

•

## Обертоны и спектр , тембр звука.

Уже более двухсот лет многие выдающиеся ученые пытаются дать научное определение этого параметра, которое, естественно, меняется с расширением наших представлений о механизмах работы слуховой системы. Определение тембра дается в трудах таких всемирно известных ученых, как Гельмгольц (1877), Флетчер (1938), Ликлайде (1951), Плом (1976), Наутсм (1989), Россин (1990), Ханде (1995).

**Тембр (timbre-фр.) означает «качество тона», «окраску тона» (tone quality).**

Американский стандарт ANSI-60-дает такое определение: «Тембр — атрибут слухового восприятия, который позволяет слушателю судить, что два звука, имеющие одинаковую высоту и громкость, различаются друг от друга».

В трудах Гельмгольца содержится следующее заключение: «разница в музыкальном качестве тона (тембре) зависит только от присутствия и силы парциальных тонов (обертонов), и не зависит от разности фаз, с которой эти парциальные тоны вступают в композицию». Это определение почти на сто лет определило направление исследований в области восприятия тембров, и претерпело существенные изменения и уточнения только в последние десятилетия. В трудах Гельмгольца был сделан еще целый ряд тонких наблюдений, которые подтверждаются современными результатами. В частности, им было установлено, что восприятие тембра зависит и от того, с какой скоростью парциальные тоны вступают в начале звука и умирают в его конце, а также, что наличие некоторых шумов и нерегулярностей помогает в распознавании тембров отдельных инструментов.

В 1938 г. Флетчер заметил, что тембр зависит от обертоновой структуры звука, но также изменяется при изменении громкости и высоты тона, хотя обертоновая структура может при этом сохраняться. В 1951 г. известный специалист Ликлайдер добавил, что тембр является многомерным объектом восприятия — он зависит от общей обертоновой структуры звука, которая также может меняться с изменением громкости и высоты тона.

В 1973 г. к определению тембра, данному в вышеприведенном стандарте ANSI, было сделано следующее добавление: «тембр зависит от спектра сигнала, но он также зависит от формы волны, звукового давления, расположения частот в спектре и временных характеристик звука».

Только к 1976 г. в работах Пломпа было доказано, что ухо не страдает «фазовой глухотой», и восприятие тембра зависит как от амплитудного спектра (в первую очередь, от формы спектральной огибающей), так и от фазового спектра. В 1990 году Россинг добавил, что тембр зависит от временной огибающей звука и его длительности. В работах 1993-1995 гг. отмечено, что тембр является субъективным атрибутом того или иного источника (например, голоса, музыкального инструмента), то есть он позволяет выделить этот источник из различных звуковых потоков в различных условиях. Тембр обладает достаточной

инвариантностью (стабильностью), что позволяет сохранить его в памяти, а также служит для сравнения ранее записанной и вновь поступившей в слуховую систему информации об источнике звука. Это предполагает определенный процесс обучения — если человек никогда не слышал звучание инструмента данного тембра, то он его и не узнает.

Французский математик Фурье (1768-1830) и его последователи доказали, что любое сложное колебание можно представить в виде суммы простейших колебаний, называемых **собственными частотами**, или, другими словами, что любую периодическую функцию, в случае ее соответствия некоторым математическим условиям, можно разложить в ряд (сумму) косинусов и синусов с некоторыми коэффициентами, называемый тригонометрическим рядом Фурье.

**Обертоном** называется любая собственная частота выше первой, самой низкой ( **основной тон** ), а те обертоны, частоты которых относятся к частоте основного тона как целые числа, называются **гармониками** , причем основной тон считается **первой гармоникой** .

Если звук содержит в своем спектре только гармоники, то их сумма является периодическим процессом и звук дает четкое ощущение высоты. При этом субъективно ощущаемая высота звука соответствует наименьшему общему кратному частот гармоник.

Совокупность обертонов, составляющих сложный звук, называют **спектром** этого звука.

По сути, спектр унтертонов (т.е. тонов, звучащих ниже основного тона) и обертонов представляет собой **тембр**.

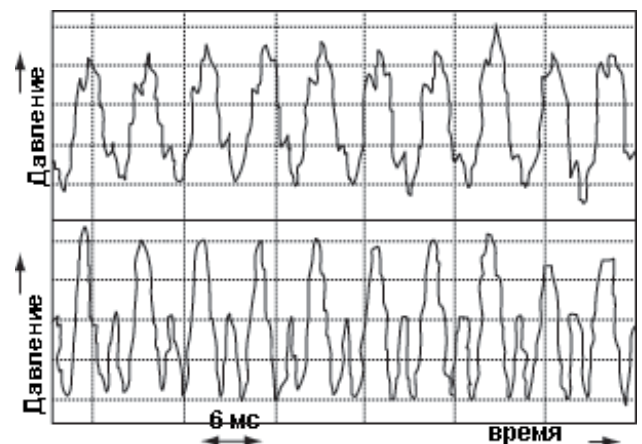
Разложение сложного звука на простейшие составляющие называют **спектральным анализом** , осуществляемым с помощью математического **преобразования Фурье** .

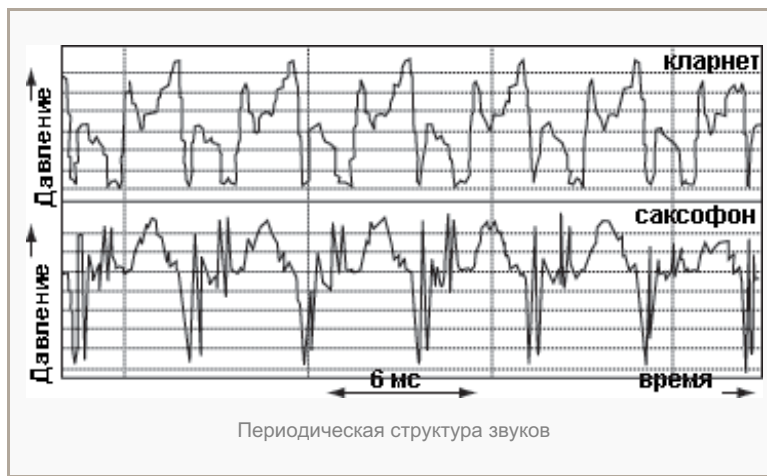
Как утверждает классическая теория, развиваемая, начиная с Гельмгольца почти все последующие сто лет, восприятие тембра зависит от спектральной структуры звука, то есть от состава обертонов и соотношения их амплитуд. Позволю себе напомнить, что обертоны — это все составляющие спектра выше фундаментальной частоты, а обертоны, частоты которых находятся в целочисленных соотношениях с основным тоном, называются гармониками.

