



Компьютерное моделирование резонансных процессов образования высокой певческой форманты



Морозов В.П., доктор биологических наук, профессор



Макаров И.С., кандидат технических наук

• певческий голос • спектральный анализ • высокая певческая форманта • передаточная функция • моделирование • синтез речи.

Феномен певческого голоса, по сравнению с речью, изучен недостаточно. В частности, не вполне ясны механизмы образования важнейшей формантной области спектра певческого голоса, так называемой, высокой певческой форманты (ВПФ), придающей голосу звонкость и хорошую слышимость. С применением метода компьютерного моделирования в работе получены новые экспериментально-теоретические данные о резонансной природе указанной форманты, в частности, о взаимосвязи резонансов гортанной полости, образуемой сужением входа в гортань, и грушевидных пазух глотки (sinus piriformis).

• acoustics of singing voice • 1st singing formant • articulatory modeling.

Compared with speech, the phenomenon of singing voice is studied insufficiently. In particular, mechanisms of formation of the so-called high singing formant are not clear. With the use of computer simulation, the paper presents new experimental and theoretical data on the resonant nature of these formants, which plays the crucial role in formation of the singing voice.

Особенности акустики и слухового восприятия певческого голоса и ВПФ

Профессиональный певческий голос (певцов академического оперно-концертного жанра) по сравнению с обычным речевым голосом характеризуется рядом особенностей акустического строения и слухового восприятия:

- а) повышенной мощностью (до 110–120 дБ на расстоянии 1 м);
- б) большим звуковысотным диапазоном (не менее двух октав);
- в) наличием вибрато (амплитудно-частотной модуляции спектра с периодичностью 5–7 Гц);
- г) особенностями спектра, содержащего две значительно усиленные области — *низкую певческую форманту* (НПФ, 400–600 Гц) и *высокую певческую форманту* (ВПФ, около 2400–2700 Гц у мужчин и 2800–3500 Гц у женщин), обуславливающих высокие эстетические тембровые и вокально-технические свойства голоса: звонкость, полётность, яркость (ВПФ) и в то же время мягкость, бархатистость, массивность (НПФ).

Приоритет в исследовании спектра певческого голоса в нашей стране и обнаружения низкой певческой форманты и высокой певческой форманты принадлежит С.Н. Ржевкину [1 — 3]. В зарубежной литературе ВПФ впервые была исследована У. Бартоломью [4] и рядом других авторов [5 — 11].

Одним из авторов данной статьи ещё в 60-е годы на базе Лаборатории певческого голоса Ленинградской гос. консерватории (зав. лаб. В.П. Морозов; [12, 13]) и в последующее время с применением компьютерных технологий были проведены опыты, доказывающие важнейшую эстетическую роль ВПФ в восприятии певческого голоса [14, 15]. Голоса выдающихся певцов (Ф.И. Шаляпин, Э. Карузо, С.М. Лемешев и др.), содержащие в норме высокий уровень ВПФ, при удалении её из спектра голоса (с помощью полосовой фильтрации) теряют практически все свои достоинства — звучат тускло, напряжённо, глухо. Некоторые слушатели отмечали, что голос приобретает «старческий» тембр, теряется разборчивость речи, полётность звука. Сама же ВПФ, звучащая изолированно, производит впечатление «соловьиных трелей», «сказочной музыки» и т.д.

Поскольку ВПФ придаёт голосу звонкость, и её можно выделить из голоса певца, а также измерить её относительный уровень в спектре (как величину напряжения в полосе прозрачности 1/3 октавного фильтра по отношению к напряжению всего сигнала в целом), она была названа «коэффициентом звонкости голоса» ($K_{зв}$) [13]¹. В мужских голосах хороших профессиональных певцов этот показатель достигает 30, 40 и даже 50%, а неквалифицированные голоса (с точки зрения академического сольного пения) содержат всего 5–15%. У женщин $K_{зв}$ «имеет право» быть меньше, чем у мужчин, по причине более высокочастотного состава спектра женского голоса.

Важная роль ВПФ состоит в том, что она находится в области *максимальной чувствительности слуха* и тем самым способствует увеличению *громкости* певческого голоса, слышимости на большом расстоянии и помехоустойчивости как свойстве преодолевать маскирующее воздействие музыкального сопровождения, «резать оркестр», по образному выражению дирижеров [15].

Исследования показали стабильность частотного положения высокой певческой форманты при пении (хорошими певцами) разных гласных (рис. 1) и разных по высоте нот диапозона голоса (рис. 2).

¹ Оценка ВПФ проводилась нами и в дБ по отношению ко всему спектру. Исследования, однако, показали, что оценка ВПФ в % более адекватно соответствует слуховому восприятию звонкости голоса по сравнению с оценкой в дБ.

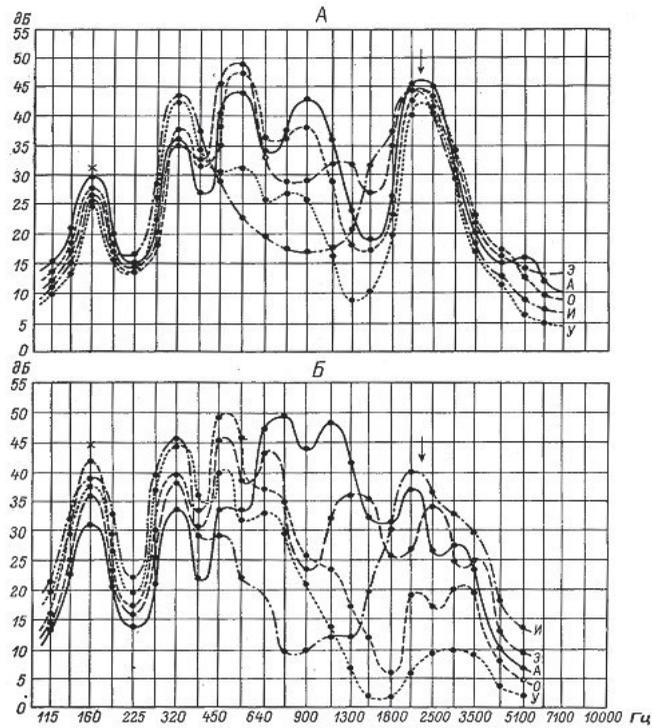


Рис. 1. Сравнительные спектры пяти русских гласных, пропетых на ноте *mi* (165 Гц) высококвалифицированным оперным певцом Н. Охотниковым (А) и невокалистом Л.П.-ком (Б). Вершина ВПФ указана стрелкой, вершина основного тона — крестиком, гласные обозначены соответствующими буквами.

По горизонтали — средние частоты прозрачности полосовых 1/4-октавных фильтров спектрометра SM1/2i-3а, немецкой фирмы RFT в Гц; по вертикали — интенсивность спектральных составляющих (дБ над уровн. 1 мВ) (по: [14])

Сравнение спектров А и Б на рис. 1 показывает их весьма значительные различия. Певческие гласные имеют чётко выраженную ВПФ, практически одинаковую для всех гласных по уровню ($\approx 40\%$) и частотному расположению (около 2400 Гц). Речевые же гласные имеют в этой области более низкие спектральные максимумы, значительно различающиеся как по уровням, так и частотному расположению.

