



Стрельченок Е.С.¹ ✉, Пивовар М.Л.², Криштопова М.А.¹

¹ Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет, Витебск, Беларусь

² Центр трансфера медицинских и фармацевтических технологий Витебского государственного ордена Дружбы народов медицинского университета, Витебск, Беларусь

Применение 3D-моделирования при предоперационной подготовке пациентов с рефрактерными формами функциональных дисфоний: пилотное исследование

Конфликт интересов: не заявлен.

Вклад авторов: концепция и дизайн исследования – Стрельченок Е.С., Криштопова М.А.; техническое обеспечение – Пивовар М.Л.

Подана: 29.04.2023

Принята: 22.05.2023

Контакты: ekaterina.osipuk@gmail.com

Резюме

Цель. Разработка и анализ применения трехмерных моделей гортани для предоперационной подготовки и повышения эффективности лечения пациентов с рефрактерными формами функциональных дисфоний.

Материалы и методы. Проспективно оценивали РКТ гортани 4 пациентов с диагнозом «функциональная дисфония, рефрактерное течение» (R49.0), которым в последующем выполнялась инъекционная ларингопластика. Критериями включения в исследование были функциональная дисфония, рефрактерная к стандартной терапии; пол – мужской и женский; возраст от 18 до 66 лет; отсутствие каких-либо жалоб на состояние здоровья, острых или хронических заболеваний других органов, что подтверждалось регулярными комплексными профилактическими медицинскими осмотрами; добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Критериями исключения были отказ от участия в исследовании; наличие жалоб на состояние здоровья; острые или хронические заболевания; периодический или постоянный прием каких-либо лекарственных средств; злоупотребление алкоголем; курение. Все пациенты – женщины (n=4), средний возраст 39 лет, представители голосоречевых профессий. Полученные 3D-модели гортани использовались для определения положения щитовидного хряща, черпаловидных хрящей, перстневидного хряща и построения плоскости расположения волокон перстнещитовидных мышц. Созданные и проанализированные модели были представлены группе экспертов для оценки по шкале Лайкерта. Статистическую обработку полученных данных проводили с помощью пакета прикладных программ MS Excel, Statistica for Windows v. 10.0.

Результаты. Были созданы и проанализированы четыре 3D-модели гортани и определено положение щитовидного хряща, черпаловидных хрящей, перстневидного хряща, выстроена плоскость расположения волокон перстнещитовидных мышц.

Оценкой суммы баллов по шкале Лайкерта получен коэффициент воспроизводимости 0,92, а среднестатистический ранг категории показал общую положительную установку группы экспертов на 3D-модель, что подтверждает ее высокую эффективность для применения при планировании хирургического лечения пациентов с рефрактерными формами функциональных дисфоний.

Выводы. Разработанные трехмерные модели гортани могут быть использованы при планировании хирургического лечения пациентов с рефрактерным течением функциональных дисфоний, что приводит к более точному определению точек для чрескожного доступа к перстнещитовидной мышце, уменьшению числа хирургических ошибок и улучшению результатов хирургических вмешательств.

Ключевые слова: функциональная дисфония, рефрактерное течение, 3D-моделирование, перстнещитовидная мышца, сенсорная обратная связь

Katsiaryna S. Stralchouak¹ ✉, Mikhail L. Pivavar², Maryna A. Kryshchopava¹

¹ Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Vitebsk, Belarus

² Center for Transfer of Medical and Pharmaceutical Technologies of the Vitebsk State Order of Peoples' Friendship Medical University, Vitebsk, Belarus

Use of 3D Modeling in Preoperative Preparation of Patients with Refractory Forms of Functional Dysphonia: A Pilot Study

Conflict of interest: nothing to declare.

Authors' contribution: study concept and design – Katsiaryna S. Stralchouak, Maryna A. Kryshchopava; technical support – Mikhail L. Pivavar.

Submitted: 29.04.2023

Accepted: 22.05.2023

Contacts: ekaterina.osipuk@gmail.com

Abstract

Purpose. To work out and analyze the use of three-dimensional models of the larynx for preoperative preparation and improving the treatment effectiveness in patients with refractory forms of functional dysphonia.

