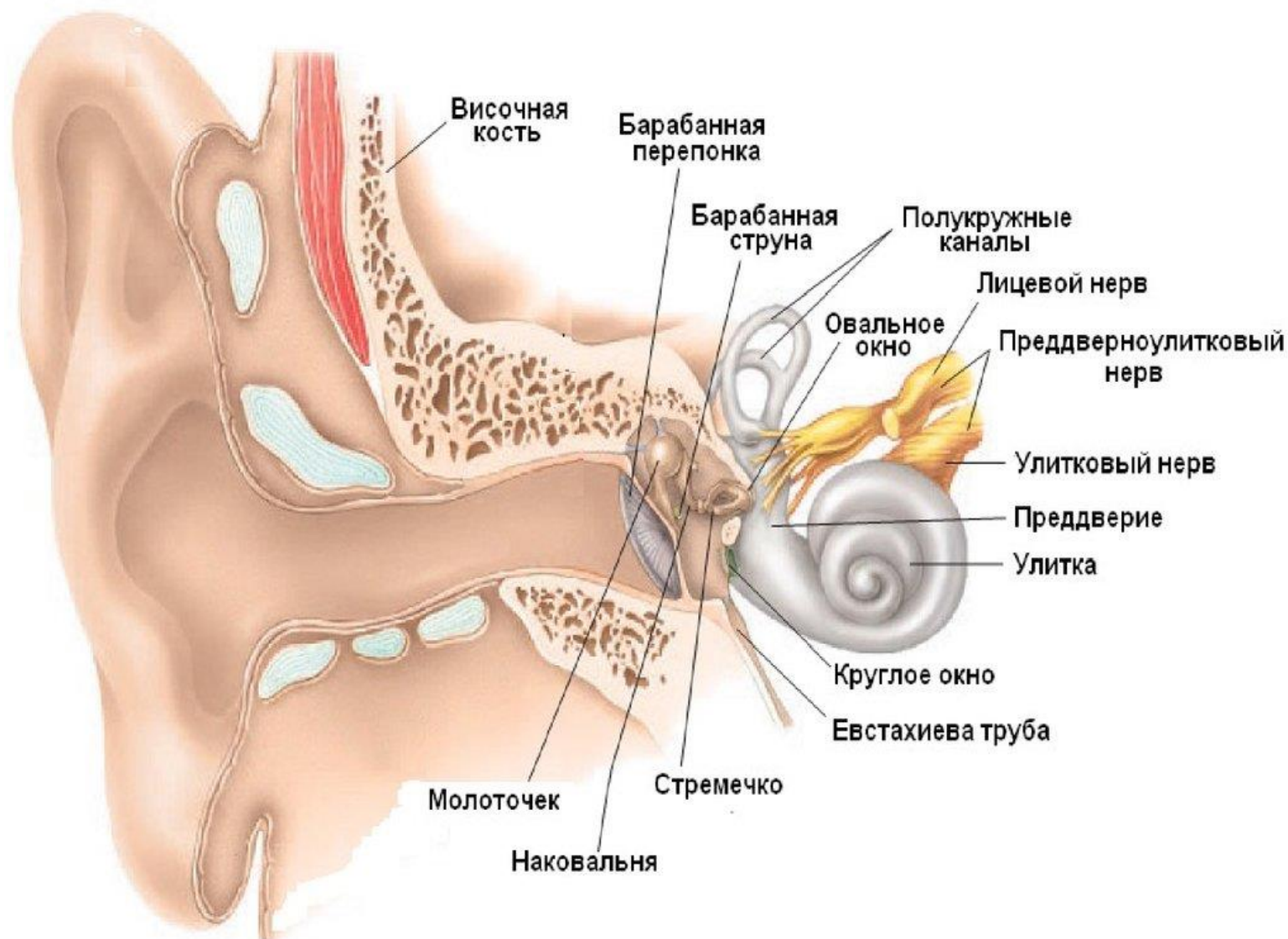


- Сплошная линия – порог слышимости
- Штриховая линия – болевой предел
- Вертикальная штриховка – область музыкальных звуков
- Горизонтальная штриховка – область речевых звуков