Как известно, для того, чтобы получить амплитудный и фазовый спектр, необходимо выполнить преобразование Фурье от временной функции ( $t$ ), т. е. зависимости звукового давления  $p$  от времени  $t$ .

С помощью преобразования Фурье любой временной сигнал можно представить в виде суммы (или интеграла) составляющих его простых гармонических (синусоидальных) сигналов, а амплитуды и фазы этих составляющих образуют соответственно амплитудный и фазовый спектры.

С помощью созданных за последние десятилетия цифровых алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ или FFT), выполнить операцию по определению спектров можно также практически в любой программе обработки звука. Например, программа SpectroLab вообще является цифровым анализатором, позволяющим построить амплитудный и фазовый спектр музыкального сигнала в различной форме. Формы представления спектра могут быть различными, хотя представляют они одни и те же результаты расчетов.





## Тембр и общие принципы распознавания слуховых образов

Тембр является идентификатором физического механизма образования звука по ряду признаков, он позволяет выделить источник звука (инструмент или группу инструментов), и определить его физическую природу.

Это отражает общие принципы распознавания слуховых образов, в основе которых, как считает современная психоакустика, лежат принципы гештальт-психологии (*geschtalt*, нем. — «образ»), которая утверждает, что для разделения и распознавания различной звуковой информации, приходящей к слуховой системе от разных источников в одно и то же время (игра оркестра, разговор многих собеседников и др.) слуховая система (как и зрительная) использует некоторые общие принципы:

— сегрегация — разделение на звуковые потоки, т.е. субъективное выделение определенной группы звуковых источников, например, при музыкальной полифонии слух может отслеживать развитие мелодии у отдельных инструментов;

— подобие — звуки, похожие по тембру, группируются вместе и приписываются одному источнику, например, звуки речи с близкой высотой основного тона и похожим тембром определяются, как принадлежащие одному собеседнику;

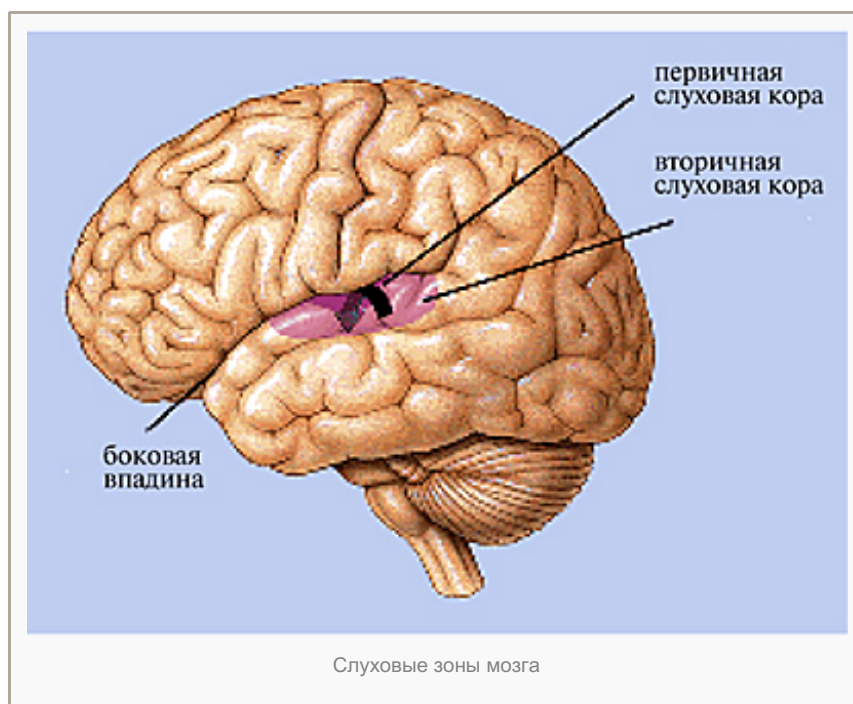
— непрерывность — слуховая система может интерполировать звук из единого потока через маскиер, например, если в речевой или музыкальный поток вставить короткий отрезок шума, слуховая система может не заметить его, звуковой поток будет продолжать восприниматься как непрерывный;

— «общая судьба» — звуки, которые стартуют и останавливаются, а также изменяются по амплитуде или частоте в определенных пределах синхронно, приписываются одному источнику.

Таким образом, мозг производит группировку поступившей звуковой информации как последовательную, определяя распределение по времени звуковых компонент в рамках одного звукового потока, так и параллельную, выделяя частотные компоненты присутствующие и изменяющиеся одновременно. Кроме того, мозг все время проводит сравнение поступившей звуковой информации с «записанными» в процессе обучения в памяти звуковыми образами. Сравнивая поступившие сочетания звуковых потоков с имеющимися образами, он или легко их идентифицирует, если они совпадают с этими образами, или, в случае неполного совпадения, приписывает им какие-то особые свойства (например, назначает виртуальную высоту тона, как в звучании колоколов).

Во всех этих процессах распознавание тембра играет принципиальную роль, поскольку тембр является механизмом, с помощью которого экстрактируются из физических свойств признаки, определяющие

качество звука: они записываются в памяти, сравниваются с уже записанными, и затем идентифицируются в определенных зонах коры головного мозга.



