

ОБЪЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ В ВОКАЛЬНОЙ ПЕДАГОГИКЕ

Г. П. Стулова,

Московский педагогический государственный университет,
Москва, Российская Федерация, 119435

Аннотация. Статья посвящена описанию некоторых объективных (аппаратурных) методов оценки способов голосообразования у певцов в различных голосовых регистрах и качества тембрового звучания их голоса. Это связано с анализом физиологических биомеханизмов, с одной стороны, и акустических характеристик его звучания – с другой. Понимание взаимосвязи процесса голосообразования и качества звучания голоса даёт учителю возможность целенаправленно управлять работой голосового аппарата певца. В экспериментальной фонетике в специальных лабораториях для исследования звуков речи аппаратурные методы используются довольно широко. Основная аппаратура предназначена для изучения работы артикуляционных органов и речевой интонации в процессе произношения слов на русском и иностранных языках. Для изучения регистровой структуры певческого голоса детей и взрослых в нашем исследовании впервые был использован комплекс специальной аппаратуры, предназначенной для визуального наблюдения за работой гортани и гармонической структурой тембра певческого голоса. В связи с двухсторонним подходом к решению проблемы исследования она делится на две группы: акустическую и физиологическую. Для акустических исследований была использована такая аппаратура, как: спектроанализаторы различных типов, индикатор регистровости, звуковые генераторы, синтезатор; а для физиологических – ларингоскоп, стробоскоп, осциллограф, электронный глотограф, рентгенотомограф. В настоящее время существуют более совершенные объективные методы исследования различных проблем вокальной педагогики, связанные с компьютерной технологией и разработкой специальных программ. Однако в современной науке и практике в области вокальной педагогики они используются пока недостаточно.

Ключевые слова: исследование, объективные методы, голос, певец, аппаратура, вокальная педагогика, аудиторский анализ, физиология, биомеханизм голосообразования, акустика, качество певческого звука.

Благодарности: Автор выражает глубокую благодарность заведующему Научно-исследовательским центром музыкально-информационных технологий Московской

© Стулова Г.П., 2021



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International License
The content is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

государственной консерватории имени П. И. Чайковского, кандидату технических наук Александру Витальевичу Харуто за техническое обеспечение и консультации по обработке результатов экспериментального обучения певческому искусству детей и взрослых.

Для цитирования: Стулова Г. П. Объективные методы исследования в вокальной педагогике // Музыкальное искусство и образование / Musical Art and Education. 2021. Т. 9. № 3. С. 48–65. DOI: 10.31862/2309-1428-2021-9-3-48-65.

DOI: 10.31862/2309-1428-2021-9-3-48-65

OBJECTIVE METHODS OF RESEARCH IN VOCAL PEDAGOGY

Galina P. Stulova,

Moscow Pedagogical State University (MPGU),
Moscow, Russian Federation, 119435

Abstract. The article is devoted to the description of some objective (instrumental) assessment methods for ways of shaping singer's voices in various voice registers and the quality of the timbre sound of their voices. This is due to the analysis of physiological biomechanics, on the one hand, and the acoustic characteristics of its sound, on the other. Understanding the relationship between the process of voice shaping and the sound quality of the voice gives the teacher the opportunity to purposefully control the work of the singer's vocal apparatus. In experimental phonetics in special laboratories for the study of speech sounds, instrumental methods are used quite widely. The main equipment is designed to study the work of articulatory organs and speech intonation in the process of pronouncing words in Russian and foreign languages. To study the register structure of the singing voice of children and adults, in our study, for the first time, a complex of special equipment was used, designed for visual observation of the work of the larynx and the harmonic structure of the timbre of the singing voice. In connection with a two-way approach to solving the research problem, it is divided into two groups: acoustic and physiological. For acoustic research such equipment was used as: spectrum analyzers of various types, register indicator, sound generators, synthesizer; and for physiological – a laryngoscope, stroboscope, oscilloscope, electronic glossographer, X-ray tomography. Currently, there are more advanced objective methods for studying various problems of vocal pedagogy associated with computer technology and the development of special programs. However, in modern science and practice in the field of vocal pedagogy, they are still used very little.

Keywords: research, objective methods, voice, singer, equipment, vocal pedagogy, audit analysis, physiology, biomechanics of shaping voice, acoustics, singing sound quality.

Acknowledgements: The author expresses deep gratitude to the Head of the Research Center of Music and Information Technologies of the Tchaikovsky Moscow State Conservatory, PhD of Technical Sciences Alexander V. Haruto for technical support and advice on processing the results of experimental teaching of singing art to children and adults.

For citation: Stulova G. P. Objective Methods of Research in Vocal Pedagogy. *Muzykal'noe iskusstvo i obrazovanie = Musical Art and Education*. 2021, vol. 9, no. 3, pp. 48–65 (in Russian). DOI: 10.31862/2309-1428-2021-9-3-48-65.

Введение

До недавнего времени аудиторский анализ был единственным способом оценки качества звучания певческого голоса, который осуществляется специалистами на основе слухового восприятия. Однако исходя из противоречивости суждений о типе регистрового звучания певческого голоса на основании субъективных качественных оценок, можно сказать, что человек может лишь приблизительно определить спектральный состав тембрового звучания. Он может различать звуки более богатые или более бедные по обертоновому составу, но не может с точностью измерить их количество по слуховому ощущению. Каков порог тембральных различий с точки зрения спектрального насыщения гармониками? Как он зависит от тесситуры? Эти вопросы, как и многие другие, ждут своего решения. Очевидно одно: чем опытнее педагог, чем более тренировано его ухо, тем его порог тембровых различий будет меньше. Следовательно, усреднённые данные нескольких опытных педагогов при аудиторском анализе певческого звука можно считать (хотя и с большими допусками) достаточно надёжным критерием его качественной оценки.

Вместе с тем ухо опытного педагога имеет свои преимущества. Мозг человека, с присущей ему сложной логикой обработки информации, способен выполнять такие операции, какие ни одна

машина пока выполнить не может. Например, когда педагог слушает грудной женский, мужской или детский голос, то он может оценивать и сравнивать их. Хотя грудное звучание ребёнка по своему тембру не будет таким же, как грудное звучание взрослого певца, тем не менее оно оценивается как грудное. Машина пока этого сделать не может.

Метод аудиторского анализа используется в современной вокальной практике достаточно широко:

- при отборе детей в экспериментальные группы;
- для определения фонетической определённости синтезированных гласных по их спектрограммам;
- в процессе вокальной работы с детьми;
- при массовом обследовании младших школьников с целью оценки типа регистрового звучания их голоса при спонтанном пении;
- в процессе развития вокального слуха учащихся и др.

Таким образом, аудиторский анализ не потерял своей значимости, он может и должен служить необходимым дополнением к аппаратным методам оценки качества звучания голоса, но именно **дополнением**. В настоящее время всё более широкое применение находят **объективные инструментальные методы исследования**. Рассмотрим основные из них

с точки зрения их предназначения и целесообразности применения в вокальной педагогике.