Данным акустическим различиям спектров А и Б соответствуют значительные различия слухового восприятия (повышенная яркость, звонкость, громкость, тембральная ровность вокальных гласных по сравнению с речевыми) и физиологических механизмов образования вокальных и речевых гласных (см. ниже).

Спектры (рис. 2) показывают, что, несмотря на изменение частоты основного тона и первых гармоник, частота ВПФ стабильно остаётся в одной и той же области — 2500 Гц.

Применение компьютерных технологий позволило обнаружить гармоническую структуру ВПФ как мужских (рис. 3), так и женских (рис. 4, 5, 6) голосов [15, 16]².

² Автор в очередной раз выражает признательность В.Р. Женило за разработку по нашей просьбе и т/з специализированных компьютерных программ для выделения и анализа ВПФ. (В.М.)

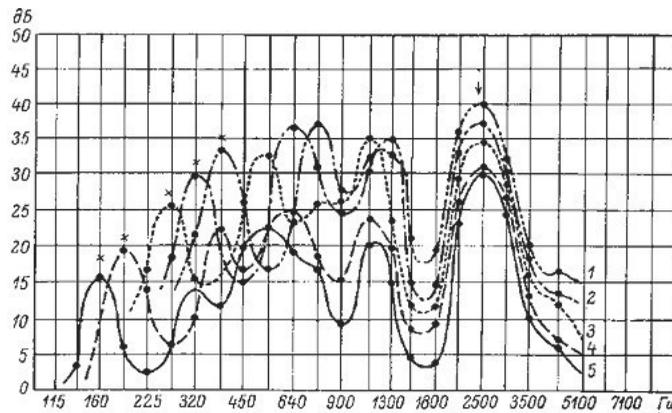


Рис. 2. Огибающие спектров певческой гласной А на различных по высоте нотах. Тенор В. П-й, 1 – sol¹, 392 Гц; 2 – mi¹, 330 Гц; 3 – do¹, 262 Гц; 4 – sol⁰, 196 Гц; 5 – mi⁰, 165 Гц. Высота основного тона обозначена крестиками, вершина ВПФ – стрелкой (по: [14])

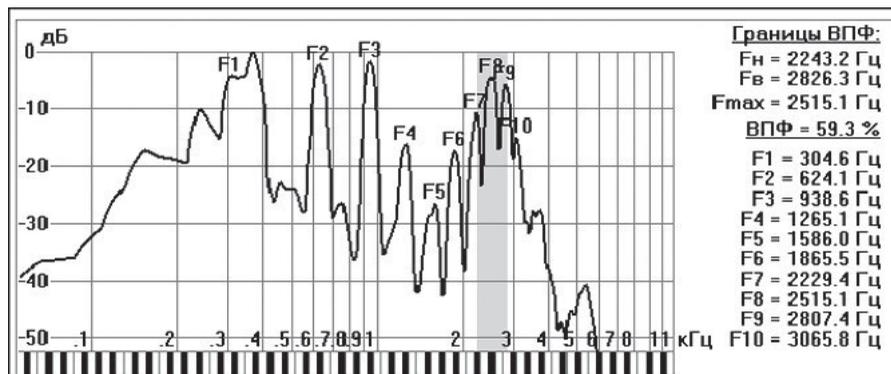


Рис. 3. Спектр голоса Ф. Шаляпина, «Легенда о двенадцати разбойниках», гласная О в заключительной фразе «...за Кудеяра-разбойника будем мы Бога молить» в слове «разбойника», нота mi¹ первой окт.³ Область ВПФ отмечена полосой затенения шириной 1/3 окт. Цифры справа: ВПФ=59,3% – относительный уровень ВПФ (K_{ав} голоса); F_{max}=2515 Гц – частота вершины ВПФ; F1, F2, F3 и т.д. – частота первой, второй, третьей и др. спектральных составляющих гармоник. Схематически изображённая снизу клавиатура рояля показывает соотношение между высотой звука в нотном обозначении и частотой по шкале кГц (по: [15])

Спектр на рис. 3, полученный при разрешении фильтровой функции компьютера 1/20 октавы и расчётной разрешающей способности линейного спектра 15 Гц, позволяет видеть «микроструктуру» ВПФ. Она состоит из двух основных максимально усиленных гармоник (F8 и F9) и двух дополнительных (F7 и F10), входящих в зону ВПФ (1/3 окт.) лишь частично и потому менее усиленных. Негармоничность двух основных гармоник ВПФ (F8 и F9) составляет всего 6,5 центов, т.е. ничтожно малую величину темперированного полутона (1 полутон = 100 центов), а общая средняя негармоничность голоса Шаляпина, рассчитанная по всем девяти гармоникам данного спектра, равна 17,5 центов, что также ниже порога слухового восприятия.

Указанные величины отклонений гармоник спектра голоса Шаляпина от идеальной гармоничности — вполне естественное явление, вызванное определённой нестационарно-

³ Основной тон голоса F₀ рассчитывался по величине средней разности между всеми гармониками спектра, а негармоничность — как среднее отклонение каждой гармоники от F₀ в центах (ц). Уточнённое по данной методике значение ЧОТ Шаляпина на рис. 3 составляет 312,5±4,4 Гц, т.е. mi¹ + 7 центов.

стью живого голосового источника («квазипериодичностью», см. [17]) и характерно абсолютно для всех голосов, включая многих выдающихся певцов [15, 16, 18], а также инструментальных музыкальных звуков [19].

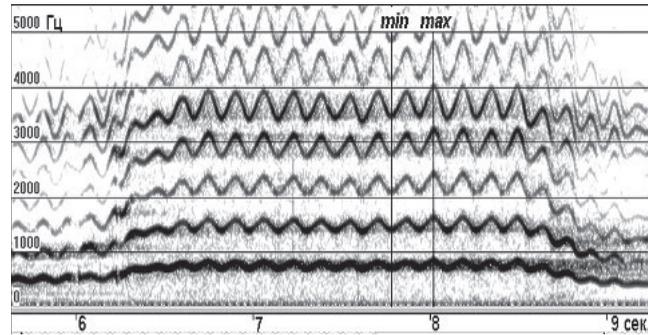


Рис. 4. Сонограмма голоса нар. арт. СССР, сопрано Т. Милашкиной, гласная А в слове «умоляю», нота fa#² (сцена Татьяны и Онегина из оперы «Евгений Онегин»). Средняя негармоничность спектра за время звучания средней части данного фрагмента голоса составляет 12,2 цента (по: [15])

На рис. 4 представлена сонограмма женского певческого голоса. Синусоидальный характер гармоник спектра вызван периодическими изменениями ЧОТ ($\Delta F_1 = 76$ Гц), происходящими вследствие вибрато (6,38 Гц). Зона ВПФ лежит в области 3000–3500 Гц. Можно видеть, что по причине вибрато в зону ВПФ попеременно входят: либо пятая (F5) при min ЧОТ, либо четвёртая (F4) при max ЧОТ гармоники спектра, что иллюстрируется на рис. 5а и 5б.