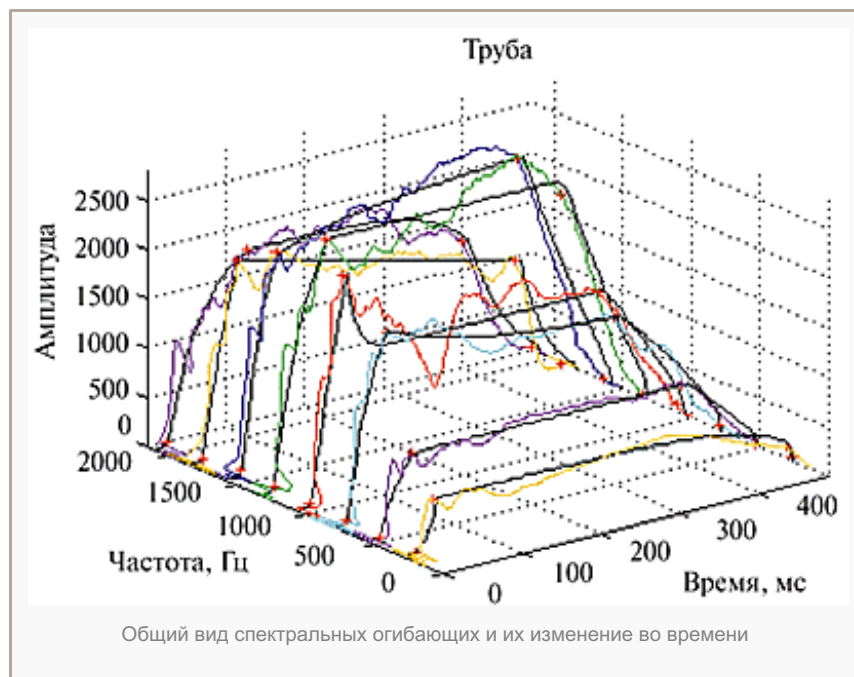
Тембр — ощущение многомерное, зависящее от многих физических характеристик сигнала и окружающего пространства. Были проведены работы по шкалированию тембра в метрическом пространстве (шкалы — это различные спектрально-временные характеристики сигнала, см. вторую часть статьи в предыдущем номере). В последние годы, однако, появилось понимание, что классификация звуков в субъективно воспринимаемом пространстве не соответствует обычному ортогональному метрическому пространству, там происходит классификация по «субпространствам», связанным с вышеуказанными принципами, которые и не метрические, и не ортогональные.

Разделяя звуки по этим субпространствам, слуховая система определяет «качество звука», то есть тембр, и решает, к какой категории отнести эти звуки. Однако следует отметить, что все множество субпространств в субъективно воспринимаемом звуковом мире строится на основе информации о двух параметрах звука из внешнего мира — интенсивности и времени, а частота определяется временем прихода одинаковых значений интенсивности. Тот факт, что слух разделяет поступившую звуковую информацию сразу по нескольким субъективным субпространствам, повышает вероятность того, что в каком-то из них она может быть распознана. Именно на выделение этих субъективных субпространств, в которых происходит распознавание тембров и других признаков сигналов, и направлены усилия ученых в настоящее время.

Существенное влияние на восприятие тембра музыкального инструмента или голоса оказывает структура его стационарного (усредненного) спектра: состав обертонов, их расположение на частотной шкале, их частотные соотношения, распределения амплитуд и форма огибающей спектра, наличие и форма формантных областей и т.д., что полностью подтверждает положения классической теории тембра, изложенные еще в трудах Гельмгольца. Однако экспериментальные материалы, полученные за последние десятилетия, показали, что не менее существенную, а, может быть, и гораздо более существенную роль в распознавании тембра играет нестационарное изменение структуры звука и, соответственно, процесс развертывания во времени его спектра, в первую очередь, на начальном этапе атаки звука.

Подводя некоторые итоги, можно сказать, что основными физическими признаками, по которым определяется тембр инструмента, и его изменение во времени, являются:

- *выстраивание амплитуд обертонов в период атаки;*
- *изменение фазовых соотношений между обертонами от детерминированных к случайным (в частности, за счет негармоничности обертонов реальных инструментов);*
- *изменение формы спектральной огибающей во времени во все периоды развития звука: атаки, стационарной части и спада;*
- *наличие нерегулярностей спектральной огибающей и положение спектрального центроида (максимума спектральной энергии, что связано с восприятием формант) и их изменение во времени;*



- *наличие модуляций — амплитудной (тремоло) и частотной (вibrато);*
- *изменение формы спектральной огибающей и характера ее изменения во времени;*
- *изменение интенсивности (громкости) звучания, т.е. характера нелинейности звукового источника;*
- *наличие дополнительных признаков идентификации инструмента, например, характерный шум смычка, стук клапанов, скрип винтов на рояле и др.*

Разумеется, все это не исчерпывает перечень физических признаков сигнала, определяющих его тембр. Поиски в этом направлении продолжаются.

## Приложение

### Вербальное (словесное) описание тембра

Если для оценки высоты звуков имеются соответствующие единицы измерения: психофизические (мелы), музыкальные (октавы, тоны, полутоны, центы); есть единицы для громкости (соны, фонь), то для тембров такие шкалы построить невозможно, поскольку это понятие многомерное. Поэтому, наряду с описанными выше поисками корреляции восприятия тембра с объективными параметрами звука, для характеристики тембров музыкальных инструментов пользуются словесными описаниями, подобранными по признакам противоположности: яркий — тусклый, резкий — мягкий и др.



В научной литературе имеется большое количество понятий, связанных с оценкой тембров звука. Например, анализ терминов, принятых в современной технической литературе, позволил выявить наиболее часто встречающиеся термины, показанные в таблице. Были сделаны попытки выявить самые значимые среди них, и провести шкалирование тембра по противоположным признакам, а также связать словесное описание тембров с некоторыми акустическими параметрами.