Акустические методы Спектрография

Высота голоса человека определяется частотой его основного тона. Следует заметить, что «высота звука» голоса и «основная частота его основного тона» не являются синонимами, хотя и могут использоваться с одинаковым правом, вследствие однозначного соотношения их друг с другом. Строго говоря, высота есть ощущение, связанное с воздействием того или иного тона на слух человека, а частота – физическое свойство звукового сигнала.

Принадлежность звука к тому или иному гласному или согласному, а также тембр голоса определяются степенью выраженности в звуке тех или иных обертонов (гармоник). Визуальную картину звука, соответствующую любому моменту его динамики, выраженную графически в координатах $A - F$, где A – амплитуда гармоник, F – частота гармоник, принято называть спектром звука. Прибор, с помощью которого можно получить спектр звука, называется спектроанализатором.

Любой речевой или певческий звук голоса сложный по своей природе. Как известно, он состоит из основного тона и многочисленных гармоник (обертонов), т. е. звуков, частота которых кратна основному тону, и находятся в соотношении с ней, как $F_0, 2F_0, 3F_0, \dots, nF_0$, где F_0 – частота основного тона. Она измеряется в Герцах (Гц), 2, 3, ..., n – номера гармоник. Частота каждой следующей гармоники спектра оказывается больше на частоту основного тона. Главная цель спектрографии – визуализация слухового образа, что позволяет глубже понять сущность певческого процесса.

Акустическая теория голосообразования базируется на представлениях об источнике звука (голосовые складки) и фильтрах (речевой тракт). Звуковая волна на выходе представляет собой результат воздействия источника звука на фильтрующую систему речевого тракта. Это простое правило, выраженное в терминах акустики и электротехники, означает, что звук на выходе однозначно определяется характеристиками его источника и фильтров, т. е. голосовых складок и рото-глоточного рупора.

Основным свойством голосового источника является периодичность его колебаний, которая определяется длительностью одного периода колебаний голосовых складок (T_0). Обратная ей величина представляет собой основную частоту голоса (F_0), т. е. $F_0 = 1 : T_0$; $T_0 = 1 : F_0$. Таким образом, частота колебаний источника звука (F_0) и время одного колебания (T_0) находятся в обратно пропорциональной зависимости между собой: чем длиннее время одного периода, тем медленнее частота колебаний источника звука и наоборот.

Другой характеристикой голосового источника является огибающая спектра создаваемых им колебаний, т. е. зависимость величины амплитуд гармоник спектра от их частоты. Характеристика огибающей линии спектра на уровне источника звука определяется, главным образом, регистром голоса. Поскольку регистр голоса формируется на уровне голосовых складок и зависит от характера их смыкания и колеблющейся массы, то спектральные характеристики источника звука будут более строгой оценкой по сравнению с анализом звука на выходе рта, так как спектр последнего преобразован фильтрующей системой, т. е. речевым трактом.

Однако вокальному педагогу, оценивающему звучание голоса на слух,

приходится иметь дело со звуком на выходе, спектр которого всегда отличается от спектра звука на уровне голосовых складок, так как на него оказывает своё влияние фильтрующая система резонаторов. Она видоизменяет спектр источника для каждого гласного звука по-разному, в зависимости от расположения артикуляционных органов. Таким образом, при воспроизведении какого-либо гласного звука на характеристику источника накладывается характеристика фильтров, настроенных на определённые резонансные частоты. Их комбинация в результате и является спектральной характеристикой звука на выходе рта. Например, комбинация характеристик источника и фильтрующей системы при произношении гласной «А», по Фанту [1], представлена на рисунке 1.

Процесс фильтрации состоит в том, что амплитуда каждой гармоники $S(f)$ умножается на значение передаточной функции тракта $T(f)$ на той же частоте. Полученное произведение и есть спектр излучаемого звука:

$$P(f) = S(f) T(f).$$

Если, по данным Г. Фанта для гласной «А» характерно усиление частот в области 700 и 1080 Гц, то для других гласных отмечается другая картина: для

«У» – 300 и 625 Гц; для «И» – 240 и 2250 Гц и так далее.

Отдельные особенно заметные пики спектра на выходе, состоящие из групп обертонов, как известно, называются формантами.

Кроме формант, несущих информацию о том или ином гласном, которые мы будем называть информативными формантами, в спектре голоса имеется ещё ряд других неинформативных формант, или тембральных, от степени выраженности которых зависит тембр голоса певца.

Большая заслуга в изучении тембра певческого голоса принадлежит отечественным исследователям С. Н. Ржевкину [2], Е. А. Рудакову [3], В. П. Морозову [4] и зарубежным: В. Бартоломео [5], Р. Юссону [6] и др. Они установили, что в звуке певческого голоса содержится значительно больше высоких гармоник, чем в звуке обычного речевого сигнала. Особенно сильно выражена в певческом голосе взрослых певцов форманта частотой 2500–3000 Гц, которая и придаёт голосу звонкий оттенок. Эта форманта была названа «высокой певческой формантой» (ВПФ), которую следует считать основным и важнейшим качеством хорошо поставленного певческого голоса.

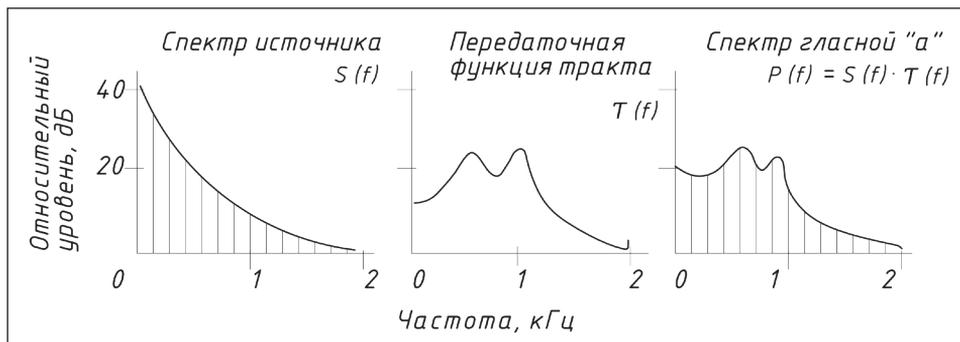


Рис.1. Формирование спектра звука на выходе рта.
Fig. 1. Formation of the sound spectrum at the mouth outlet.

Среди акустических исследований в области вокальной речи, как взрослых певцов, так и детей, наиболее значительными можно считать работы профессора В. П. Морозова. Интересны его опыты, связанные с исследованиями влияния высокой певческой форманты на звонкость певческого голоса [7]. Они подтверждают выводы предшествующих исследователей о зависимости звонкости голоса от наличия в его спектре высоких обертонов в полосе частот 2500–3000 Гц, т. е. высокой певческой форманты. Степень выраженности её в спектре голоса определяется через коэффициент звонкости $K_{зв}$ по формуле:

$$K_{зв} = \frac{I_f}{I_{\Sigma}} \cdot 100\%,$$

где: I_f – интенсивность высокой певческой форманты;

I_{Σ} – общая суммарная интенсивность спектра данного звука.