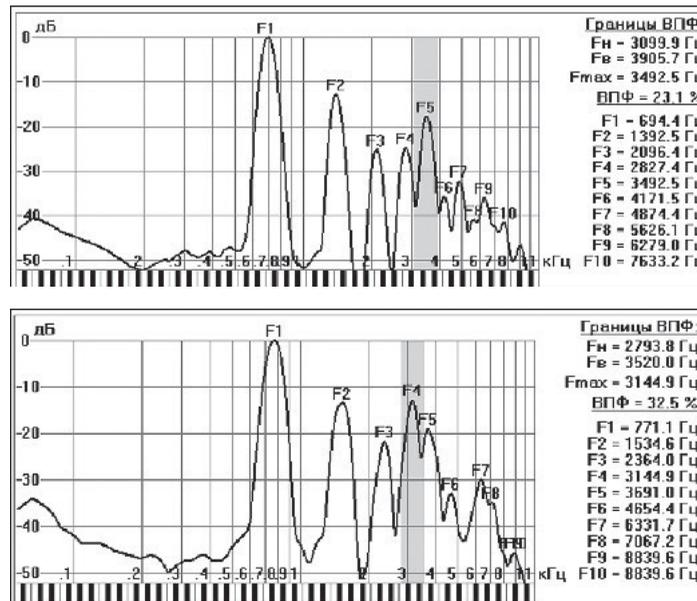


Рис. 5а. (верхний).. Спектр голоса сопрано Т. Милашкиной, снятый в фазе min ЧОТ вибрато (F1=694,4 Гц), показывает, что в зону резонанса ВПФ попадает в основном 5-я гармоника спектра F5=3492,5 Гц, относительный уровень 23,1% (по: [15]).

Рис. 5б. (нижний). Спектр того же голоса, снятый в фазе max ЧОТ вибрато (F1=771,1, Гц), показывает, что в зону резонанса входит уже четвёртая гармоника (F4=3144,9 Гц, относительный уровень 32,5%), а F5, оказавшись частично вне зоны резонанса ВПФ, существенно ослабевает (по: [15])

Таким образом, в зоне ВПФ происходит периодическое с частотой вибрато изменение амплитуды и частоты, в данном случае двух гармоник (F4 и F5), попеременно входящих и выходящих из области максимального резонанса ВПФ. Подобные амплитудно-частотные модуляции с периодичностью вибрато можно наблюдать и на низкочастотных гармониках спектра (включая и гармонику основного тона), как результат воздействия передаточной функции голосового тракта, т.е. резонанса в области первой и второй формант певческого голоса.

Рассмотренные акустические исследования уже свидетельствуют в пользу резонансного происхождения ВПФ.

О физиологических механизмах образования ВПФ

Происхождение ВПФ ещё У.Т. Бартоломью [4], а также С.Н. Ржевкин [2], а впоследствии и Й. Сундберг [9, 10] объясняли резонансом небольшой гортанной полости.

Свойства гортанной полости как резонатора высоких частот спектра гласных были описаны разными исследователями, в т.ч. Чибя и Каджияма [20], Г. Фант [17] и др. По данным Фанта, гортанный резонатор аппроксимируется трубкой длиной 2 см, площадью поперечного сечения 2 см² и является усилителем частот голосового источника в области 3000–5000 Гц [17].

Вместе с тем, на спектрах речевых гласных, как правило, не обнаруживается значительно выраженных и стабильных по амплитуде и частоте максимумов в области ВПФ (см. рис. 3б, F3), причём даже и у певцов при обычной разговорной речи. Когда же хороший певец начинает петь, голос его даже на средней силе становится звонким, т.е. приобретает характерный певческий тембр, а спектральный анализ показывает достаточно большой и устойчивый по частоте уровень ВПФ при пении разных гласных (рис. 1а) и нот разной высоты (рис. 2).

Причина явления стала проясняться после обнаружения Л.Б. Дмитриевым [21], а впоследствии и Сундбергом [10] на рентгеновских снимках гортани хороших певцов сужения входа в гортань, которое образовывалось в пении путём сближения надгортанника с мягкими тканями черпаловидных хрящей (рис. 6а). У плохих певцов такого сужения не обнаруживалось (рис. 6б). Это дало основание предполагать, что феномен сужения связан с образованием ВПФ.

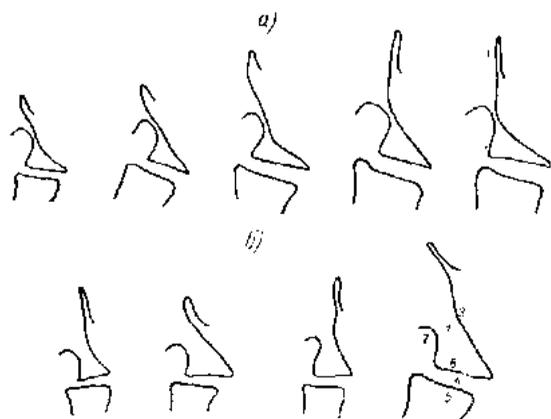


Рис. 6. Контуры надсвязочной полости гортани (вид сбоку) у хороших (а) и плохих (б) певцов. (Для сравнения взяты певческие гласные а на средней части диапазона каждого голоса.)
1 – вход в гортань; 2 – контур черпаловидных хрящей; 3 – контур надгортанника; 4 – голосовые связки; 5 – просвет трахеи; 6 – надсвязочное пространство гортани (по: [21])

В работе одного из авторов данной статьи [14] была выдвинута гипотеза о резонансном происхождении ВПФ и эмпирически проверена [15] на основе данных В.Н. Сорокина о конфигурации голосового тракта в гортанной области при фонации разных гласных [22, 23]. При этом (на основании стабильности частоты ВПФ при пении разных гласных и нот разной высоты, рис 1, 2) предполагалось, что гортанную полость можно рассматривать



как резонатор Гельмгольца, в значительной степени независимый от резонансных характеристик глотки и ротовой полости. Выяснилось, что резонансные частоты гортанной полости, вычисленные по формуле резонатора Гельмгольца для разных гласных звуков, весьма близки частотам третьих формант для тех же гласных. Полученные данные косвенно свидетельствуют в пользу того, что гортанная полость является резонатором типа резонатора Гельмгольца, усиливающим высокочастотные гармоники голосового источника в области ВПФ (2400–3500 Гц). Судя по стабильности частотного положения вершины ВПФ в спектре хороших певческих голосов при пении разных гласных и нот разной высоты, гортанная полость-резонатор у таких певцов (точнее — степень сужения входа в гортань как управляемый певцом параметр резонатора) сохраняется практически неизменной. Это хорошо согласуется с требованиями многих опытных вокальных педагогов — сохранять неизменное, предпочтительно пониженное (как при зевке или полузевке) и притом свободное положение гортани [15].