<b>Таблица</b> Основные субъективные термины для описания тембра, используемые в современной международной технической литературе (статистический анализ 30 книг и журналов)	forceful — усиленный	muffled — заглушенный	sober — трезвый (рассудительный)
antique — старинный	frosty — морозный	mushy — пористый	soft — мягкий
arching — выпуклый	full — полный	mysterious — загадочный	solemn — торжественный
articulate — разборчивый	fuzzy — пушистый	nasal — носовой	solid — твердый
austere — суровый	gauzy — тонкий	neat — аккуратный	somber — мрачный
bite, biting — кусачий	gentle — нежный	neutral — нейтральный	sonorous — звучный
bland — вкрадчивый	ghostlike — призрачный	noble — благородный	steely — стальной
blaring — ревуший	glassy — стеклянный	nondescript — неопиcуемый	strained — натянутый
bleating — блеющий	glittering — блестящий	nostalgic — ностальгический	strident — скрипучий
breathy — дыхательный	gloomy — унылый	ominous — зловещий	stringent — стесненный
bright — яркий	grainy — зернистый	ordinary — ординарный	strong — сильный
brilliant — блестящий	grating — скрипучий	pale — бледный	stuffy — душный
brittle — подвижный	grave — серьезный	passionate — страстный	subdued — смягченный
buzzy — жужжащий	growly — рычащий	penetrating — проникающий	sultry — знойный

calm — спокойный	hard — жесткий	piercing — пронзительный	sweet — сладкий
carrying — полетный	harsh — грубый	pinched — ограниченный	tangy — запутанный
centered — концентрированный	haunting — преследующий	placid — безмятежный	tart — кислый
clangorous — звенящий	hazy — смутный	plaintive — заунывный	tearing — неистовый
clear, clarity — ясный	heartly — искренний	ponderous — увесистый	tender — нежный
cloudy — туманный	heavy — тяжелый	powerful — мощный	tense — напряженный
coarse — грубый	heroic — героический	prominent — выдающийся	thick — толстый
cold — холодный	hoarse — хриплый	pungent — едкий	thin — тонкий
colorful — красочный	hollow — пустой	pure — чистый	threatening — угрожающий
colorless — бесцветный	honking — гудящий (автомобильный гудок)	radiant — сияющий	throaty — хриплый
cool — прохладный	hooty — гудящий	raspy — дребезжащий	tragic — трагичный
crackling — трескучий	husky — сиплый	rattling — грохочущий	tranquil — успокаивающий
crashing — ломаный	incandescence — накаленный	reedy — пронзительный	transparent — прозрачный
creamy — сливочный	incisive — резкий	refined — рафинированный	triumphant — торжествующий
crystalline — кристаллический	inexpressive — невыразительный	remote — удаленный	tubby — бочкообразный
cutting — резкий	intense — интенсивный	rich — богатый	turbid — мутный
dark — темный	introspective — углубленный	ringing — звенящий	turgid — высокопарный

deep — глубокий	joyous — радостный	robust — грубый	unfocussed — несфокусированный
delicate — деликатный	languishing — печальный	rough — терпкий	unobtrusive — скромный
dense — плотный	light — светлый	rounded — круглый	veiled — завуалированный
diffuse — рассеянный	limpid — прозрачный	sandy — песочный	velvety — бархатистый
dismal — отдаленный	liquid — водянистый	savage — дикий	vibrant — вибрирующий
distant — отчетливый	loud — громкий	screamy — кричащий	vital — жизненный
dreamy — мечтательный	luminous — блестящий	sere — сухой	voluptuous — пышный(роскошный)
dry — сухой	lush (luscious) — сочный	serene, serenity — спокойный	wan — тусклый
dull — скучный	lyrical — лирический	shadowy — затененный	warm — теплый
earnest — серьезный	massive — массивный	sharp — резкий	watery — водянистый
ecstatic — экстатический	meditative — созерцательный	shimmer — дрожащий	weak — слабый
ethereal — эфирный	melancholy — меланхолический	shouting — кричащий	weighty — тяжеловесный
exotic — экзотический	mellow — мягкий	shrill — пронзительный	white — белый
expressive — выразительный	melodious — мелодичный	silky — шелковистый	windy — ветряный
fat — жирный	menacing — угрожающий	silvery — серебристый	wispy — тонкий
fierce — жесткий	metallic — металлический	singing — певучий	woody — деревянный
flabby — дряблый	misty — неясный	sinister — злобный	yearning — тоскливый
focussed — сфокусированный	mournful — траурный	slack — расхлябанный	



forboding — отталкивающий

muddy — грязный

smooth —  
гладкий

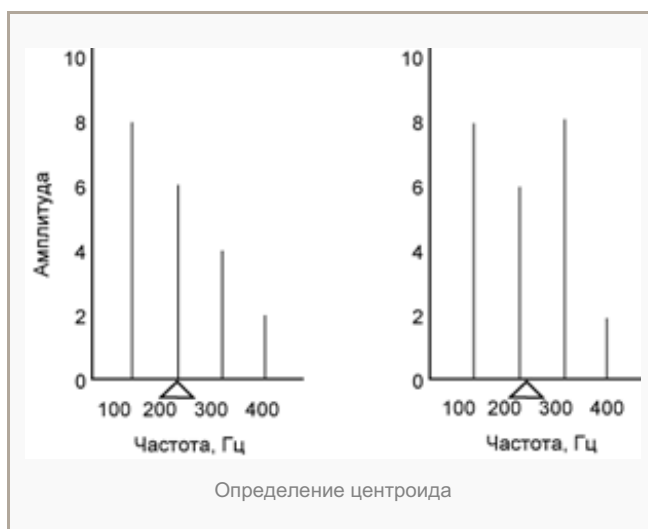
Однако, главная проблема состоит в том, что нет однозначного понимания различных субъективных терминов, описывающих тембр. Приведенный в таблице перевод далеко не всегда соответствует тому техническому смыслу, которое вкладывается в каждое слово при описании различных аспектов оценки тембра.