# Устройство слухового анализатора человека

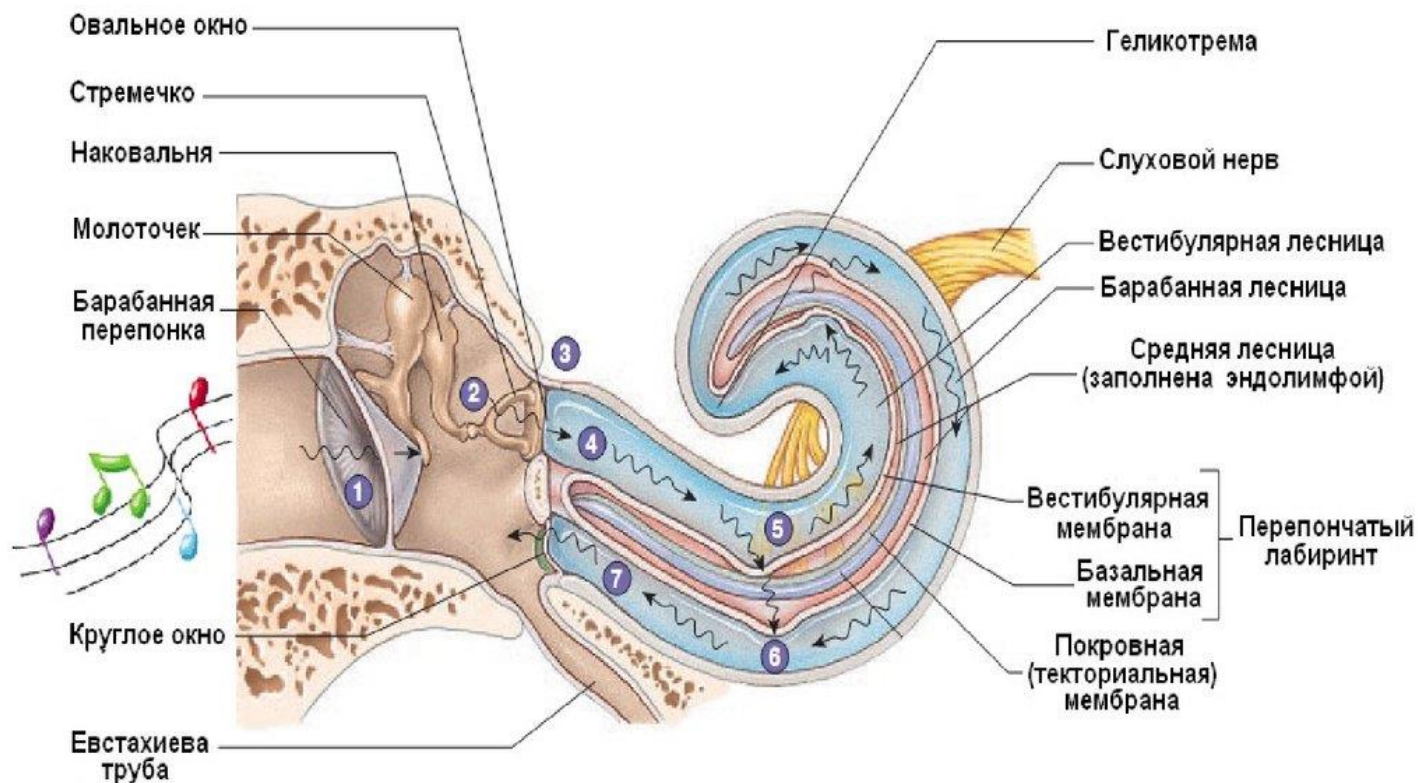


# Устройство слухового анализатора человека