В 2004 году было получено экспериментальное подтверждение роли гортанной полости певца, образованной сужением входа в гортань, как резонатора, выделяющего и усиливающего высокие обертоны в 4-й и даже в 5-й октавах. В работе группы японских учёных из Токийского университета и Международного медицинского центра в Токио при участии Леонарда Фукса, владеющего техникой пения в стиле growl⁴, а также kargyгаа⁵, с применением кино-рентгенографии, а также прямой высокоскоростной ларингоскопии (4500 кадров/сек.), электроглоттографии гортани с параллельной регистрацией и анализом спектра голоса, было установлено, что гортанный резонатор, аппроксимированный в данной работе параметрами резонатора Гельмгольца, способен усиливать частоты в диапазоне примерно от 1232 до 4227 Гц при пении в стиле growl и от 1694 до 6429 Гц при пении в стиле kargyгаа в зависимости от степени сужения входа в гортань, т.е. выходного отверстия резонатора, которое певец, владеющий соответствующей техникой, может изменять от 0,05 до 1,00 см² [24].

Существенное отличие академического пения от указанных видов этнического горлового пения состоит в том, что хороший академический певец сохраняет управляемые параметры гортанного резонатора в стабильном состоянии, что и приводит к стабильности ВПФ при пении разных гласных и нот разной высоты.

О роли голосового источника в пении (к истории исследования)

В 60-х годах широкую известность получили работы французского физиолога Рауля Юссона, выдвинувшего «в противовес» общепринятой миоэластической теории колебаний голосовых складок нейромоторную (нейрохронакси-

⁴ Стиль growl использовал в свое время известный джазмен Луис Армстронг и другие исполнители (джаз, блюз). Он придаёт голосу характерный хрипловатый тембр. Ложные связки в этом стиле не участвуют, а хрипловатый тембр образуется вибрацией надгортанника, точнее — черпалонадгортанных складок, причем синхронно с вибрацией истинных голосовых складок гортани [24]. Среди известных нам певцов, похоже, В. Высоцкий также использовал этот стиль, придающий его голосу хрипловатость, что, впрочем, не только не принижало эстетических свойств его голоса, но напротив — придавало ему вполне естественное своеобразие, притом не только в пении, но и в речи. Хотя сам Высоцкий считал хриплость недостатком своего голоса (см. «Балладу о микрофоне»).

⁵ Kargyгаа — разновидность тибетско-тувинского народного пения, более известного под термином «горловое пение», «хоомей», «двойной звук». Механизм голосообразования при данном пении характеризуется участием не только истинных, но и ложных (вестибулярных) голосовых складок, что приводит к активизации резонансных свойств морганиевой полости гортани. В результате певец издаёт весьма низкий звук (ок. 80 Гц) и путём изменения площади выходного отверстия гортанного резонатора выделяет из низкого тона отдельные обертоны, звучание которых и составляет орнаментальную мелодию при горловом пении [35–37].



ческую) теорию, согласно которой частота колебаний голосовых складок определяется частотой нервных импульсов, поступающих из головного мозга к каждой из голосовых складок [7, 8].

Данная теория, как известно, не получила признания исследователей ([25, 17] и др.), но по-видимому, на её фоне была выдвинута гипотеза о происхождении ВПФ в результате «краевого тона голосовых связок», т.е. без всякого участия резонансных свойств передаточной функции голосового тракта [26, 27]. Разумеется, что эта гипотеза также не получила никакого признания, хотя даже в современной вокально-методической литературе можно встретить её упоминания в качестве «новой теории» образования ВПФ, как назвал её автор данной теории в начале 60-х годов.

Роль голосовых складок в пении, несомненно, важна, но вместе с тем, спектр голосового источника, как это показано ещё прямой скоростной видеосъёмкой колебаний голосовых складок в лаборатории Белл и последующими работами, представляет собой плавно спадающую линию от основного тона к высоким гармоникам, т.е. по своей природе не содержит никаких максимумов (формант), которые создаются передаточной функцией голосового тракта (Фант, Сорокин и др.). Влияние голосового источника на уровень ВПФ проявляется лишь в изменении крутизны спада спектра в пределах 6–12 дБ/окт., в результате чего при пении *riano* уровень ВПФ снижается. Известно, однако, что снижение это существенно меньше у певцов, хорошо владеющих *резонансной техникой пения*⁶, так как компенсируется активностью резонансных процессов, усиливающих ВПФ [15, 16].

Попытки неопытных певцов повысить силу голоса и уровень ВПФ, т.е. звонкость голоса за счёт форсирования работы гортани, неизбежно ведут к деградации голоса и категорически отрицаются мастерами вокального искусства, в сознании которых доминирует представление о резонансных механизмах голосообразования⁷. Повторим, что сказанное не означает игнорирования голосового источника, роль которого рассмотрена в ряде специальных работ [22, 23, 28 — 32] и др.

В настоящей работе на трёхмерной компьютерной модели В.Н. Сорокина и И.С. Макарова рассматривается роль передаточной функции голосового тракта певца, точнее — взаимодействие гортанного резонатора с резонансом парных грушевидных полостей глотки, расположенных по бокам гортани. Передаточная функция резонансной системы голосового тракта рассмотрена как независимо от голосового источника (F-картина), так и на примерах синтеза речевого и певческого голоса с применением стандартного голосового источника.

Компьютерная трёхмерная модель артикуляции и акустики голосообразования

Для проверки гипотезы о резонансном происхождении ВПФ были разработаны:

- а) компьютерная трёхмерная модель, описывающая конфигурацию речевого аппарата человека от гортани до губ и позволяющая манипулировать органами-артикуляторами — губами, нижней челюстью, глоткой, языком;
- б) алгоритм, позволяющий по текущей конфигурации модели речевого аппарата вычислять его передаточную функцию и резонансные частоты.

В качестве основы данной модели речевого аппарата использовалась существенно усовершенствованная трёхмерная версия модели В.Н. Сорокина [23].

⁶ Резонансное пение (резонансная техника пения) — это пение с максимально возможным использованием певцом резонансных свойств голосового аппарата с целью получения максимального эффекта силы, полётности и эстетических качеств голоса при минимальных физических усилиях, что достигается певцом под контролем вибрационной чувствительности как индикатора резонанса. Иными словами, резонансное пение — это пение с высоким коэффициентом полезного действия (КПД) голосового аппарата на основе использования законов резонанса и психофизиологических средств самоконтроля и усиления резонансных процессов голосообразования.

⁷ «Голосовые связки? Надо забыть о них! У меня поют резонаторы! Такое должно быть ощущение» (нар. арт. СССР, профессор И.П. Богачева); «Потеряв резонанс, перестаёшь быть певцом!» (Дженнаро Барра, изв. итальянский вокальный педагог) Цит. по: [16, с.453, 476].

Модель позволяет пользователю интерактивно управлять формой и положением языка, губ, а также углом раствора нижней челюсти в сагиттальном сечении. Помимо этого, компьютерная модель позволяет изменять форму глотки, а также варьировать параметрами особых окологортанных полостей, расположенных в нижней части глотки по обеим сторонам гортани и известных под названием «грушевидные пазухи», т.е. полости (sinus piriformis). Более подробно о грушевидных пазухах, а также об их влиянии на акустические свойства речи см.[33].

В качестве алгоритма, вычисляющего передаточную функцию по конфигурации речевого тракта, использовалась модифицированная версия схемы длинной линии, в которой речевой тракт аппроксимировался последовательностью конических рупоров [34].

Описанные модели и служили способом проверки гипотезы о резонансном происхождении ВПФ.