В нашей литературе раньше был стандарт на основные термины, но сейчас дела обстоят совсем печально, поскольку не ведется работа по созданию соответствующей русскоязычной терминологии, и употребляется много терминов в разных, иногда прямо противоположных, значениях.

В связи с этим AES при разработке серии стандартов по субъективным оценкам качества аудиоаппаратуры, систем звукозаписи и др. начал приводить определения субъективных терминов в приложениях к стандартам, а так как стандарты создаются в рабочих группах, включающих ведущих специалистов разных стран, то эта очень важная процедура приводит к согласованному пониманию основных терминов для описания тембров.

В соответствии с современными взглядами, важнейшую роль для восприятия тембра имеет изменение динамики распределения максимума энергии между обертонами спектра.

Для оценки этого параметра введено понятие «центроид спектра», который определяется как средняя точка распределения спектральной энергии звука, его иногда определяют как «балансную точку» спектра. Способ определения его состоит в том, что рассчитывается значение некоторой средней частоты:  $F = \frac{\sum A_i f_i}{\sum A_i}$ , где  $A_i$  амплитуда составляющих спектра,  $f_i$  их частота. Для примера, это значение центроида составляет 200 Гц.



$$F = (8 \times 100 + 6 \times 200 + 4 \times 300 + 2 \times 400) / (8 + 6 + 4 + 2) = 200.$$

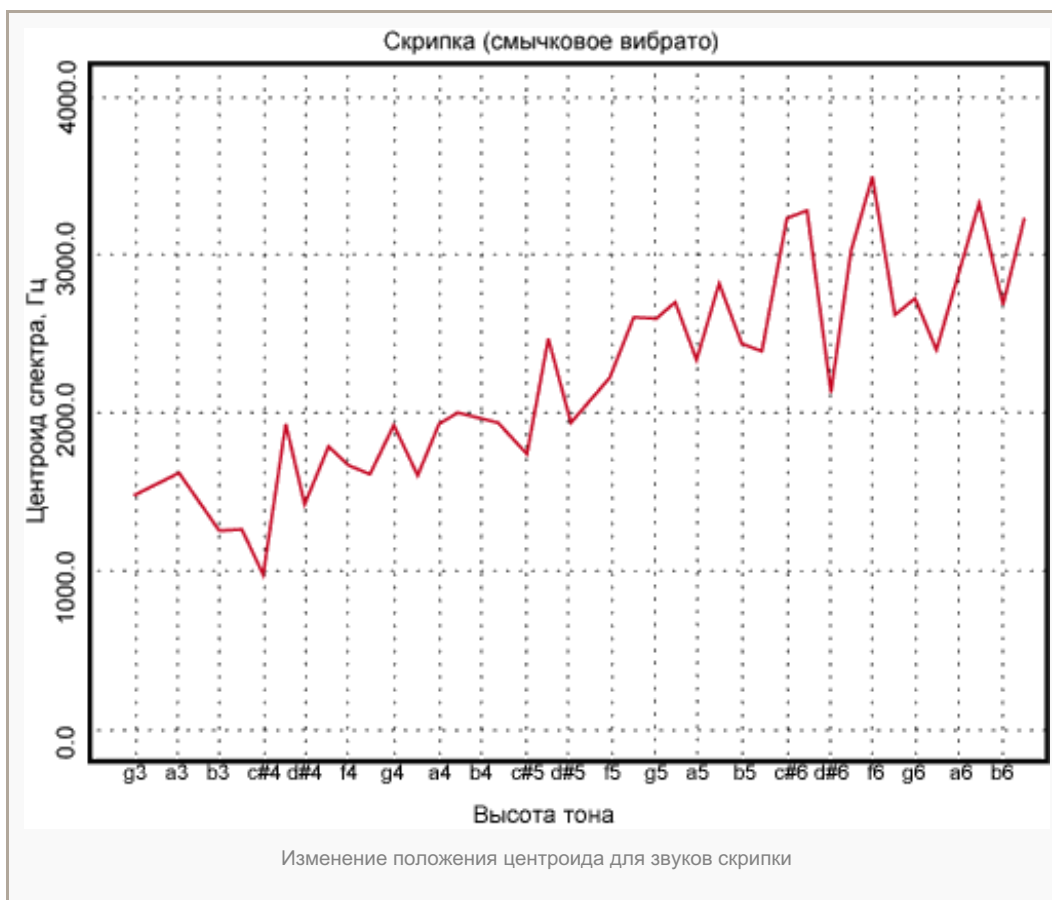
Смещение центроида в сторону высоких частот ощущается как повышение яркости тембра.

Существенное влияние распределения спектральной энергии по частотному диапазону и ее изменения во времени на восприятие тембра связано, вероятно, с опытом распознавания звуков речи по формантным признакам, которые и несут информацию о концентрации энергии в различных областях спектра (неизвестно, правда, что было первичным).

Эта способность слуха имеет существенное значение при оценке тембров музыкальных инструментов, поскольку наличие формантных областей характерно для большинства музыкальных инструментов, например, у скрипок в областях 800...1000 Гц и 2800...4000 Гц, у кларнетов 1400...2000 Гц и т.д. Соответственно, их положение и динамика изменения во времени влияют на восприятие индивидуальных особенностей тембра.

Известно, какое значительное влияние на восприятие тембра певческого голоса оказывает наличие высокой певческой форманты (в области 2100...2500 Гц у басов, 2500...2800 Гц у теноров, 3000...3500 Гц у сопрано). В этой области у оперных певцов сосредоточивается до 30% акустической энергии, что обеспечивает звонкость и полетность голоса. Удаление с помощью фильтров певческой форманты из записей различных голосов (эти опыты были выполнены в исследованиях проф. В.П. Морозова) показывает, что тембр голоса становится тусклым, глуховатым и вялым.