Таким способом В. П. Морозов подсчитал, что у детей младшего школьного возраста $K_{зв} = 2,6\text{--}3,8\%$ [7]. Правда, автор отмечает, что «у некоторых детей младшего школьного возраста высокая певческая форманта настолько ещё мала, что не появляется на экране спектроанализатора. У детей постарше высокая певческая форманта уже становится заметной: её «удельный вес» в общем спектре достигает 4–7%» [6, с. 81]. Далее им приведены результаты исследования степени выраженности ВПФ в спектре детского голоса в зависимости от характера гласной, силы звучания, возраста и пр. Выводы, к которым приходит автор, были сделаны в результате исследования двух возрастных групп детей-вокалистов в возрасте от 7 до 16 лет общей численностью 13 человек. Полученные данные весьма интересны, однако требуют дальнейшего уточнения и подтверждения.

Следует подчеркнуть, что методом спектрографии широко пользуются для изучения акустических параметров речевого сигнала. Для исследования певческого голоса в нашей стране этот метод стали применять сравнительно недавно.

Первые работы отечественных учёных посвящены изучению физических характеристик певческого голоса, как взрослых, так и детей. В. Л. Чаплин впервые использовал спектральный анализ для выявления регистровой структуры голоса взрослых певцов [8], а для звукообразования в различных голосовых регистрах у детей данная методика впервые была применена в нашей работе при исследовании регистровой структуры певческого голоса детей в возрастном аспекте [9].

Индикатор регистровости звука певческого голоса

Для теоретического исследования регистрового строения детского голоса наиболее строгой является оценка сигнала с источника звука, а для практических целей наименьший интерес представляет спектральная характеристика типа регистра звука, излучаемого на выходе рта.

Традиционная классификация регистров основывается на слуховом впечатлении от степени густоты тембра, причём грудной регистр отличается от головного наличием в его спектре большего количества обертонов. Более объективным способом определения регистровости является спектральный анализ с помощью спектроанализатора или спектрографа, что позволяет количественно оценивать степень обертоновой насыщенности тембра голоса в различных регистрах голоса. Однако практическое применение метода спектрографии затруднено из-за отсутствия под рукой у педагога акустической лаборатории. Поэтому совместно

с инженером А. А. Князьковым нами был разработан и создан портативный электронный прибор (дешёвый в изготовлении, лёгкий и удобный в использовании) для измерения типа регистрового звучания голоса, названный нами **индикатором регистровости** (Ир) [10].

Данное устройство по своей природе является спектроанализатором и представляет собой двухканальный усилитель низкой частоты со ступенчатой регулировкой калиброванной чувствительности, на оба входа которого подаётся сигнал с микрофона, улавливающего звук исследуемого голоса, а к выходам подключены стрелочные или другие измерительные индикаторы, показывающие средневыпрямленное значение выходных сигналов каждого из каналов. Существенной особенностью усилителя является то, что один канал имеет равномерную амплитудно-частотную характеристику. Второй же, имея на частоте 4500 Гц коэффициент усиления, равный первому каналу, на частотах ниже 4500 Гц ведёт себя как фильтр высоких частот с крутизной 12 дБ/окт. Частоты, расположенные выше 4500 Гц, практического значения не имеют, так как в голосе их энергия ничтожно мала.

Прибор позволяет непосредственно измерять тембральную насыщенность звука голоса. Его показания соответствуют коэффициенту регистровости K_p , который выводится как отношение суммарной энергии спектра реального звучания ΣF_a к суммарной энергии условно взятого эталонного спектра:

$$\varepsilon F_b : K_p = \frac{\varepsilon F_a}{\varepsilon F_g}.$$

Целью использования настоящего изобретения является разработка методики прямого и непосредственного измерения коэффициента регистровости, выраженного в процентах, которое производится

путём сравнения энергии спектра реального звука с энергией определённого эталона. За эталонный спектр условно взят спектр с дискретным рядом гармонических составляющих, амплитуда которых убывает в сторону высоких частот на 12 дБ/окт. K_p выводится как отношение суммарной энергии спектра звука голоса EF_a к суммарной энергии эталонного спектра EF_g и вычисляется в процентах:

$$K_p = \frac{EF_a}{EF_g} \cdot 100\%.$$

Исходные характеристики эталона по F_o и I_o меняются в зависимости от основных характеристик реально звучащего тона. Эталон как бы заново подстраивается под звуковой сигнал. Только наклон огибающей сохраняет своё постоянное значение: 12 дБ/окт. Это и определяет обертоновый ряд спектра.

Таким образом, K_p – величина относительная и не зависит от абсолютной величины исследуемого сигнала по F_o и I_o , а задаётся наклоном огибающей эталонного спектра.

Если спектр звука с уровня голосовых складок имеет тот же наклон огибающей, что и эталонный, то оба измерительных индикатора данного прибора покажут одинаковые значения уровня сигнала, так как второй канал компенсирует спад АЧХ (амплитудно-частотных характеристик) эталонного спектра. В случае более крутого наклона огибающей спектра источника индикатор второго канала покажет более низкие характеристики, пропорциональные энергии высокочастотной части спектра.

Изобретение позволяет существенно упростить процедуру количественной оценки регистровой структуры голоса, что очень важно для психоакустических, физиологических, искусствоведческих исследований и педагогической практики.

Данный прибор можно с успехом использовать не только как индикатор регистровости, но и для измерения динамического диапазона голоса на различных звуковысотных уровнях, а также для оценки степени ровности звучания гласных. Он может применяться и в качестве тренажёра для певцов в процессе вокально-речевого обучения, так как наряду со слуховым подключается визуальный контроль. Это усиливает канал обратной связи в системе слух – голос.

Звуковой синтезатор

Метод анализа звука через синтез известен в науке уже давно. Он был специально разработан для изучения такого сложного явления, как голос человека. Методом только анализа нельзя получить ответы на все поставленные вопросы, так как слишком сложен и разнообразен звук голоса человека.

Сущность метода анализа через синтез заключается в следующем. Закладывается некая гипотеза спектрального строения любого звука голоса. На основании данной гипотезы синтезируется звук. Аудиторским анализом оценивается полученное звучание. В результате этой оценки вводится поправка в первоначальную гипотезу. Снова синтезируется звук с учётом поправки и снова анализируется на слух, вводится новая поправка в гипотезу и так далее до тех пор, пока синтезированный звук не будет восприниматься аудитором как заданная фонема.

Таким образом, синтез певческих гласных будет являться ценным дополнением к их спектральному анализу, так как это позволит получить богатую информацию относительно выявления акустической значимости спектрографических элементов, полученных в результате анализа, что поможет вскрыть закономерности

восприятия их слухом человека. Поэтому не всякое акустическое исследование можно считать полным без подтверждения его результатов с помощью синтеза.