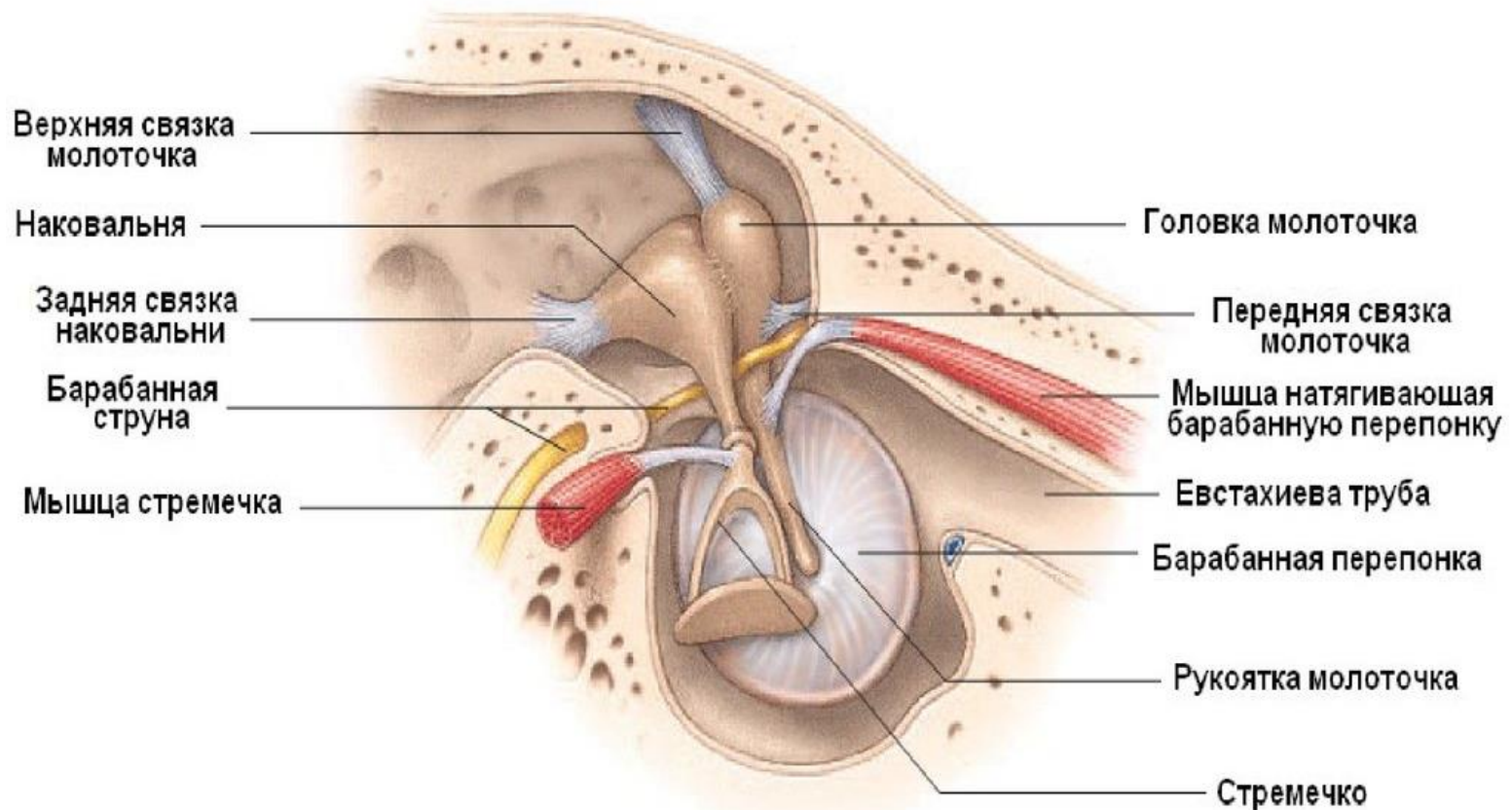




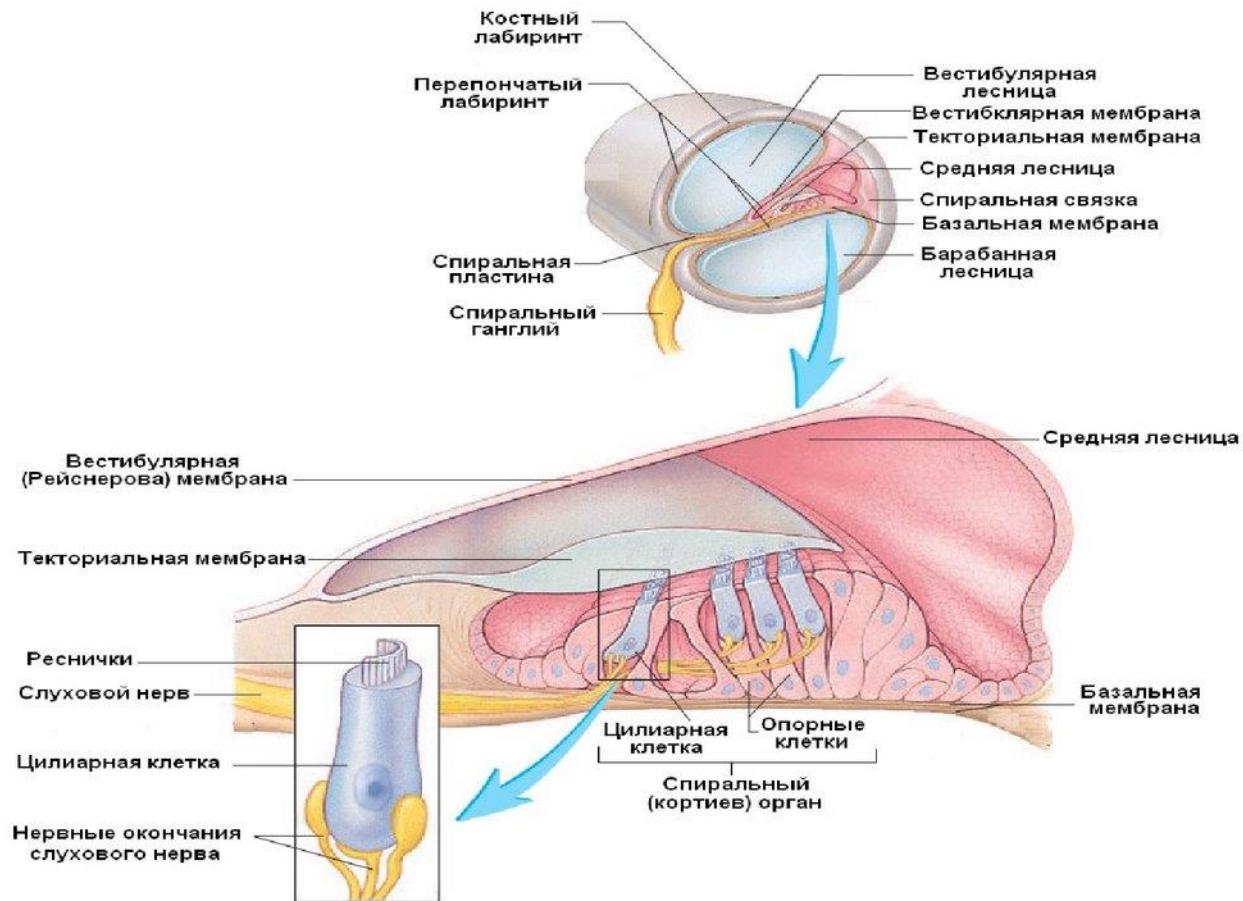
# Строение улитки



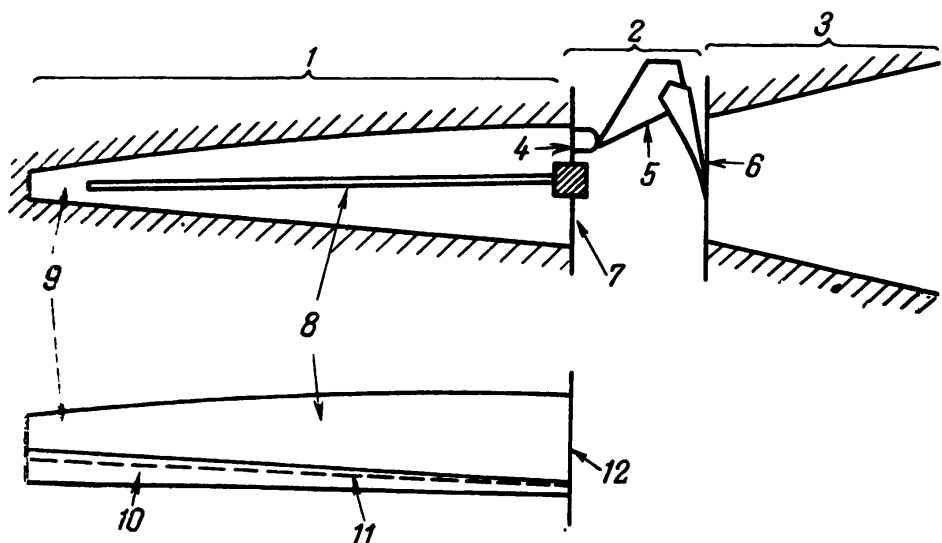
# Система согласования акустического импеданса воздушной среды в слуховом канале и жидкостной среды в улитке