Изменение тембра при изменении громкости исполнения и транспонировании по высоте также сопровождается сдвигом центроида за счет изменения количества обертонов. Пример изменения положения центроида для звуков скрипки разной высоты показан на рисунке 9 (по оси абсцисс отложена частота расположения центроида в спектре). Исследования показали, что у многих музыкальных инструментов имеется почти монотонная связь между увеличением интенсивности (громкости) и сдвигом центроида в высокочастотную область, за счет чего тембр становится ярче.



Наконец, различие в восприятии тембров реальных звуков и звуков с «виртуальной высотой», т.е. звуков, высоту которых мозг «достраивает» по нескольким целочисленным обертонам спектра (это характерно, например, для звуков колоколов), можно объяснить с позиций положения центроида спектра. Поскольку у этих звуков значение частоты основного тона, т.е. высоты, может быть одинаковым, а положение центроида разное из-за разного состава обертонов, то, соответственно, тембр будет восприниматься по-разному.

Интересно отметить, что еще более десяти лет назад для измерения акустической аппаратуры был предложен новый параметр, а именно трехмерный спектр распределения энергии по частоте и по времени, так называемое распределение Вигнера, которое достаточно активно используется различными фирмами для оценки аппаратуры, поскольку, как показывает опыт, позволяет установить наилучшее соответствие с ее качеством звучания. Учитывая изложенное выше свойство слуховой системы использовать динамику изменения энергетических признаков звукового сигнала для определения тембра, можно предположить, что этот параметр распределение Вигнера может быть полезен и для оценки музыкальных инструментов.

Оценка тембров различных инструментов всегда носит субъективный характер, но если при оценке высоты и громкости можно на основе субъективных оценок расположить звуки по определенной шкале (и даже ввести специальные единицы измерения «сон» для громкости и «мел» для высоты), то оценка тембра значительно более трудная задача. Обычно для субъективной оценки тембра слушателям предъявляются пары звуков, одинаковых по высоте и громкости, и их просят расположить эти звуки по разным шкалам между различными противоположными описательными признаками: **«яркий»/«темный»**, **«звонкий»/«глухой»** и т.д. (О выборе различных терминов для описания тембров и о рекомендациях международных стандартов по этому вопросу мы обязательно поговорим в дальнейшем).

Существенное влияние на определение таких параметров звука, как высота, тембр и др., оказывает поведение во времени первых пяти-семи гармоник, а также ряда «неразвернутых» гармоник до 15...17-ой.

Однако, как известно из общих законов психологии, кратковременная память человека может одновременно оперировать не более чем семью-восемью символами. Поэтому очевидно, что и при распознавании и оценке тембра используется не более семи-восьми существенных признаков.

Попытки установить эти признаки путем систематизации и усреднения результатов экспериментов, найти обобщенные шкалы, по которым можно было бы идентифицировать тембры звуков различных инструментов, связать эти шкалы с различными временно-спектральными характеристиками звука, предпринимаются уже давно.

## Основные механизмы звукообразования речи

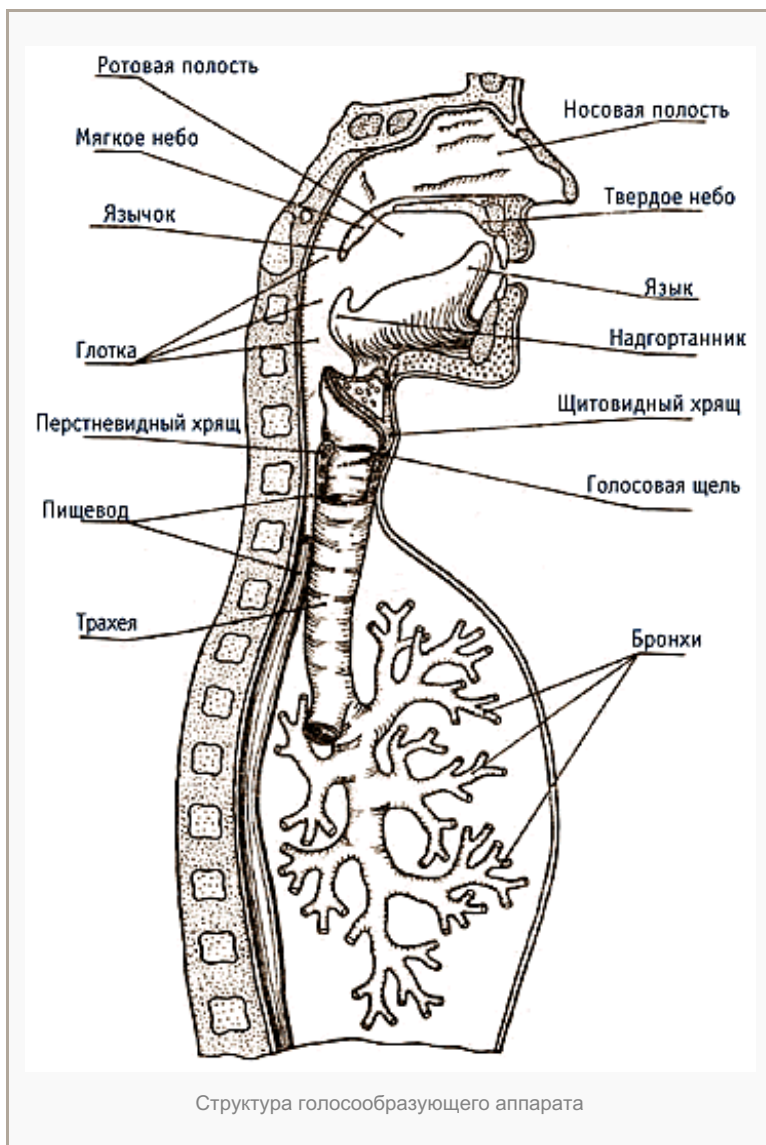
Речевой сигнал является средством передачи разнообразной информации как вербальной (словесной), так и невербальной (эмоциональной). Для быстрой передачи информации в процессе эволюции был отобран особым образом закодированный и структурированный акустический сигнал. Для создания такого специализированного акустического сигнала используется «голосовой аппарат», совмещенный с физиологическим аппаратом, предназначенным для дыхания и жевания (поскольку речь возникла на поздних стадиях эволюции, то к речеобразованию пришлось приспособить уже имеющиеся органы

Процесс образования и восприятия речевых сигналов, схематически показанный на рисунке 1, включает в себя следующие основные этапы: формулировка сообщения, кодирование в языковые элементы, нейромускульные действия, движения элементов голосового тракта, излучение акустического сигнала, спектральный анализ и выделение акустических признаков в периферической слуховой системе, передача выделенных признаков по нейронным сетям, распознавание языкового кода (лингвистический анализ), понимание смысла сообщения.