Синтез певческих гласных при фальцетном звучании голоса детей был проведён нами в лаборатории физиологии пения РАМ имени Гнесиных. Синтезированные звуки получались в результате сложения гармонических сигналов от двух или трёх независимых источников – звуковых генераторов типа ЗГ-18 с диапазоном частот от 20 до 20 000 Гц. Распределение частот по шкале – линейное от 20 до 100 Гц и логарифмическое от 100 до 20 000 Гц. Выходная мощность 3 Вт (рис. 2).

Сложный звук от двух или трёх звуковых генераторов подаётся на сопротивление. Далее синтезированный сигнал усиливается специальным усилителем и подаётся на динамик. Между суммирующим сопротивлением и усилителем установлена кнопка управления. Только при её нажатии синтезированный сигнал идёт

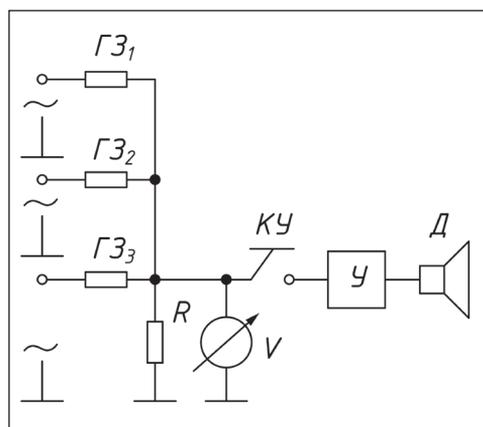


Рис. 2. Схема синтезатора на трёх звуковых генераторах.

Fig. 2. The scheme of the synthesizer on three sound generators.

$\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$ – звуковые генераторы типа ЗГ-18;
 R – сопротивление 200 Ом; V – вольтметр;
 KY – кнопка управления; Y – усилитель;
 D – динамик.

на усилитель. Время звучания синтезированного звука определяется экспериментатором произвольно. Кнопка управления нужна в связи с явлением адаптации слуха человека при восприятии относительно длительного звукового сигнала.

Для синтеза звуков генераторы настраивались каждый в отдельности по частоте и амплитуде. Частоты генераторов должны соотноситься друг с другом как 1:2:3 по акустическому закону ряда Фурье. Кратность частот составляющих постоянно контролировалась по фигуре Лессажу на экранах двух осциллографов. А продолжительность их звучания в пределах 50 сек. обеспечивалась стабильностью звуковых генераторов.

Амплитудные соотношения гармоник синтезируемого звука устанавливались произвольно в пределах от 0,3 до 3 Вт и контролировались вольтметром на выходе. Небольшими шагами по 0,5 Вт поочередно изменялись уровни интенсивностей составляющих звука. Методом аудиторского анализа фонетистами определялся тип гласной и фиксировались происходящие при этом изменения в звучании синтетических гласных при их восприятии на слух.

Синтезированные звуки с зафиксированными параметрами по частоте и амплитуде записывали на магнитофонную плёнку для осуществления более широкого аудиторского анализа, который первоначально проводился при участии студентов-вокалистов и вокальных педагогов РАМ имени Гнесиных. Через динамик аудиторам подавались синтезированные звуки, составленные сначала из двух, а затем из трёх гармонических составляющих с различной основной частотой: от 500 до 800 Гц примерно в пределах cu^1 – $соль^2$.

Задание аудиторам: выделить из прослушанного ряда составленных звуков те, которые наиболее определён

соответствуют тому или иному типу гласной. Каждый слушатель записывал данную последовательность звуков в протокол, что позволяло нам сравнивать результаты, чтобы подсчитать процент соответствующей узнаваемости каждой фонемы и выявить наилучшие для него соотношения гармонических составляющих по интенсивности для одной и той же высоты тона.

Физиологические методы Ларингоскопия

Ларингоскоп хорошо известен как специальный медицинский прибор, предназначенный для непосредственного осмотра гортани поющего. По сути своей это гортанное зеркало круглой формы, диаметром 16–27 мм, в металлической оправе, прикреплённое к металлическому стержню под углом 120°. При этом используется лобный рефлектор для направления пучка света от какого-то источника, например, настольной лампы.

При помощи ларингоскопа можно наблюдать способ смыкания голосовых складок у певцов в процессе фонации в разных голосовых режимах их работы; контролировать их состояние в результате певческих нагрузок, а также использовать в процессе обследований методом стробоскопии.

Стробоскопия

Стробоскоп позволяет наблюдать за движениями голосовых складок в процессе фонации методом ларингоскопии с применением прерывистого света. Посредством этого метода можно получить кажущееся замедление движения голосовых складок, что даёт возможность различать отдельные фазы движения, которые не видны при обычном осмотре гортани при помощи гортанного зеркала.

Устройство стробоскопа основано на следующем оптическом явлении. В результате прерывистых раздражений сетчатки глаза пространственно незначительно отделёнными друг от друга предметами возникает восприятие замедленного движения. Скорость кажущегося движения зависит от частоты мелькания раздражений.

Для проведения стробоскопии требуется источник света, лобный рефлектор, гортанное зеркало и прерыватель света. При помощи рефлектора прерывистый свет направляется в гортань.

При стробоскопии голосовые складки в процессе фонации могут казаться неподвижными или производить медленные колебания. Кажущаяся неподвижность голосовых складок достигается при полном совпадении периода колебаний складок и частоты мелькания света. Медленные колебания наблюдаются при наличии небольшой разницы между частотой мельканий света и периодом колебаний источника звука.

Например, если для звука $ля_m F_0 = 220$ Гц, а частота световых импульсов 221 (раз/сек.), то при осмотре гортани создаётся впечатление, будто голосовые складки производят лишь одно колебание в 1 сек. Это объясняется тем, что каждый импульс света освещает голосовые складки последовательно в разные фазы их колебаний. В результате этого у наблюдателя создаётся впечатление замедления колебательных движений.

В нашем исследовании использовался электронный стробоскоп, созданный и модифицированный в лаборатории физиологии пения РАМ инженером Ю. М. Отрященко. Методика исследования отработана В. Л. Чаплиным [8], который непосредственно принимал участие в исследовании наших испытуемых.

При помощи гортанного микрофона электронный стробоскоп автоматически

настраивается на соответствующую частоту от голоса испытуемого и посылает от неоновой лампы прерывистые световые импульсы синхронно со скоростью колебаний голосовых складок. Посредством специального мультивибратора можно производить искусственно сдвиг фаз частоты между вспышками лампы стробоскопа и колебаниями голосовых складок, что позволяет видеть их неподвижными или в движении с любой желаемой скоростью, что было очень важно для нас при анализе биомеханизма голосообразования у детей.

Глотография

Основная трудность в исследовании голосовых складок во время пения заключается в том, что деятельность их скрыта от непосредственного наблюдения.

Ларингоскопия и стробоскопия позволили установить, что от характера работы голосовых складок зависит качество тембрового звучания голоса. Грудной и фальцетный тип голосообразования имеют ярко выраженную тембровую окраску голоса.