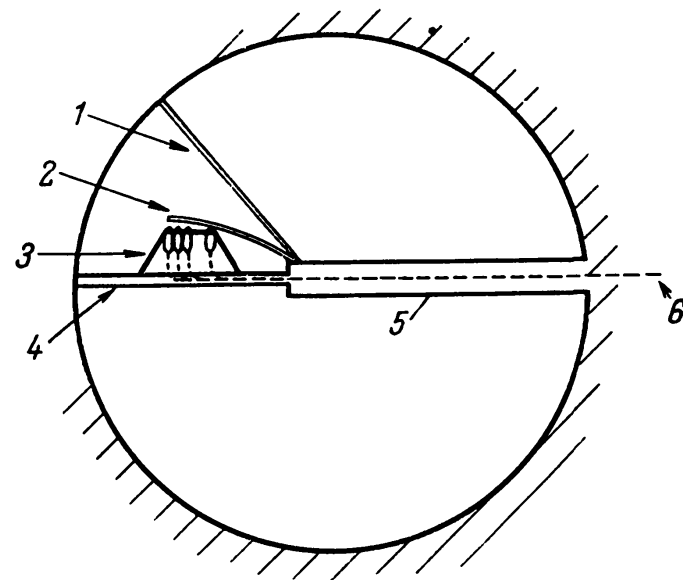
# Кортиев орган



# Схематическое представление слухового аппарата человека и поперечный разрез улитки внутреннего уха



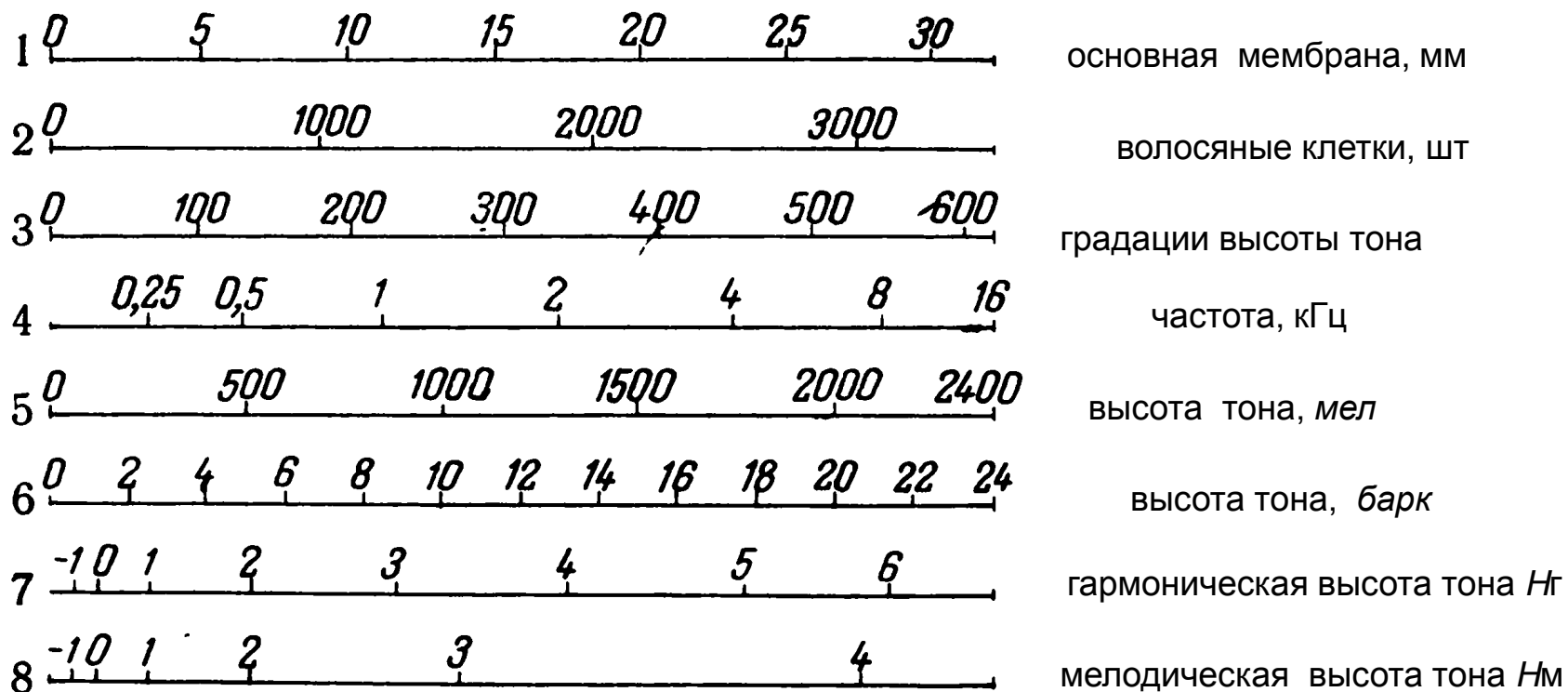
1 — внутреннее ухо (улитка); 2 — среднее ухо;  
 3 — наружное ухо; 4 — овальное окно;  
 5 — слуховые косточки; 6 — барабанная перепонка;  
 7 — круглое окно; 8 — перегородка улитки; 9 —  
 геликотрема; 10 — основная мембрана; 11 —  
 кортиев орган; 12 — овальное окно