Результаты

Экспериментальная проверка гипотезы о резонансном происхождении ВПФ проводилась следующим образом. Сначала с помощью компьютерной модели речевого аппарата создавались формы тракта, типичные для разных гласных звуков. Затем мы интерактивно меняли степень сужения входа в гортань, а также размеры грушевидных пазух вплоть до их полного отключения, и наблюдали за соответствующими изменениями в передаточных функциях тракта.

На рис. 7а показана конфигурация речевого аппарата, типичная для речевого (непевческого) гласного «А». На рис. 4б показана соответствующая данной конфигурации передаточная функция, вычисленная в предположении «выключенных» грушевидных пазух.

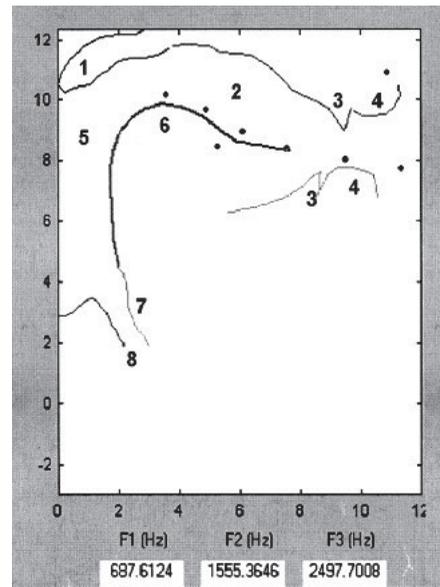


Рис. 7а. Конфигурация тракта для речевого (непевческого) гласного /А/.

Сужение входа в гортань отсутствует. Грушевидные пазухи «выключены».

Обозначения: 1 – мягкое нёбо, 2 – ротовая полость, 3 – зубы, 4 – губы, 5 – глотка, 6 – язык, 7 – область сужения входа в гортань, 8 – голосовые складки

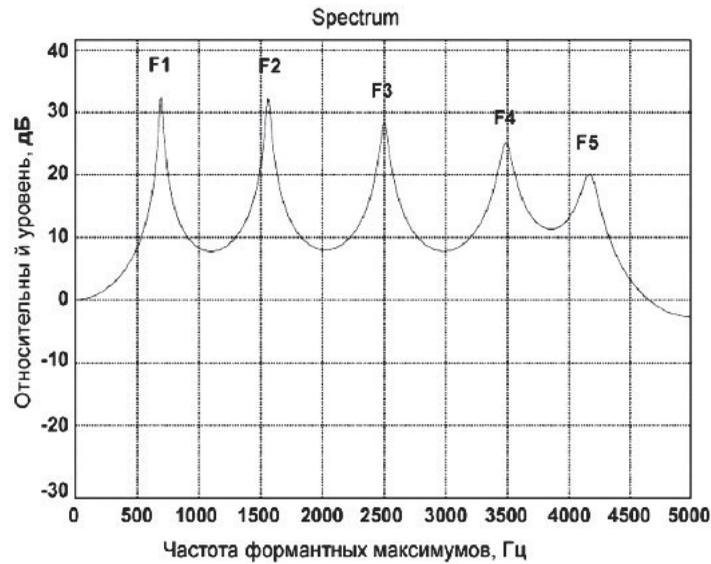


Рис. 76. Спектры передаточной функции для речевого гласного /А/. Грушевидные пазухи «выключены»

Как следует из рис. 76, значения первых пяти формантных частот F1, F2, F3, F4 и F5 равны, соответственно, 687 Гц, 1555 Гц, 2497 Гц, 3483 Гц и 4167 Гц. Такое расположение формант является типичным для речевого «А». Отметим, что третья форманта, расположенная на 2497 Гц и соответствующая по своему частотному расположению высокой певческой форманте, практически не выделяется по уровню от соседних второй и четвёртой и существенно ниже уровня второй форманты.

Первая модификация (рис. 8а) исходной конфигурации речевого тракта заключалась в образовании сужения у входа в гортань, т.е. моделирование певческой конфигурации тракта. Кроме того, положение гортани немного понижалось, что также типично для пения. На рис. 8б показана соответствующая передаточная функция. Как и для исходной конфигурации, грушевидные полости полагались «выключенными».

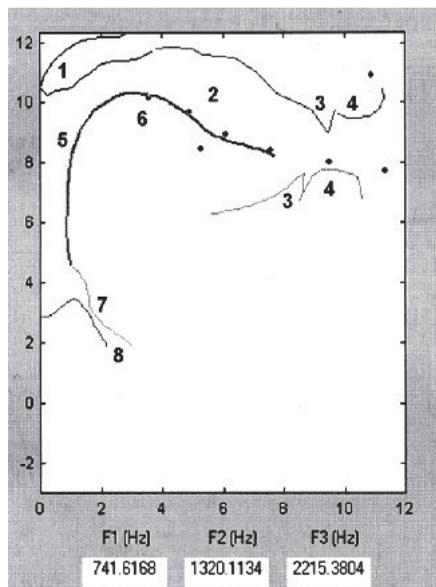


Рис. 8а. Конфигурация тракта для певческого гласного /А/ (первая модификация). Суженный вход в гортань, гортань немного опущена, грушевидные пазухи «выключены»
Обозначения те же, что и на рис. 7а

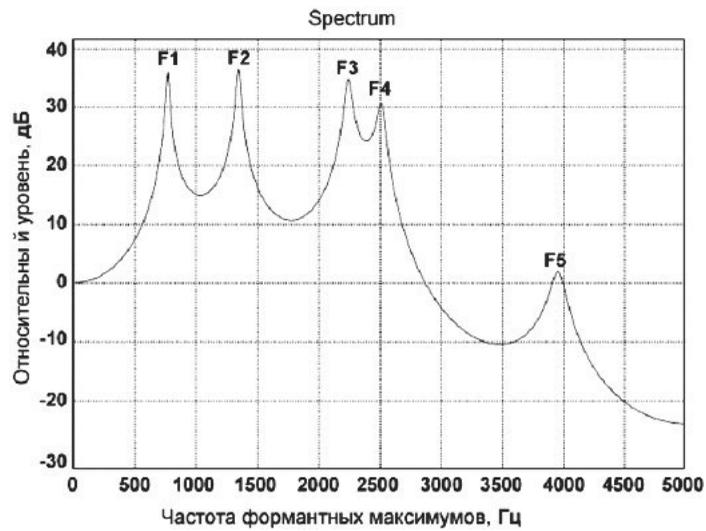


Рис. 8б. Спектры передаточной функции для певческого гласного /А/ (первая модификация). Грушевидные пазухи «выключены»

Значения первых пяти формантных частот для конфигурации, показанной на рис. 8а, равны, соответственно, 741 Гц, 1320 Гц, 2215 Гц, 2490 Гц и 3942 Гц. Из рис. 8а и 8б очевидно, что в результате сужения входа в гортань третья и четвертая форманты сблизились друг с другом и в целом понизились по частоте. В результате их сближения амплитуда F3 возросла и стала сопоставима с амплитудами первой и второй формант. Если теперь аппроксимировать гортанную полость резонатором Гельмгольца и вычислить его частоту [16], пользуясь параметрами для конфигурации, показанной на рис. 8а, то значение этой частоты окажется равной приблизительно 2400 Гц, т.е. частоте, лежащей между частотами третьей и четвертой формант. Таким образом, сужение входа в гортань приводит к тому, что третья и четвертая форманты сближаются друг с другом, приближаясь к частоте, приблизительно равной собственной частоте резонатора Гельмгольца, аппроксимирующего надгортанную полость.