Всё же следует сказать, что при данных методах исследования введение в рот испытуемого гортанного зеркала мешает естественной фонации. Нельзя быть уверенным в том, что при пении, например, гласной «А» голосовые складки без ларингоскопа во рту колеблются точно так же, как и с ларингоскопом.

Этого недостатка нет у других методов, например рентгеномографии или кино-рентгенографии. Однако время проекций при таких замерах далеко не соответствует числу колебаний голосовых складок в единицу времени. Возможно применение электромиографии, но для этого необходимо ввести игольчатый электрод в самую толщу голосовой

мышцы, что ограничивает использование данного метода и особенно при изучении голосообразования у детей.

Таким образом, до недавнего времени не было вполне удобной методики для исследования работы голосовых складок.

В 1957 году французским профессором биофизики Ф. Фабром было сделано многообещающее открытие. Он сконструировал прибор, позволяющий регистрировать и наблюдать вибрацию голосовых складок без непосредственного рассматривания их в натуральном виде. Для этого были использованы токи ультравысокой частоты (УВЧ), которые широко применяются в физиотерапии как лечебное средство [11]. Принцип действия этого аппарата состоит в том, что через маленькие серебряные электроды, расположенные по бокам щитовидного хряща, подаётся слабый ток УВЧ, который течёт через ткани шеи и гортань. Сила тока настолько мала, что течение его незаметно для испытуемого и не вызывает никаких отрицательных реакций, он совершенно безвреден. Смыкающиеся и размыкающиеся голосовые складки меняют величину сопротивления текущему току: при размыкании складок току труднее пройти через гортань, а при смыкании – легче. Эти изменения

сопротивления, происходящие при каждом колебании голосовых складок, меняют силу тока УВЧ, как говорят физики, модулируют его поток. Аппарат Ф. Фабра выделяет эти модуляции тока, усиливает их и подаёт на записывающий прибор – шлейфовый осциллограф, где на фотоплёнке или фотоленте фиксируется кривая, отражающая изменение формы голосовой щели. Эти модуляции можно подать на экран катодного осциллографа, увидеть глазом получающуюся кривую и сфотографировать её.

Таким образом, открытие и закрытие голосовой щели, меняющие сопротивление гортани току УВЧ, записываются на экране осциллографа как процесс во времени, в виде кривой – глотограммы. Через другие каналы осциллографа может быть записана кривая времени, фонограмма или какие-либо другие отметки (рис. 3).

Кривая глотограммы отражает частоту и амплитуду колебаний голосовых складок, а также фазу их смыкания, фазу максимального удаления и фазу контакта в течение каждого периода их колебания. На рис. 4 приводится тип обычной глотограммы при средней интенсивности и средней высоте тона.

Характер структуры глотограммы и форма периода, а также соотношения фаз

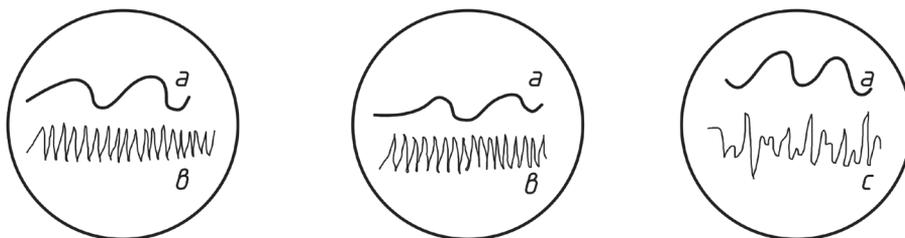


Рис. 3. Три глотограммы гласного «О», пропетого баритоном на высоте звука до¹, с различной интенсивностью звука (по данным Ф. Фабра, 1957):

a – глотограмма; *b* – отметка времени; *c* – фонограмма

Fig. 3. Three glottograms of the vowel "O" sung by a baritone at a pitch of up to c¹, with different sound intensity (according to F. Fabra, 1957):

a – glottogram; *b* – time stamp; *c* – phonogram

по продолжительности в пределах одного периода зависят, прежде всего, от регистра звучания голоса, различных технических приёмов в пении, типа и характера гласного, от силы и высоты звука, типа атаки и пр. А самым значительным преимуществом этого метода является возможность исследовать работу голосовых складок без введения в рот испытуемого каких-либо предметов, когда певец формирует звук так, как он это делает в самых естественных условиях: стоя, пользуясь полноценной опорой, свободно артикулируя.

В нашей стране электронный глотограф, работающий по принципу аппарата Ф. Фабра, в настоящее время имеется на вооружении нескольких акустических лабораторий в Москве и других городах.

На рисунке 5 приводится схема работы электронного глотографа. Установка

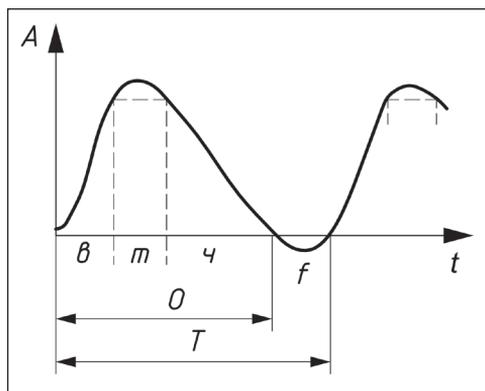


Рис. 4. Пример глотограммы.

O – фаза открытых голосовых складок; *f* – фаза их контакта; *e* – фаза открытия; *m* – фаза максимального удаления; *c* – фаза сближения; *t* – время; *A* – амплитуда, косвенно отражающая степень удаления складок друг от друга; *T* – период колебания.

Fig. 4. Example of a glottogram.

O – the phase of open vocal folds; *f* – the phase of their contact; *e* – the phase of opening; *t* – the phase of maximum removal; *c* – the phase of convergence; *t* – time; *A* – the amplitude, indirectly reflecting the degree of removal of the folds from each other; *T* – the period of oscillation.

включает датчики-электроды; генератор – возбудитель тока УВЧ, который подаётся к электродам; усилитель, который выделяет и усиливает модуляции тока; записывающую аппаратуру.

Электроды-датчики представляют собой две серебряные пластинки площадью 1–4 см². При прохождении через электроды тока ультравысокой частоты 75–500 кГц сечение гортани на уровне голосовых складок, включая сопротивление всех пяти слоёв, обозначенных на схеме, можно рассматривать как активное сопротивление, величина которого, хотя и незначительно, но всё же однозначно связана с формой голосовой щели. В основе этого утверждения лежит допущение: хотя величины сопротивлений 1–4 и меняются во времени, в процессе работы голосовых складок, их суммарная переменная величина значительно меньше, чем изменения сопротивления воздушного зазора голосовой щели. Отсюда следует, что эквивалентное сопротивление участка шеи на уровне голосовых складок между электродами зависит в основном от степени раскрытия голосовой щели при смыкании и размыкании складок.