1 — мембрана Рейснера;  
 2 — покровная мембрана;  
 3 — кортиев орган с чувствительными клетками;  
 4 — основная мембрана;  
 5 — перегородка улитки;  
 6 — слуховой нерв.



# Естественные шкалы основной мембраны



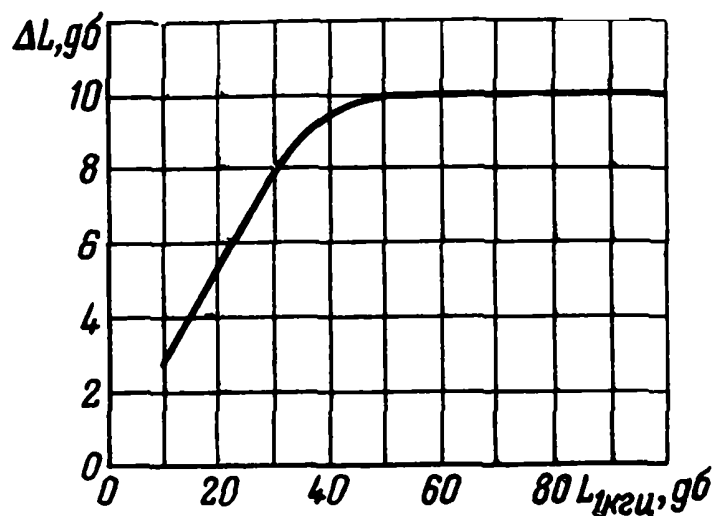
В кортиевоом органе 4 ряда клеток по 3500 клеток в каждом ряду

Спектр сигнала анализируется ухом **параллельно независимо и одновременно**. Нажав одновременно клавиши «до» и «ми» нам не удастся услышать «ре». Для глаза, смешав желтую и синюю спектральные чистые линии мы увидим зеленый свет (чего не покажет спектроскоп).

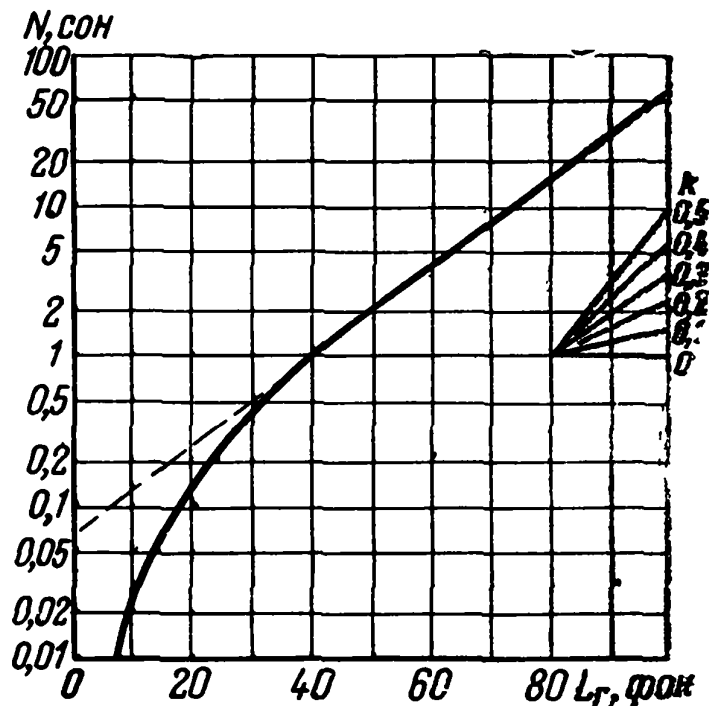
# Шумы

- Белый шум
- Равномерно маскирующий шум
- «Розовый» шум
- Равномерно воздействующий шум
- Полосовой шум (узкополосный и широкополосный)