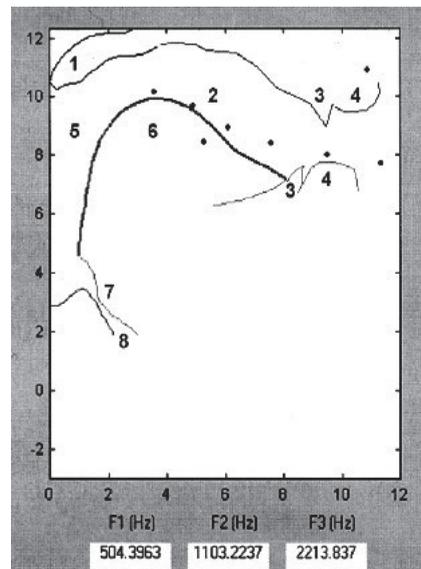


Рис. 9а. Конфигурация тракта для певческого гласного /А/ (вторая модификация) Суженный вход в гортань, гортань опущена, грушевидные пазухи включены. Обозначения те же, что и на рис. 7а

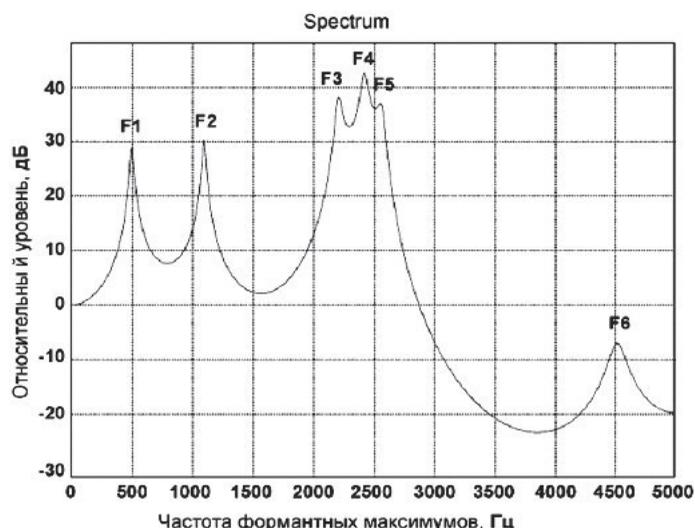


Рис. 9б. Спектры передаточной функции для певческого гласного /А/ (вторая модификация). Грушевидные пазухи включены

Отсюда следует, что ВПФ образуется путём сближения и объединения в «формантный кластер» высоких формант (третьей и четвертой, а также пятой, как будет показано далее).

Следующая модификация состояла в подключении к конфигурации, показанной на рис. 8а, двух грушевидных пазух (см. рис. 9а и 9б).

Значения первых пяти формантных частот оказались равны, соответственно, 504 Гц, 1103 Гц, 2213 Гц, 2430 Гц и 2575 Гц. Сравнивая рис. 9а и 9б, видим, что подключение грушевидных пазух значительно увеличило уровень ВПФ за счёт сближения третьей, четвертой и пятой формант. Кроме того, влияние грушевидных пазух сказывается также в снижении частоты расположения ВПФ на шкале частот. Обращает на себя особое внимание тот факт, что сужение входа в гортань при выключенных грушевидных пазухах даёт около 7 дБ увеличения уровня ВПФ (по сравнению с первоначальным «речевым» уровнем F3). А подключение пазух увеличивает уровень ВПФ ещё на 7 дБ, т.е. в целом примерно на 14 дБ по сравнению с «речевым» уровнем F3.

Описанные модификации были осуществлены на пять гласных («А, И, У, Э, О»). На всех конфигурациях отмечались две тенденции:

1. Сближение третьей, четвертой и (иногда) пятой формант по мере сужения входа в гортань.
2. Увеличение уровня ВПФ и снижение её расположения на частотной шкале при подключении грушевидных синусов.

Моделирование звука речевого и певческого голоса

В качестве голосового источника нами была использована последовательность импульсов пилообразной формы с частотой следования 100 Гц.

На рисунках 10а и 10б приведены сравнительные спектры синтезированного нами речевого и певческого голоса с применением указанного голосового источника и передаточными функциями голосового тракта, имитирующего речевой (рис. 10а) и певческий (рис. 10б) тип голосообразования.

Спектр голосового источника мы оставляли неизменным при синтезе как речевого, так и певческого голоса.



При речевом типе фонации (рис. 10а) область ВПФ представлена на данном спектре гармоникой № 9 ($F_9 = 2493,4$ Гц), которая соответствует третьей форманте передаточной функции, т.е. $F_3 = 2497$ Гц на рис. 8б речевой конфигурации тракта.

Как видно на рис. 10а, речевой спектр характеризуется большой крутизной падения амплитуды от F_1 к F_3 , примерно 14 дБ/окт. При этом гармоника F_9 , соответствующая ВПФ, ничем не выделяется среди соседних гармоник F_8 и F_{10} .

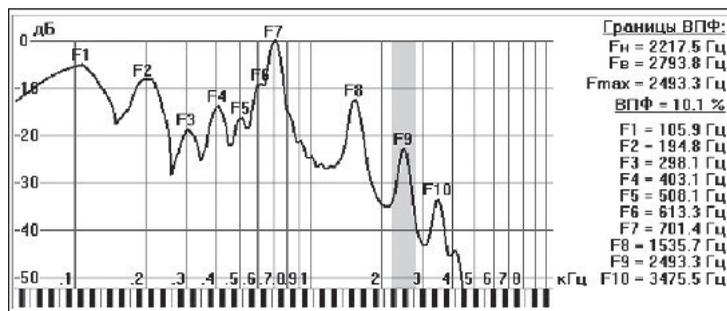


Рис. 10а. Спектр синтезированного речевого голоса, соответствующий конфигурации голосового тракта на рис. 7а и передаточной функции на рис. 7б

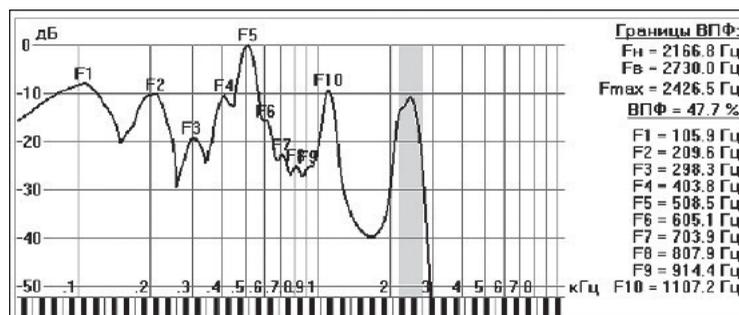


Рис. 10б. Спектр синтезированного певческого голоса, соответствующий суженному входу в гортань (рис. 9а) и «подключённым» грушевидным пазухам (рис. 9б)

Спектр же певческого голоса, образуемый при сужении входа в гортань и подключением грушевидных синусов, имеет значительно более пологий (около 5дБ/окт.) спад амплитуды от гармоники F_5 (508,5 Гц), соответствующей, кстати, низкой певческой форманте (по Ржевкину) и первой форманте передаточной функции (см. рис. 9б; $F_1 = 504$ Гц).