Надо заметить, что методика глотографии в изучении певческой функции голосового аппарата человека представляет большой интерес для исследователей, однако она ещё недостаточно изучена и мало использована. Для того чтобы выявить типичную структуру глотограммы в зависимости от режима работы голосовых складок, мы проанализировали ряд работ различных авторов (отечественных и зарубежных), связанных с глотографическим методом исследования, а также провели собственные исследования на детях, учащихся детской хоровой студии «Горнист» г. Москвы.

За последние десятилетия, со времени создания аппарата Фабра, отечественными и зарубежными учёными были

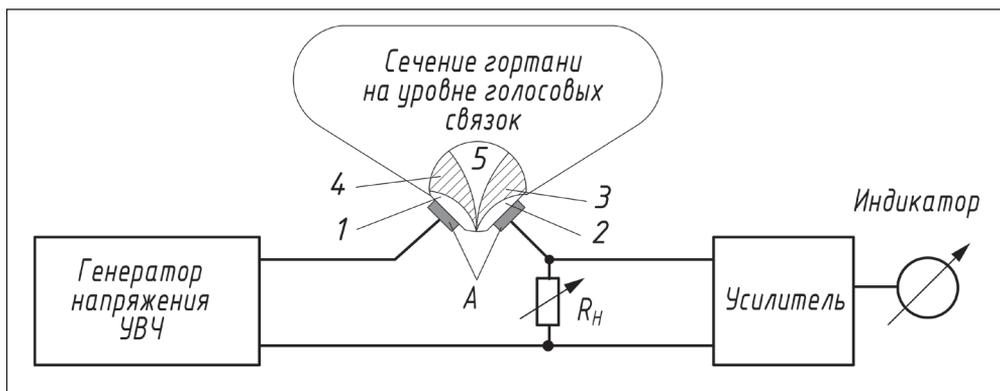


Рис. 5. Схема работы электронного глотографа.

- 1 – кожный покров; 2 – внешнегортанные мускулы; 3 – щитовидный хрящ; 4 – голосовые складки; 5 – голосовая щель; А – серебряные электроды.

Fig. 5. The scheme of operation of the electronic glottograph.

- 1 – skin; 2-external laryngeal muscles; 3 – thyroid cartilage; 4 –vocal folds; 5 – glottis; А – silver electrodes.

опубликованы работы, посвящённые изучению механизма голосообразования в процессе речи и пения с использованием данной методики: Н. И. Жинкин [12]; Л. Б. Дмитриев, Ю. М. Отрященко, Л. Н. Хромов [13]; В. Л. Чаплин [14], О. Sabouraud, F. Gremy [15]; M. Duvelleroy [16]; R. Husson [17]; St. Hiky [18]; G. Fant [19] и др.

60

Перечисленные работы касаются изучения различных аспектов вышеуказанной проблемы, однако в связи с нашим исследованием регистрового строения голоса детей рассмотрим более подробно один из них: зависимость структуры глотограммы от типа голосового регистра певца.

Проанализировав вышеуказанные работы, мы убедились в том, что мнения авторов по поводу чтения глотограмм по интересующему нас вопросу не совсем совпадают, хотя между ними и есть что-то общее. По-видимому, наиболее чёткими и справедливыми будут данные французского профессора M. Duvelleroy. Он экспериментально, а также методом моделирования и математических расчётов доказал, что форма проекций кривых

глотограмм зависит только от регистра голоса: она почти прямоугольная при грудном звучании, при фальцете же её форма напоминает синусоиду [16]. Схематически это изображено на рисунках 6 и 7:

Однако получить такое идеальное звучание в грудном регистре, при котором структура глотограммы имела бы приведённую на рисунке 6 прямоугольную форму, практически почти невозможно не только у детей, но даже и у взрослых певцов. Это объясняется тем, что голосовые складки человека – это биологическая система, состоящая из эластических тканей, а не жёстко закреплённых металлических язычков. Такую форму глотограммы можно получить лишь теоретически и принять за эталон, с которым удобно сравнивать практически полученные глотограммы и оценивать степень их приближения к подобной форме. Чем ближе к грудному регистру будет звучание голоса, тем ближе к прямоугольной форме будет его глотограмма, а чем чище фальцет, тем ближе по своей форме она будет к синусоиде.



Рис. 6. Грудной регистр

Fig. 6. Chest register

Рис. 7. Фальцетный регистр

Fig. 7. Falsetto register

Таким образом, нами был отработан способ чтения глотограмм, опосредованно отражающих форму колебаний голосовых складок певца.

Ранее проведённые исследования по глотографии касались различных аспектов речеобразования или процесса фонации лишь у взрослых дикторов или певцов. Наиболее значительной работой является исследование голосообразования у взрослых певцов, проведённое В. Л. Чаплиным [8].

Для изучения вопроса о голосовых регистрах у детей данная методика так же, как и спектрография, использовалась впервые в нашей работе [9].

Рентгенотомография

Рентгенотомография относится к рентгенографическому методу послонных снимков, в результате которого на плёнке получается изображение гортани в её продольном сечении. Таким образом, на полученных снимках (томограммах) отображается состояние гортани, её конфигурация в какой-то момент работы. Следовательно, использование этого метода позволяет нам объективно зарегистрировать характерные физические изменения некоторых параметров голосовых складок в процессе различных способов фонации у певцов.

В общем виде принцип томографии сводится к следующему: трубка – источник рентгеновских лучей – и кассета

с плёнкой укреплены на концах металлического коромысла, называемого томографической тягой. Во время съёмки они движутся в противоположных направлениях вокруг оси качания. Испытуемого размещают с таким расчётом, чтобы исследуемый орган находился по центру оси вращения тяги и лучей. При этом изображении всех анатомических структур, которые будут в центре оси качания, получаются чёткими, а все, что находятся выше или ниже этого центра – размазаны.

Подобный эффект объясняется тем, что при качании трубки и плёнки вокруг центра то, что находится с ним на одном уровне, будет неподвижно относительно плёнки. Все остальные рентгеновские тени будут скользить по плёнке и не оставят на ней чёткого изображения.

Таким образом, изменяя положение центра оси качания трубки и лучей, можно получить изображение среди исследуемого органа на любой глубине. Отсюда и название томографа (от греческого «томос» – слой и «графо» – пишу, регистрирую).

На рисунке 8 приводится томограмма гортани спереди. Эксперименты проводились трижды: 1) в рентгенологическом отделении госпиталя ПрибВО (г. Рига); 2) в рентгенологическом отделении больницы химического завода (г. Владимир); 3) в рентгенологическом отделении 5-й больницы (г. Рига).

В проведённом нами эксперименте приняли участие 10 испытуемых, условно разделённых на 2 группы:

1-я группа – лица с низким уровнем звуковысотного слуха и способности интонирования голосом;

2-я группа – музыканты с хорошим слухом и достаточно развитой вокальной моторикой.