Materials and methods. 4 CT-scans of the larynx were prospectively evaluated in 4 patients diagnosed with "Functional dysphonia, refractory form" (R49.0), who subsequently underwent injection laryngoplasty. Inclusion criteria for the study were: functional dysphonia refractory to standard therapy; gender both male and female; age from 18 to 66 years; absence of any complaints about the state of health, acute or chronic diseases of other organs, confirmed by regular comprehensive preventive medical examinations; voluntary informed consent for participation in the study. The exclusion criteria were: refusal to participate in the study; presence of health complaints; acute or chronic diseases; periodic or constant use of any medicines; alcohol abuse; smoking. All patients were women (n=4), mean age 39 years, representatives of vocal professions. The obtained 3D models of the larynx were used to determine the position of the thyroid cartilage, arytenoid cartilage, and cricoid cartilage and to construct the plane of location of the fibers of the cricothyroid

muscles. The created and analyzed models were presented to a group of experts for assessment by the Likert scale. Statistical processing of data obtained was carried out using the MS Excel software package, "Statistica for Windows v. 10.0".

Results. 4 3D models of the larynx were created and analyzed, and positions of the thyroid cartilage, arytenoid cartilage, and cricoid cartilage were determined, and the plane of location of the fibers of the cricothyroid muscles was constructed. The assessment of total points according to the Likert scale allowed obtaining a reproducibility coefficient of 0.92, and the average statistical category ranking showed an overall positive attitude of the expert group to the 3D model, confirming its high efficiency for use in planning surgical treatment of patients with refractory forms of functional dysphonia.

Conclusions. The designed three-dimensional models of the larynx can be used when planning the surgical treatment in patients with refractory forms of functional dysphonia, allowing more accurate determination of points for percutaneous access to the cricothyroid muscle, reducing the number of surgical errors and improving surgical results.

Keywords: functional dysphonia, refractory form, 3D modeling, cricothyroid muscle, sensory feedback

■ ВВЕДЕНИЕ

Голособразование – уникальный двигательный навык голосового аппарата, характерный для человека [1]. Нейрофизиология голосообразования достаточно сложна и обеспечивается различными механизмами для врожденного голоса и голоса, который развивается в течение жизни. В первом случае центральный отдел регуляции находится в передней поясной извилине и ретикулярной формации головного мозга, а периферическими являются мотонейроны гортани. В свою очередь в контроле приобретенного голосообразования ведущее место занимает ларингальный моторный кортекс, расположенный в прецентральной извилине головного мозга, а взаимодействие с периферическими нейронами происходит по механизмам сенсорных обратных связей – аудиторной и соматосенсорной. Процесс становления голоса у человека – это выработка моделей голосообразования, своеобразных программ фидфорвард (англ. feedforward) контроля в головном мозге [1, 2].

Формирование голосообразования, как и любого другого навыка, происходит в несколько этапов. Первый этап – это объединение отдельных элементов движения в целостное действие. Оно характеризуется иррадиацией возбуждения в моторной зоне коры с генерализацией ответных двигательных реакций и вовлечением в работу дополнительных мышц. На втором этапе благодаря постепенной концентрации возбуждения происходит улучшение координации движений, а также усиление стереотипности двигательных актов. На третьем этапе навык закрепляется, стабилизируется, достигается высокая степень координации и стереотипности движений. С увеличением запаса выработанных двигательных актов гортани (моделей голосообразования) повышается способность легче и быстрее вырабатывать новые движения (положительный перенос навыка). Двигательные навыки по мере закрепления становятся все более стойкими (и чем они проще по своей структуре, тем прочнее) [2].

Однако контроль голосообразования – это хрупкий механизм, на который оказывают влияние множество факторов. При правильном использовании голоса

устраняются излишние мышечные напряжения, голос становится более устойчивым, а движения гортани плавными, точными и непринужденными. При неправильном использовании голоса координация мышечной деятельности гортани нарушается, и в работу вовлекаются другие мышцы, сначала синергисты, компенсирующие снижение силы основных мышц, а затем по мере нарастания дискоординации – и другие мышцы, в том числе антагонисты. В целом движения становятся менее точными, темп их замедляется [2]. Таким образом, при утомлении происходит своеобразный переход к начальным этапам научения, что приводит к появлению у пациентов клинических проявлений: охриплости голоса, изменения его тембра, высоты, громкости и т. д. Данная патология известна как функциональная дисфония [3].

Функциональная дисфония – мультифакторное заболевание, связанное с изменением голоса, его тембра и силы, при котором не выявляются первичные органические (морфологические) изменения в области голосовых складок или гортани, отсутствуют неврологические, артикуляционные и/или дыхательные нарушения [3]. Заболеваемость данной патологией в Республике Беларусь и в мире составляет 7% [4]. Женщины болеют в два раза чаще, чем мужчины. Заболевание распространено среди лиц трудоспособного возраста, связанных с голосоречевыми профессиями (учителя, преподаватели, лекторы, дикторы, воспитатели и т. д.).