Что же касается ВПФ, то её относительный уровень в % по отношению ко всему спектру возрастает с 10% в речевом спектре (рис. 11а) до 47,7% в певческом. Это соответствует реальным значениям спектров многих обследованных нами мастеров вокального искусства — Ф. Шаляпин, Э. Карузо, Л. Паваротти, П. Доминго, Е. Образцова, И. Архипова и др. [16]. Указанному изменению ВПФ в % соответствует рост её уровня примерно на 12 дБ.

Отметим также, что столь значительный рост уровня ВПФ в певческом спектре происходит без какого-либо изменения работы голосового источника, который, как уже указывалось, оставался неизменным при моделировании речевого и певческого голоса.



Обращает на себя внимание отсутствие каких-либо спектральных составляющих после ВПФ в полосе 3–10 кГц. Но на самом деле, они присутствуют в данном спектре, на что указывает передаточная функция певческой конфигурации тракта (см. рис. 9б): на месте присоединившейся к ВПФ пятой форманты (F5) вновь возникла форманта под номером F6 и частотой около 4500 Гц. Она неизбежно присутствует и на синтезированном спектре (рис. 10б), однако не видна ввиду глубокого антирезонанса после ВПФ, снизившего её амплитуду почти на 50 дБ по отношению к уровню ВПФ⁸.

На реальных спектрах хороших певческих голосов практически всегда наблюдается существенное снижение амплитуды гармоник по отношению к уровню ВПФ, но тем не менее, достаточно заметные максимумы вплоть до 10 кГц, причём гармоничные по отношению к основному тону голоса (см. рис. 11, а также рис. 3, 4, 5а, 5б).

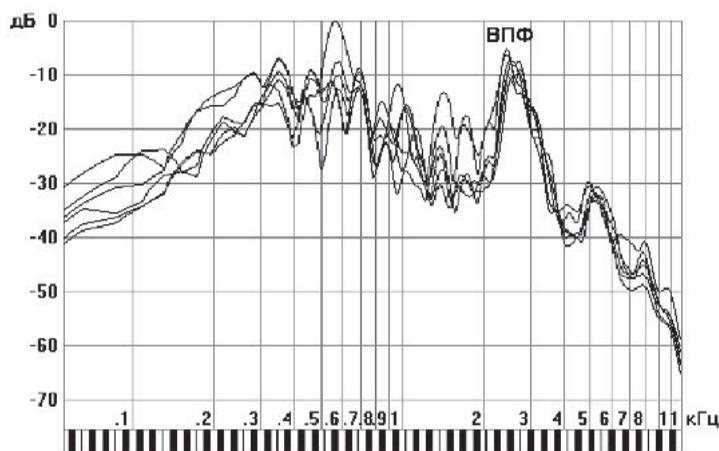


Рис. 11. Г. Селезнев (солист Большого театра, нар. арт. РФ). Романс С. Рахманинова «О нет, молю, не уходи...», шесть гласных в заключительной фразе «...п**О**б**У**дь со мн**О**й, н**Е** Ух**О**ди**И**!». Прекрасно сформированная и практически одинаковая по амплитуде и частоте ВПФ на всех шести гласных — свидетельство вокально-технического профессионализма певца. Согласно резонансной теории пения, это результат большой активности и стабильности работы резонансной системы, формирования ВПФ в независимости от типа гласных (по: [16])

Заключение и выводы

Результаты экспериментов, проведённых на пространственной компьютерной модели артикуляции и акустики, позволяют сделать несколько выводов.

1. Происхождение ВПФ теоретически можно трактовать не как отдельную форманту (образованную отдельным резонатором), а как формантный кластер, т.е. область резонансного усиления в спектре звуков, возникающую из-за сближения третьей, четвёртой и пятой речевых формант. При этом центральная частота этого кластера (которую и называют «частотой ВПФ») примерно соответствует частоте резонатора Гельмгольца, аппроксимирующего гортанную полость.
2. Основной физиологический механизм образования ВПФ сводится к образованию сужения на входе в гортань и опусканию самой гортани [11]. При этом наличие грушевидных полостей, которые находятся в непосредственной близости по бокам гортани, приводит к ещё большему увеличению уровня ВПФ, а также к снижению частоты ВПФ.

⁸ О резонансе гортанной полости в полосе 3–5 кГц и вызванного этим антирезонанса пишет Г.Фант [17, с. 107]. Далее Фант уточняет, что резонанс гортанной трубки соответствует 4000 Гц (т.е. F4), что близко к нашим данным при расширенном входе в гортань (F4 ок. 3500 Гц, см. рис. 7б), а сужение входа в гортань резко снижает частоту F4 до 2500 Гц, т.е. перемещает F4 на место F3.



3. Высокочастотные форманты передаточной функции F4 и F5, сильно понизившие своё первоначальное положение за счёт сближения с F3, по существу теряют своё самостоятельное значение и в реальных спектрах хорошего певческого голоса входят в состав ВПФ в качестве её гармонических по отношению к основному тону компонентов (см. рис. 3, 4, 5а, 5б). На месте четвёртой форманты F4 после области антирезонанса, вызванного резонансом ВПФ, снова образуется формантный максимум (на передаточной функции певческой конфигурации тракта он значится под № F6, частота около 4500 Гц).

Указанное событие находит также подтверждение в реальных спектрах хорошего певческого голоса: после значительного спада амплитуды гармоник, вызванного антирезонансом на частотах ниже и особенно выше ВПФ (нули передаточной функции), возникают меньшие по амплитуде, но достаточно заметные резонансы гармоник в области четвёртой, пятой форманты и более высоких частот в диапазоне 5–10 кГц (см. рис. 11 и др.).

Полученные результаты соответствуют литературным данным о резонансном происхождении ВПФ [11, 16], являются отражением теоретически и практически обусловленной взаимосвязи между собой всех частей резонансной системы голосового аппарата певца, т.е. принципа функциональной целостности певческого голосового аппарата.