Технические условия томографии: напряжение на трубке 70–80 кВ, фокусное расстояние 110–120 см,

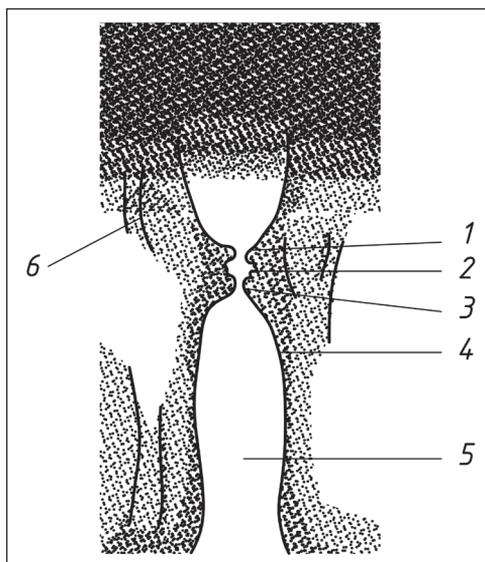


Рис. 8. Снимок гортани спереди

- 1 – ложные голосовые складки; 2 – морганиевы желудочки; 3 – истинные голосовые складки; 4 – подскладочное пространство; 5 – трахея; 6 – грушевидные карманы.

Fig. 8. An image of the larynx from the front

- 1 – false vocal folds; 2 – morgani ventricles; 3 – true vocal folds; 4 – subclavian space; 5 – trachea; 6 – pear-shaped pockets.

голосовых складок в момент атаки звука. В момент твёрдой атаки звука голосовые складки плотно сомкнуты на всю свою глубину, а при мягкой – они лишь сближены, не замыкаясь до конца. В первом случае толчок воздуха раздвигает сомкнутые голосовые складки, а во втором – больше расширяет сближенные голосовые складки на такую величину, которая будет определять интенсивность колебаний источника звука, то есть силу голоса.

Послесловие

В настоящее время наблюдается процесс интенсивной разработки более совершенных объективных методов исследования проблем вокальной педагогики, связанных с реализацией возможностей компьютерных технологий и разработкой специальных программ. Теоретическим основанием для их создания являются труды А. В. Харуто [20], О. Н. Пиксаевой [21], И. М. Красильникова [22], В. А. Новоселова, А. Г. Дылькова [22], а также автора данной статьи [24]. На их основе уже созданы новые информационные технологии, обладающие большим педагогическим потенциалом. Но поскольку в современной науке и практике они используются пока недостаточно, представляется целесообразным расширенная характеристика их целевого предназначения и особенностей применения в специально посвящённой данной проблеме статье.

62

выдержка – 1,25 с, угол качания – 30°, глубина среза – 6 см.

С каждого испытуемого было сделано по 10 снимков. Всего получено и проанализировано около 100 томограмм, что позволило сделать выводы, относящиеся к нейроронаксической теории голосообразования Р. Юссона [9, с. 79–85].

Методом рентгеномографии можно визуально наблюдать поведение

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Фант Г. Акустическая теория речеобразования / пер. с англ. М.: Наука, 1964. 284 с.
2. Ржевкин С. Н. Некоторые результаты анализа певческого голоса // Акустический журнал. 1956. Т. 2. Вып. 2. С. 210–212.
3. Рудаков Е. А. О регистрах певческого голоса и переходах к прикрытым звукам // Музыкальное искусство и наука. Вып. 1. М.: Музыка 1970. С. 34–48.

4. Морозов В. П. Искусство резонансного пения. Основы резонансной теории и техники. М.: ИП РАН, МНК имени П. И. Чайковского, Центр «Искусство и наука», 2008. 496 с.
5. Bartholomew W. A Physical of Good Voce Quality in the Male Voce // Acoustic Soc. Amer., vol. 6, 1934. Pp. 54–68.
6. Юссон Р. Певческий голос. М.: Музыка, 1974. 262 с.
7. Морозов В. П. Особенности акустического строения и восприятия детской речи // Детский голос. М.: Педагогика, 1970. С. 64–135.
8. Чаплин В. Л. Регистровая приспособляемость певческого голоса: дис. ... кандидата искусствоведения. Тбилиси, 1976. 169 с.
9. Стулова Г. П. Развитие детского голоса в процессе обучения пению. М.: Прометей, 1992. 270 с.
10. Князьков А. А., Стулова Г. П. Коэффициент регистровости и устройство для его измерения // Вопросы профессиональной подготовки студентов на музыкально-педагогическом факультете. М.: МГПИ, 2000, С. 135–139.
11. Fabre Ph. Un procede electrique porcutane d, inscription de l accolement glottique au course de la phonation^ glottography de haute frequence; premiers resultats // Bull. De l, Acad. Nat. Med., Paris, 1957. Pp. 66-69.
12. Жинкин Н. И. Механизмы речи. М.: АПН РСФСР, 1998. 370 с.
13. Дмитриев Л. Б., Отряшенков Ю. М., Хромов Л. Н. и др. Исследования работы голосовой щели при помощи электронного глотографа. М.: ГМПИ имени Гнесиных, 1980. С. 64–81.
14. Чаплин В. Л. Физиологические основы формирования певческого голоса в аспекте регистровой приспособляемости. М.: Информбюро, 2009. 189 с.
15. Sabouraud O., Gremy F. Sur la possibility de mouvement des cords vocal sane emission`sonore. Soc. Biologic. Paris, séance 28 Guile, 1958. Pp. 34–42.
16. Duvelleroy M. La glottography an module et en phase moyen d etude des schemas electrique equivalents au larynxes. These Med., Paris. 1961. Pp. 19–26.
17. Husson R. Physiologies de la Phonation. Paris, Published by Masson, 1962. 590 p.
18. Hiky S. Speech Synthesis by Control of Neuro-Physiological Parameters. 7-th International Congress on Acoustics. Budapest, Akademiai Kiadó, 1971. Pp. 375–382.
19. Fant G. Studies of Minimal Speech Unit // Speech Transmission Laboratory. Quarterly Progress and Status Report. Royal Institute of Technology. Stockholm, 1972, № 1. Pp. 14–21.
20. Харуто А. В. Компьютерный анализ звука в музыкальной науке. М.: МГК им. П. И. Чайковского. 2015. 448 с.
21. Пиксаева О. Н. Компьютерные технологии в процессе обучения пению: на примере вокальной подготовки студентов педагогического факультета: дис. ... канд. пед. наук. М.: МГПИ, 2008. 193 с.
22. Красильников И. М. Работа в программах – нотный редактор // Музыка и электроника. 2005. № 3. С. 6–8.
23. Новоселов В. А. Информационные технологии в музыкальном образовании: учебно-методическое пособие. В 2 частях. Ч. 1: Нотные редакторы MuseScore, Sibelius: освоение и возможности практического применения / В. А. Новоселов, А. Г. Дыльков. М.: МПГУ, 2019. 232 с.
24. Стулова Г. П. Акустические основы вокальной методики. СПб.: Планета музыки, 2015. 144 с.