# Субъективное восприятие громкости



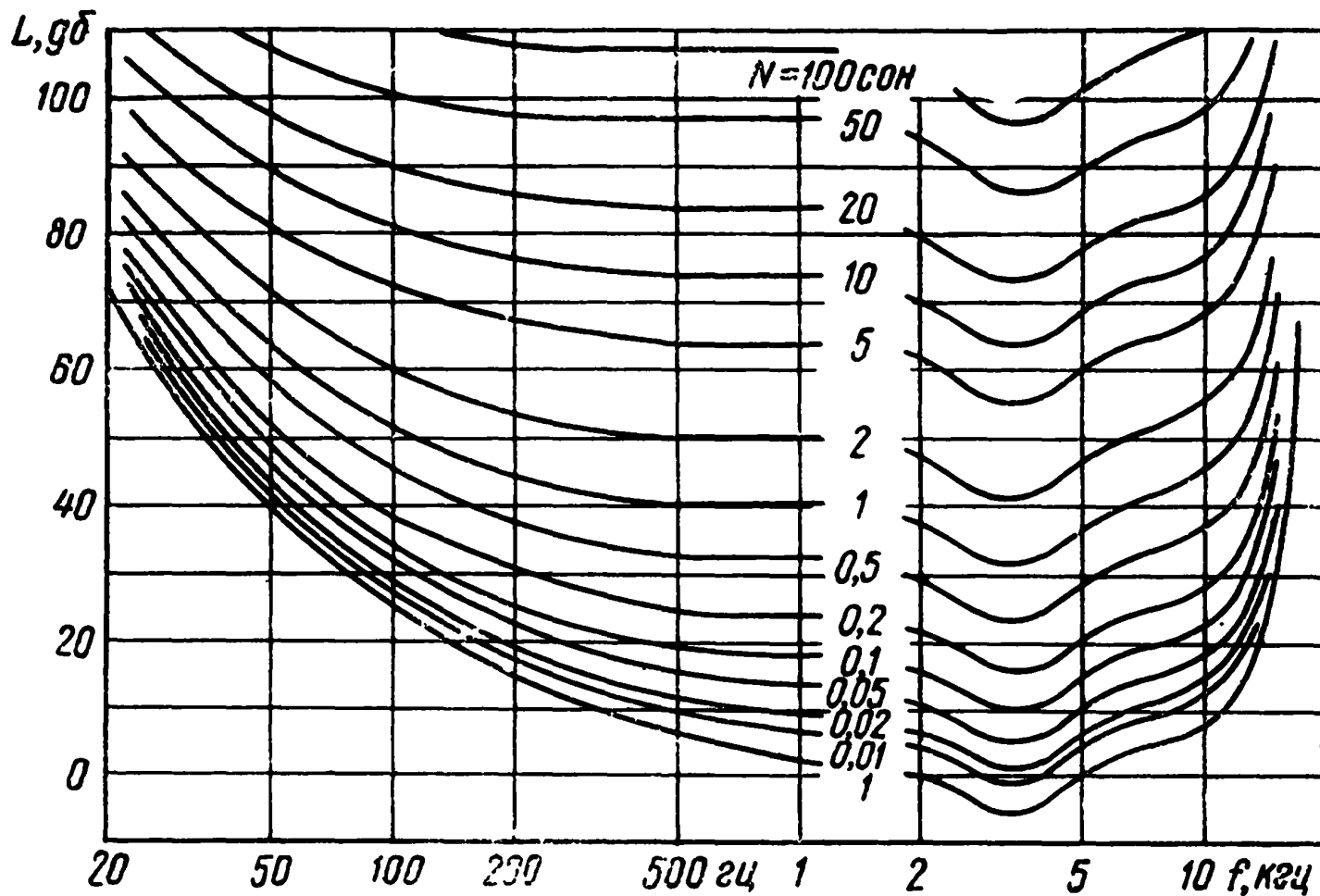
Приращение уровня звукового давления тона частотой 1 кГц при удвоении его субъективной громкости



Взаимосвязь между субъективной громкостью  $N$  и уровнем громкости  $L_r$

Видно, что зависимость нелинейная

# Кривые равной громкости на плоскости слышимости в плоском звуковом поле



**В сетчатке глаза 100 000 000 клеток  
Во внутреннем ухе всего 14000 нервных  
клеток.**

**Берегите слух!**



**Вопросы есть?**