Уточним практические выводы из этих исследований

1. В образовании ВПФ участвует не только сужение входа в гортань, но и резонанс грушевидных пазух (*sinus piriformis*). Последние сами по себе не могут образовывать ВПФ, но, как показывает эксперимент, могут намного усилить ВПФ. Это имеет большое практическое значение для вокально-методической науки и практики.
2. Грушевидные пазухи увеличивают свой объём (и, соответственно, своё влияние на ВПФ!) только при свободной и расширенной глотке, о чём прозорливо говорил ещё Уинтроп Бартоломью (1934). Зажатая глотка и зажатая гортань (типичная картина для неопытных певцов) сожмут грушевидные пазухи и выключат их положительное влияние на ВПФ. Приведём мнение одного из выдающихся певцов: *«После космического темпа арии Фарлафа, я ухожу с этой нотой (fa¹) за кулисы. Не в горле, в резонаторе беру. Горлом нельзя. Самое страшное — горло. Горло должно быть освобождено. Оно должно быть мягким. Это — труба. Если она сжимается, кончено! Всё! Теперь много певцов с горловыми голосами — тенора, баритоны и басы. Это — искаленные голоса»*, — солист Большого театра, нар. арт. СССР Марк Рейзен [16, с. 446]. По нашим данным (В.М.), напряжённые голоса не обладают хорошей полётностью, т.е. свойством слышаться на фоне оркестра и в большом зале (не говоря уже о выносливости), поэтому известны ещё со времён староитальянской школы под термином «*metallo falzo*» (ложный металл).
3. Значительное увеличение уровня ВПФ до 50%, причём без какого-либо изменения работы голосового источника (см. рис. 10а и 10б), также свидетельствует о целесообразности резонансной техники пения, т.е. максимальной активизации резонансных свойств певческого голосового аппарата при минимальных физических усилиях и особенно гортани, что характерно для выдающихся мастеров вокального искусства [16].
4. Таким образом, полученные результаты научно обосновывают мнение мастеров вокального искусства — певцов и педагогов — о необходимости освобо-



ждения гортани в пении от зажатости окологортанными мышцами и самой гортани, что улучшает эстетические свойства тембра певческого голоса, повышает уровень ВПФ и, соответственно, коэффициент звонкости голоса, способствует защите гортани от перенапряжения.

Литература

1. Казанский В.С. Ржевкин С.Н. Исследование тембра звука голоса и смычковых музыкальных инструментов // Журн. прикл. физики, 1928. № 5. Вып. 1. С. 87–103.
2. Ржевкин С.Н. Слух и речь в свете современных физических исследований. М., 1936.
3. Ржевкин С.Н. Некоторые результаты анализа певческого голоса // Акуст. журн., 1956. Т. 2. Вып. 2. С. 205–210.
4. Bartholomew W.T. A physical definition of good voice quality in the male voice // Journ. Acoust. Soc. Amer. 1934. № 6.
5. Wolf S. Stanley D., Sette W., Quantitative studies on the singing voices. — J. Acoust. Soc. Amer., 1935, v. 6, p. 255–266.
6. Winchel F. Die Klagfarbenbildung der menschlichen Stimme. Umschau, 1956, № 13, S. 405–407.
7. Husson R. La voix chantee. Paris, 1960. 205 p.
8. Husson R. Physiologie de la phonation. Paris, 1962. 591 p.
9. Sundberg J. Formant frequencies of bass singing. — In: Speech transmission laboratory. Quarterly Progress and Status Report, 1968, April 15, p. 1–6.
10. Sundberg J. Articulatory interpretation of the «singing formant». — J. Acoust. Soc. Amer., 1974, v. 55, p. 838–844.
11. Sundberg J. The Science of the Singing Voice. Dekalb, Illinois, 1987.
12. Морозов В.П. Обертоны певческого голоса // Музыкальные кадры. 1962. № 4.
13. Морозов В.П. Вокальный слух и голос. Л., 1965.
14. Морозов В.П. Биофизические основы вокальной речи. М.; Л. 1977.
15. Морозов В.П. Искусство резонансного пения. Основы резонансной теории и техники. М., 2002 (изд. 1-е, 496 с.).
16. Морозов В.П. Искусство резонансного пения. Основы резонансной теории и техники. М., 2008 (изд. 2-е, 592 с.).
17. Фант Г. Акустическая теория речеобразования. М., 1964.
18. Алдошина И. Приттс Р. Музыкальная акустика. СПб., 2006.
19. Галембо А.С. Разработка методов оценки интонационной ясности музыкальных звуков // Автореф. дисс. канд. техн. наук. СПб., 1994.
20. Chiba T. Kajiyama M., The Vowel — Its Nature and Structure. Tokyo, 1941.
21. Дмитриев Л.Б. Основы вокальной методики. М., 1968.
22. Сорокин В.Н. Теория речеобразования. М., 1985.
23. Сорокин В.Н. Синтез речи. М., 1992.
24. Sakakibara K.-I. Fuks L, Imagawa H., Tayama N., Growl Voice in Ethnic and Pop Styles // Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics, March 31st to April 3rd 2004 (ISMA 2004), Nara, Japan.
25. Berg J.V.D. Myoelastic-aerodynamic theory of voice production // Journ. of Speech and Hearing Research. 1958. v.1. № 3.
26. Рудаков Е.А. О природе верхней певческой форманты и механизме её образования // Развитие детского голоса. М., 1963.



27. Рудаков Е.А. Новая теория образования верхней певческой форманты // Применение акустических методов исследования в музыковедении. М., 1964.
28. Чаплин В.Л. Физиологические основы формирования певческого голоса в аспекте регистровой приспособляемости. М., 2009.
29. Sundberg J. Högset C., Voice source differences between falsetto and modal registers in counter tenors, tenors and baritones // Logopedics Phoniatrics Vocology 2001; 26: 26–36.
30. Titze I. The Myoelastic-Aerodynamic Theory of Phonation. 2006. NCVS, Denver, CO.
31. Titze I. Nonlinear Source-filter coupling in phonation: Theory // J. Acoust. Soc. Amer. 2008. Vol. 123. P. 2733–2749.
32. Titze I. Riede T., Popolo P., Nonlinear source-filter coupling in phonation: vocal exercises // J. Acoust. Soc. Amer. 2008. Vol. 123. P. 1902–1915.
33. Макаров И.С. Сорокин В.Н. Резонансы разветвлённого речевого тракта с податливыми стенками // Акуст. Журнал. 2004. Т. 50. С. 389–396.
34. Макаров И.С. Аппроксимация речевого тракта коническими рупорами // Акустический журнал. 2009. Том 55. С. 256–265.
35. Fuks L. From Air To Music. Acoustical, Physiological and Perceptual Aspects of Reed Wide Instrument Playing and Vocal-Ventricular Fold Phonation. Stockholm, 1999.
36. Fuks L. Hammarberg B., Sundberg J., A self-sustained vocal-ventricular phonation mode: acoustical, aerodynamic and glottographic evidences // Acoustical, Physiological and Perceptual Aspects of Reed Wide Instrument Playing and Vocal-Ventricular Fold Phonation. Stockholm, 1999.
37. Аксенов А.Н. Тувинская народная музыка / Под ред. и с предисл. Е.В. Гиппиуса. М., 1964.

Сведения об авторах

Морозов Владимир Петрович —

доктор биологических наук, профессор, главный научный сотрудник Института психологии РАН и Московской гос. консерватории им. П.И. Чайковского. Область научных интересов — психофизиология, акустика речи, певческого голоса, невербальной коммуникации. Автор ряда монографий, многих статей и пяти патентов.
E-mail: mail@vmorozov.ru

Макаров Илья Сергеевич —

кандидат технических наук, заведующий лабораторией анализа и обработки биомедицинских сигналов ОАО НПО «Экран». Действительный член Академии медико-технических наук РФ. Научные интересы — биологическая и медицинская акустика, акустика речи. Имеет более 40 публикаций, 1 патент
Email: speechprod_mak@mail.ru