Голосовой аппарат является, по существу, духовым музыкальным инструментом. Однако среди всех музыкальных инструментов он не имеет себе равных по своей многогранности, разносторонности, возможности передачи малейших оттенков и др. Все способы звукоизвлечения, которые используются в духовых инструментах, используются и в процессе образования речи (в т.ч. вокальной речи), однако все они

перестраиваемы (по приказам мозга), и имеют широчайшие возможности, недоступные ни одному инструменту.



Если рассматривать структуру голосообразующего аппарата как духового музыкального инструмента, он состоит из трех основных частей (рисунок 2):

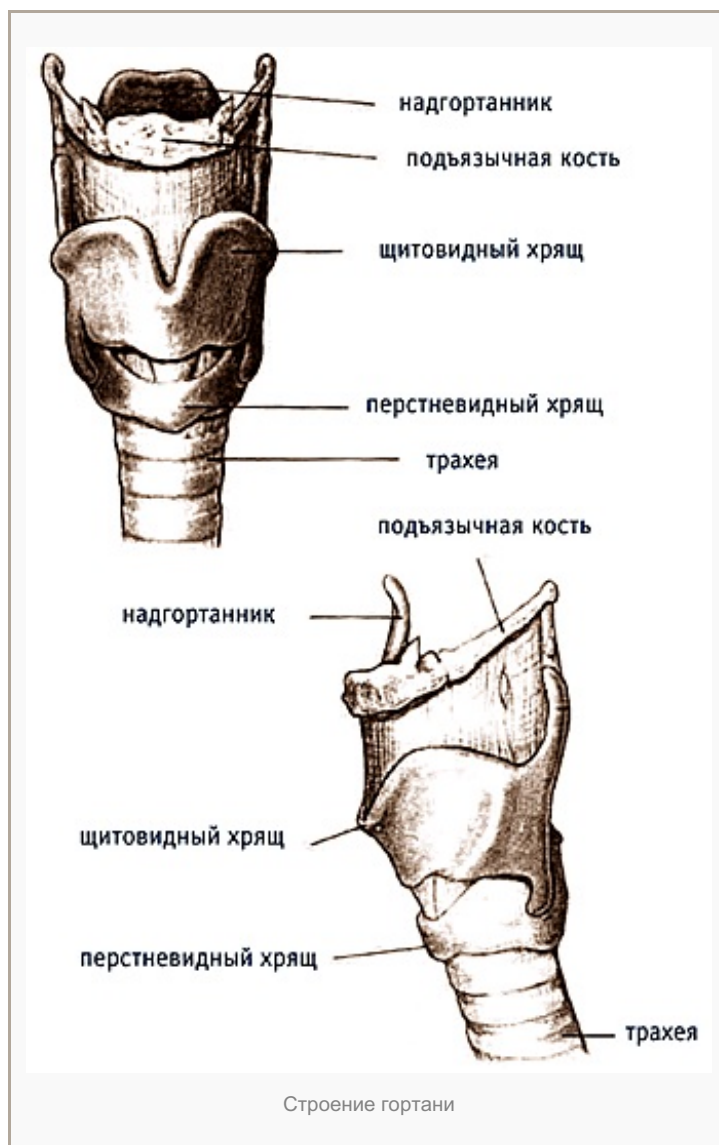
- **генератора** – дыхательной системы, состоящей из воздушного резервуара (легких), где запасается энергия избыточного давления, мускульной системы и выводного канала (трахеи) со специальным аппаратом (гортанью), где воздушная струя прерывается и модулируется;
- **вибраторов** – голосовых связок, воздушных турбулентных струй (создающих краевые тоны), импульсных источников (взрывов);
- **резонаторов** – разветвленной и перестраиваемой системы резонансных полостей сложной геометрической формы (глотки, ротовой и носовой полости), называемой артикуляционной системой.

Генерация энергии воздушного столба происходит в легких, которые представляют собой своеобразные меха, создающие поток воздуха при вдохе и выдохе за счет разницы атмосферного и внутрилегочного давления. Процесс вдоха и выдоха происходит за счет сжатия и расширения грудной клетки, которые осуществляются обычно с помощью двух групп мышц: межреберных и диафрагмы, при глубоком усиленном дыхании (например, при пении) сокращаются также мышцы брюшного пресса, груди и шеи. При вдохе диафрагма уплощается и опускается вниз, сокращение наружных межреберных мышц поднимает ребра и отводит их в стороны, а грудину – вперед. Увеличение грудной клетки растягивает легкие, что приводит к падению внутрилегочного давления по отношению к атмосферному, и в этот «вакуум» устремляется воздух. При выдохе мускулы расслабляются, грудная клетка за счет своей тяжести возвращается в исходное состояние, диафрагма поднимается, объем легких уменьшается, внутрилегочное давление растет, воздух устремляется в обратном направлении. Таким образом, вдох – процесс активный, требующий затраты энергии, выдох – процесс пассивный. При обычном дыхании этот процесс происходит примерно 17 раз в минуту, управление этим процессом как при обычном дыхании, так и при речи, происходит бессознательно, но при пении процесс постановки дыхания происходит сознательно и требует длительного обучения.

Количество энергии, которое может быть израсходовано на создание речевых акустических сигналов, зависит от объема запасенного воздуха и соответственно от величины дополнительного давления в легких. Учитывая, что максимальный уровень звукового давления, который может развивать певец (имеется в виду оперный), составляет 100...112 дБ, то очевидно, что голосовой аппарат является не очень эффективным преобразователем акустической энергии, Его КПД составляет порядка 0,2%, как и у большинства духовых инструментов.