Поступила 09.07.2021; принята к публикации 30.08.2021.

Об авторе:

Стулова Галина Павловна, профессор кафедры музыкально-исполнительского искусства Института изящных искусств Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский педагогический государственный университет» (МПГУ) (ул. Малая Пироговская, 1, строение 1, Москва, Российская Федерация, 119435), доктор педагогических наук, профессор, stulova.galina@mail.ru

Автором прочитан и одобрен окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Fant G. *Akusticheskaya teoriya recheobrazovaniya* [Acoustic Theory of Speech Formation]. Trans. from English. Moscow: Nauka Publ., 1964. 284 p. (in Russian).
2. Rzhhevkin S. N. Nekotorye rezul'taty analiza pevcheskogo golosa [Some Results of the Analysis of the Singing Voice]. *Akustichesky zhurnal* [Acoustic Journal]. 1956, vol. 2, iss. 2, pp. 210–212 (in Russian).
3. Rudakov E. A. O registrakh pevcheskogo golosa i perekhodakh k prikryтым zvukam [On the Registers of the Singing Voice and Transitions to Covered Sounds]. *Muzykal'noe iskusstvo i nauka* [Musical Art and Science]. Iss. 1. Moscow: Muzyka Publ., 1970, pp. 34–48 (in Russian).
4. Morozov V. P. *Iskusstvo rezonansnogo peniya. Osnovy rezonansnoj teorii i tekhniki* [The Art of Resonant Singing. Basis of Resonance Theory and Technique]. Moscow: Institute of Psychology under the Russian Academy of Sciences and the Moscow State Conservatoire, Center “Art and Science” Publ., 2008. 496 p. (in Russian).
5. Bartholomew W. A Physical of Good Voce Quality in the Male Voce. *Acoustic Soc. Amer.*, vol. 6, 1934, pp. 54–68.
6. Yussov R. *Pevcheskij golos* [Singing Voice]. Moscow: Muzyka Publ., 1974. 262 p. (in Russian).
7. Morozov V. P. Osobennosti akusticheskogo stroeniya i vospriyatiya detskoj rechi [Features of the Acoustic Structure and Perception of Children's Speech]. *Detskij golos* [Children's voice]. Moscow: Pedagogika Publ., 1970, pp. 64–135 (in Russian).
8. Chaplin V. L. *Registrovaya prisposoblyaemost' pevcheskogo golosa* [Register Adaptability of the Singing Voice]. PhD Thesis (Art Criticism). Tbilisi, 1976. 169 p. (in Russian).
9. Stulova G. P. *Razvitie detskogo golosa v protsesse obucheniya peniyu* [The Development of a Child's Voice in the Process of learning to Sing]. Moscow: Prometej Publ., 1992. 270 p. (in Russian).
10. Knyazkov A. A., Stulova G. P. Koeffitsient registrovosti i ustrojstvo dlya ego izmereniya [The Register Coefficient and the Device for Its Measurement]. *Voprosy professional'noj podgotovki studentov na muzykal'no-pedagogicheskom fakul'tete* [Questions of Professional Training of Students at the Music and Pedagogical Faculty]. Moscow: MGPI Publ., 2000, pp. 135–139 (in Russian).
11. Fabre Ph. Un procede électrique porcutane d'inscription de l'accolement glottique au course de la phonation glottography de haute fréquence; premiers resultats. *Bull. De l'Acad. Nat. Med.*, Paris, 1957, pp. 66–69.
12. Zhinkin N. I. *Mekhanizmy rechi* [Mechanisms of Speech]. Moscow: AES of RSFSR Publ., 1998. 370 p. (in Russian).

13. Dmitriev L. B., Otryashenkov Yu. M., Khromov L. N. et al. *Issledovaniya raboty golosovoj shheli pri pomoshhi elektronnoy glotografa* [Studies of the Work of the Glottis Using an Electronic Glottograph]. Moscow: Gnesins Russian Academy of Music, 1980. pp. 64–81 (in Russian).
14. Chaplin V. L. *Fiziologicheskie osnovy formirovaniya pevcheskogo golosa v aspekte registrovoj prisposoblyaemosti* [Physiological Foundations of the Formation of the Singing Voice in the Aspect of Register Adaptability]. Moscow: Informbyuro, 2009. 189 p. (in Russian).
15. Sabouraud O., Gremy F. Sur la possibility de mouvement des cords vocal sane emission sonore. *Soc. Biologic. Paris, séance 28 Guile*, 1958, pp. 34–42.
16. Duvelleroy M. La glottography an module et en phase moyen d'étude des schemas electrique equivalents au larynxes. *These Med.*, Paris. 1961, pp. 19–26.
17. Husson R. *Physiologies de la Phonation*. Paris, Published by Masson, 1962. 590 p.
18. Hiky S. Speech Synthesis by Control of Neuro-Physiological Parameters. *7th International Congress on Acoustics*. Budapest, Akademiai Kiadó, 1971, pp. 375–382.
19. Fant G. Studies of Minimal Speech Unit. *Speech Transmission Laboratory. Quarterly Progress and Status Report. Royal Institute of Technology*. Stockholm, 1972, no. 1, pp. 14–21.
20. Haruto A. V. *Komp'yuternyj analiz zvuka v muzykal'noj nauke* [Computer Analysis of Sound in Music Science]. Moscow: MGK im. P. I. Chajkovskogo, 2015. 448 p. (in Russian).
21. Piksaeva O. N. *Komp'yuternye tekhnologii v protsesse obucheniya peniyu: na primere vokal'noj podgotovki studentov pedagogicheskogo fakul'teta* [Computer Technologies in the Process of Teaching Singing: on the Example of Vocal Training of Students of the Pedagogical Faculty]. PhD Thesis (Pedagogy). Moscow: MGPI, 2008. 193 p. (in Russian).
22. Krasilnikov I. M. *Rabota v programmakh – notnyj redaktor* [Work in Programs-Music Editor]. *Muzyka i elektronika* [Music and Electronics]. Moscow, 2005, no. 3. pp. 6–8 (in Russian).
23. Novoselov V. A., Dyl'kov A. G. *Informatsionnye tekhnologii v muzykal'nom obrazovanii* [Information Technologies in Music Education]. In 2 parts. Part 1: Music editors MuseScore, Sibelius: mastering and practical application. Moscow: MPGU Publ., 2019. 232 p. (in Russian).
24. Stulova G. P. *Akusticheskie osnovy vokal'noj metodiki* [Acoustic Bases of Vocal Technique]. Saint-Petersburg: Planeta muzyki Publ., 2015. 144 p. (in Russian).

Submitted 09.07.2021; revised 30.08.2021.

About the author:

Galina P. Stulova, Professor at the Department of Music Performing Art of Institute of Fine Arts of Moscow Pedagogical State University (MPGU) (Malaya Pirogovskaya Street, 1/1, Moscow, Russian Federation, 119435), Doctor of Pedagogical Sciences, Professor, stulova.galina@mail.ru

The author has read and approved the final manuscript.