Функциональные дисфонии возникают при нарушении координационной работы мышц гортани. Основным патофизиологическим открытием у пациентов с функциональными нарушениями голоса было более высокое положение гортани и подъязычной кости во время фонации по сравнению с контрольной группой, неправильное закрытие голосовой щели, чрезмерная мышечная активность в вестибулярном отделе гортани (переднезаднее сужение и аддукция желудочковых складок) и повышение активности наружных мышц гортани. Напряжение щитоподъязычной мышцы, которая поднимает гортань к подъязычной кости, переднего брюшка двубрюшной мышцы, челюстно-подъязычной мышцы, поднимающих подъязычную кость вверх, может приводить к элевации гортани у пациентов с дисфонией. Van Houtte et al. обнаружили напряжение челюстно-подъязычной мышцы во время фонации у пациентов с гипертонусной дисфонией по сравнению со здоровой группой [6, 7]. Нет исследований, подтверждающих, что переднее брюшко двубрюшной мышцы и челюстно-подъязычной мышцы могут быть напряжены при функциональной дисфонии. Однако существуют данные о вовлечении в процесс перстнещитовидной мышцы. Она расположена на передне-боковой поверхности гортани, начинается от внутренней поверхности дуги перстневидного хряща и прикрепляется к нижнему краю щитовидного хряща. Ее функция заключается в наклоне щитовидного хряща кпереди и отдалении его от черпаловидных хрящей, что обеспечивает напряжение и удлинение голосовых складок, что в свою очередь влияет на высоту голоса пациента. Именно данная характеристика голоса чаще всего страдает у пациентов с функциональными дисфониями [1, 2].

В клиническом протоколе «Диагностика и лечение пациентов с оториноларингологическими заболеваниями (взрослое население)» предлагается большое количество методов лечения дисфоний: голосовой покой, вливание лекарственных средств в гортань (5%-го раствора колларгола, 0,05%-го оксиметазолина), комплексные лекарственные средства, содержащие антибиотик и кортикостероидный гормон, 0,5%-й раствор диоксида, витамины, физиотерапия (электрофорез 1–3%-го раствора

калия йодида, ультразвуковая терапия, магнитотерапия, лазеротерапия), фонопедическая коррекция при функциональной дисфонии. Из всего вышеперечисленного следует, что в настоящее время нет «золотого стандарта» лечения функциональных дисфоний. Более того, в настоящее время увеличивается число пациентов с функциональными дисфониями, устойчивыми к существующим методам лечения, т. е. рефрактерными. Количество рефрактерных форм течения дисфоний увеличилось после перенесенных вирусных заболеваний, в т. ч. коронавирусной инфекции.

Рефрактерное течение данного заболевания оказывает значительное влияние на качество жизни: социальная изоляция, депрессия, беспокойство, изменение образа жизни, отсутствие на рабочем месте в связи с болезнью и, как следствие, потеря заработной платы. Исследования нарушений голоса показывают, что влияние на качество жизни и снижение производительности труда сопоставимо с таковыми у пациентов с бронхиальной астмой, острым коронарным синдромом, хронической обструктивной болезнью легких [4, 5].

Инъекционная ларингопластика – это метод хирургического лечения, основанный на введении в мышечную и/или соединительную ткань гортани различных веществ, направленный на восполнение объема тканей, улучшение их трофики и восстановление функции. Данный метод является новейшим методом лечения недостаточности голосового аппарата различного генеза. Однако он имеет ряд технических трудностей, к которым относятся определение чрескожного доступа к внутренним мышцам гортани, снижение травматизации окружающих тканей и повышение точности введения лекарственных средств и трансплантатов.

Таким образом, разработка и внедрение в клиническую практику нового эффективного лечения рефрактерных форм функциональных дисфоний являются актуальными.

■ ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка и анализ применения трехмерных моделей гортани для предоперационной подготовки и повышения эффективности лечения пациентов с рефрактерными формами функциональных дисфоний.

■ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Проспективно оценивали РКТ гортани четырех пациентов с диагнозом «функциональная дисфония, рефрактерное течение» (R49.0), которым в последующем выполнялась инъекционная ларингопластика по разработанной методике. Критериями включения в исследование были функциональная дисфония, рефрактерная к стандартной медикаментозной терапии; пол – мужской и женский; возраст от 18 до 66 лет, в среднем 39 лет; отсутствие каких-либо жалоб на состояние здоровья, острых или хронических заболеваний других органов, что подтверждалось регулярными комплексными профилактическими медицинскими осмотрами; добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Критериями исключения были отказ от участия в исследовании; наличие жалоб на состояние здоровья; острые или хронические заболевания; периодический или постоянный прием каких-либо лекарственных средств; злоупотребление алкоголем; курение. Все пациенты – женщины – представители голосоречевых профессий. Это исследование было одобрено этическим комитетом УО «Витебский государственный ордена Дружбы народов медицинский университет».

Сканирование РКТ гортани выполняли в срезах с шагом 1,25 мм с помощью компьютерного томографа (GE Lightspeed Pro 32, Чикаго, США). Процесс изготовления медицинской 3D-модели для планирования хирургического лечения состоял из нескольких этапов. На первом этапе формировали набор медицинских изображений, которые получили при РКТ гортани и сохраняли в виде 2D-срезов в формате данных DICOM. Пример представлен на рис. 1. Вторым этапом полученные 2D-изображения в DICOM-формате подвергали обработке. Осевые виды были изучены одним наблюдателем, слой за слоем, и аксиальные реконструкции были модифицированы и созданы анатомически точные компьютерные 3D-модели с помощью программного обеспечения InVesalius 3.1 (Tridimensional Technology Division, Brazil) и Meshmixer (Autodesk Inc, США), что представлено на рис. 2. Третьим этапом создавалась трехмерная реконструкция, и компьютерная 3D-модель печаталась на принтере. Изготовленные 3D-модели представлены на рис. 3, 4. Четвертым этапом на готовой трехмерной модели изучалось расположение щитовидного хряща, черпаловидных хрящей с отростками, перстневидного хряща и перстнещитовидных мышц, а также изучались пространственные отношения между ними, определялся чрескожный доступ при инъекционной ларингопластике.

Полученные 3D-модели гортани использовались для определения положения щитовидного хряща, черпаловидных хрящей, перстневидного хряща и построения плоскости расположения волокон перстнещитовидных мышц. Созданные и проанализированные модели были представлены группе экспертов для оценки по шкале Лайкерта, анкета для которой содержала следующие вопросы:

1. Легко ли использовать 3D-модель?
2. Обеспечивает ли данная 3D-модель лучшее понимание патологии?
3. Улучшает ли данная 3D-модель понимание анатомии?
4. Позволяет ли 3D-модель более глубоко понимать метод хирургического лечения?
5. Помогает ли 3D-модель планировать хирургическое лечение?

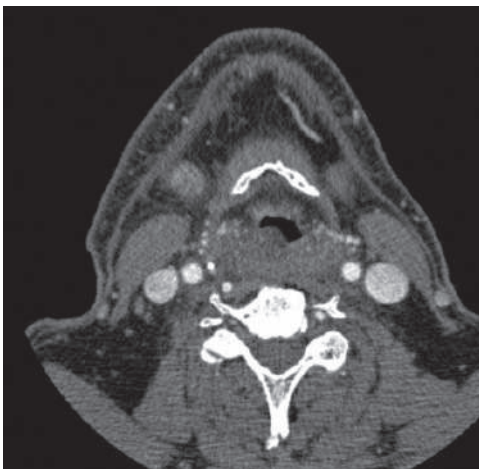


Рис. 1. 2D-срез гортани
Fig. 1. 2D section of the larynx

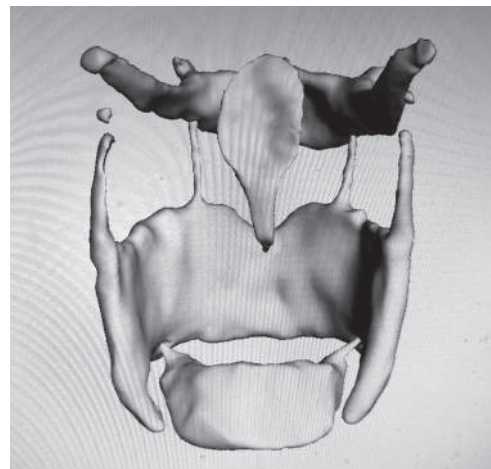


Рис. 2. Прототип 3D-модели гортани
Fig. 2. Prototype 3D model of the larynx



Рис. 3. 3D-модель гортани
Fig. 3. 3D model of the larynx



Рис. 4. 3D-модель гортани
Fig. 4. 3D model of the larynx

■ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Были проанализированы четыре 3D-модели гортани, определено, что среднее расстояние между дистальными концами пластинок щитовидных хрящей составило 38 ± 2 мм, между пластинками щитовидных хрящей и дугой перстневидного хряща – 21 ± 1 мм, между внутренней поверхностью соединения пластинок щитовидного хряща и внутренней поверхностью пластинки перстневидного хряща – 44 ± 3 мм.