Модуляция воздушного потока (за счет вибраций голосовых связок) и создание подглоточного избыточного давления происходит в гортани. Гортань (larynx) – это клапан, (рисунок 3), который находится на конце трахеи (узкой трубки, по которой воздух поднимается из легких). Этот клапан предназначен для предохранения трахеи от попадания посторонних предметов и для поддержания высокого давления при подъеме тяжестей. Именно этот аппарат и используется в качестве голосового источника при речи и пении. Гортань образована из набора хрящей и мышц. Спереди ее охватывает щитовидный хрящ (thyroid), сзади – перстневидный хрящ (cricoid), сзади также располагаются более мелкие парные хрящи: черпаловидные, рожковидные и клиновидные. Сверху гортани расположен еще один хрящ-надгортанник (epiglottis), также типа клапана, который опускается при глотании и закрывает гортань. Все эти хрящи соединены мышцами, от подвижности которых зависит скорость поворота хрящей. С возрастом подвижность мышц уменьшается, хрящи также становятся менее эластичными, поэтому возможности виртуозного владения голосом при пении также уменьшаются.

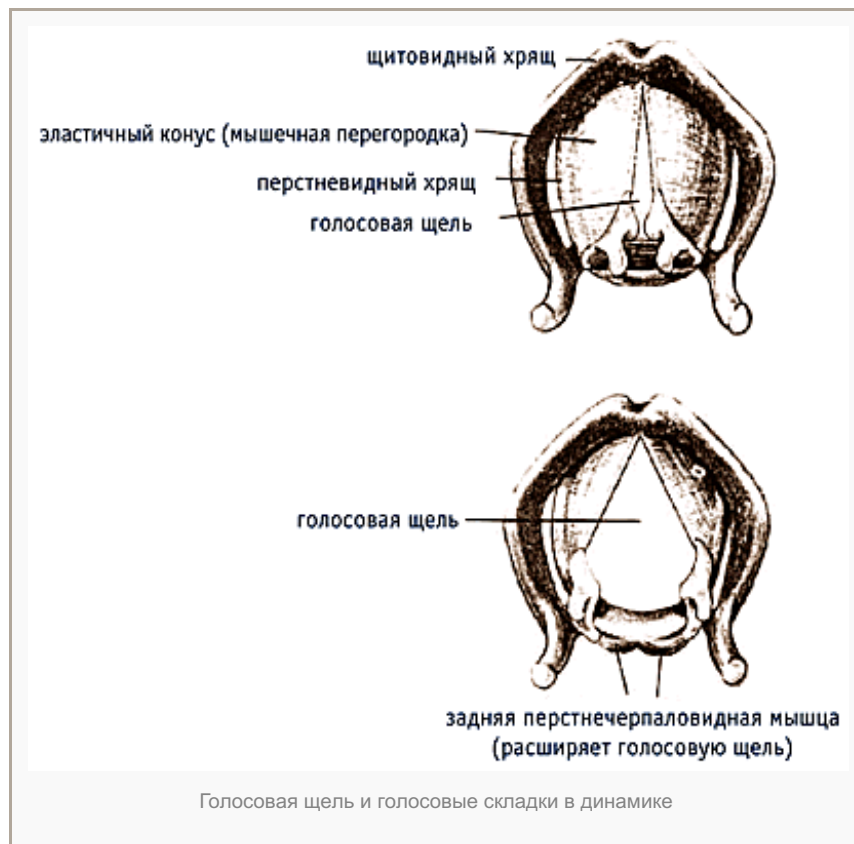




Наиболее сложно устроен средний отдел гортани (рисунок 4), в котором расположены парная мышечная перегородка (эластичный конус) и две пары складок. Верхние называются преддверными, или «ложными голосовыми», а нижние – голосовыми. В толще последних лежат голосовые связки, образованные эластическими волокнами, и мышцы (рисунок 5). Промежуток между правой и левой голосовыми складками называется голосовой щелью. Голосовые связки натянуты между щитовидным и черпаловидным хрящами. Размеры голосовой щели в открытом состоянии 2 см в длину и 1 см в ширину.



Именно **голосовые складки** и являются основным (но не единственным) источником голосообразования (вибратором). Преддверные голосовые складки выделяют специальную слизистую секрецию, которая помогает смазывать голосовые складки и предохраняет их от повреждения при трении во время звукообразования. Обычно они не участвуют в процессе звукообразования, однако при некоторых патологиях истинных связок, они могут участвовать в образовании звука (например, пение Луи Армстронга). *(Хрипота голоса Армстронга была вызвана бородавчатыми образованиями на голосовых связках – это лейкоплакия, проявляющаяся как участки ороговения эпителия. Диагноз «лейкоплакия» был поставлен артисту в зрелом возрасте, но хрипота в голосе присутствует уже на его первых записях, сделанных в возрасте 25 лет.*



Между двумя парами складок находятся небольшие полости (желудочки гортани), которые позволяют беспрепятственно голосовым складкам и играют роль *акустических фильтров*, уменьшая уровень высоких гармоник (скрипучесть голоса), они же играют роль резонаторов для тихих тонов и при пении в фальцете. При движении черпаловидных хрящей голосовые складки могут сдвигаться и раздвигаться, открывая проход воздуха. При поворотах щитовидного и перстневидного хрящей они могут растягиваться и сжиматься, при активации вокальных мышц они могут расслабляться и напрягаться. Процесс образования звуков речи определяется движением (колебаниями) связок, что приводит к модуляции потока воздуха выдыхаемого из легких. Такой процесс называется *фонацией* (существуют и другие механизмы звукообразования, они будут рассмотрены дальше).

В статье использован материал :

**Основы психоакустики.**

Ирина Алдошина

**Механизм образования речи**

Денис Мерзляков

**Похожее**