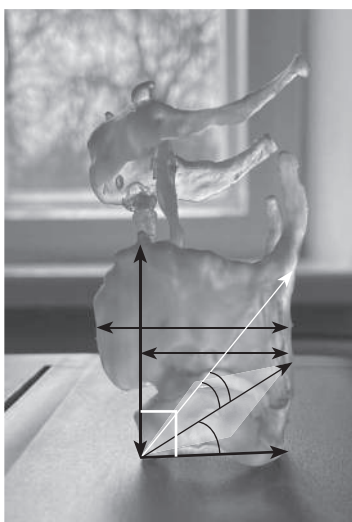


Рис. 5. Проекция перстнещитовидной мышцы
Fig. 5. Projection of the cricothyroid muscle

Плоскость прохождения волокон перстнещитовидной мышцы – через линии, проведенные между нижним краем пластинки перстневидного хряща и внутренней поверхностью заднего края пластинок щитовидного хряща, что указано на рис. 5 и составляет в среднем угол наклона 40° .

Оценкой суммы баллов по шкале Лайкерта получен коэффициент воспроизводимости 0,92, а среднестатистический ранг категории показал общую положительную установку группы экспертов на 3D-модель, что подтверждает ее высокую эффективность для применения при планировании хирургического лечения пациентов с рефрактерными формами функциональных дисфоний.

■ ВЫВОДЫ

1. Разработанные трехмерные модели гортани могут быть использованы при планировании хирургического лечения пациентов с рефрактерным течением функциональных дисфоний, так как позволяет на основании расчетов среднего расстояния между дистальными концами пластинок щитовидных хрящей (38 ± 2 мм), между пластинками щитовидных хрящей и дугой перстневидного хряща (21 ± 1 мм), между внутренней поверхностью соединения пластинок щитовидного хряща и внутренней поверхностью пластинки перстневидного хряща (44 ± 3 мм) и угла наклона плоскости прохождения волокон перстнещитовидной мышцы (40°) точно определить точки чрескожного доступа к перстнещитовидной мышце.
2. Коэффициент воспроизводимости по шкале Лайкерта составил 0,92, а среднестатистический ранг категории показал общую положительную установку группы экспертов на 3D-модель, что подтверждает ее высокую эффективность для применения при планировании хирургического лечения пациентов с рефрактерным течением функциональных дисфоний.

■ ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Kryshchapava M. et al. Brain activity during phonation in women with muscle tension dysphonia: an fMRI study. *Journal of Voice*, 2017;31(6):675–690. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2017.03.010>
2. Kryshchapava M. et al. Functional magnetic resonance imaging study of brain activity associated with pitch adaptation during phonation in healthy women without voice disorders. *Journal of Voice*, 2017;31(3):118–124. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2016.02.022>
3. Kryshchapava M. et al. Development of protocols for studying the role of the central nervous system in the control of voice formation in healthy individuals and patients suffering from functional dysphonia, and evaluating their effectiveness. *Otorhinolaryngology. Eastern Europe*, 2018;8(4):361–370. (In Russian)
4. Benninger M.S. et al. Prevalence and occupation of patients presenting with dysphonia in the United States. *Journal of Voice*, 2017;31(5):594–600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2017.01.011>
5. Chang J.I., Bevans S.E., Schwartz S.R. Otolaryngology clinic of North America: evidence-based practice: management of hoarseness/dysphonia. *Otolaryngologic Clinics of North America*, 2012;45:5:1109–1126. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.otc.2012.06.012>
6. Van Houtte E., Van Lierde K., Claeys S. Pathophysiology and treatment of muscle tension dysphonia: a review of the current knowledge. *Journal of Voice*, 2011;25(2):202–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2009.10.009>
7. Van Houtte E. et al. An examination of surface EMG for the assessment of muscle tension dysphonia. *Journal of Voice*, 2013;27(2):177–186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2011.06.006>