
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

**СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАРДИНАЛЬНЫХ ГЛАСНЫХ ЗВУКОВ
КАК ПОКАЗАТЕЛИ СЛУХОРЕЧЕВОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ У ПАЦИЕНТОВ
С ПОСТЛИНГВАЛЬНОЙ ХРОНИЧЕСКОЙ СЕНСОНЕВРАЛЬНОЙ
ТУГОХОСТЬЮ II и III СТЕПЕНИ**

© 2023 г. К. С. Штин¹, *, А. М. Луничкин¹, А. П. Гвоздева¹,
Л. Е. Голованова², И. Г. Андреева¹

¹Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова Российской академии наук,
Санкт-Петербург, Россия

²Северо-Западный государственный медицинский университет им. И.И. Мечникова,
Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: misery01@ya.ru

Поступила в редакцию 29.09.2022 г.

После доработки 03.03.2023 г.

Принята к публикации 09.03.2023 г.

Хроническая сенсоневральная тугоухость (СНТ) характеризуется снижением слуха на основных речевых частотах, что предполагает ухудшение слухоречевой обратной связи и, как следствие, изменение характеристик речи. Выполнена проверка гипотезы о том, что это ухудшение может проявиться в повышении частоты формант F0, F1, F2 гласных звуков речи у пациентов с постлингвальной СНТ II и III степени. Выполнены записи вызванной речи у женщин молодого и среднего возраста (36–59 лет): 7 дикторов-женщин с СНТ II степени, которые не носили слуховые аппараты; 5 дикторов-женщин с СНТ III степени при снятых слуховых аппаратах; контрольной группы из 12 нормально слышащих дикторов-женщин. Проведены оценки F0, F1, F2 ударных гласных звуков [a], [i], [u] и расчеты показателей централизации гласных — площади формантных треугольников, формантного коэффициента централизации и коэффициента вторых формант. Все изученные спектральные показатели в группах пациентов с постлингвальной СНТ оказались сходными с контрольной группой, достоверных различий выявлено не было.

Ключевые слова: слухоречевой контроль, обратная связь, сенсоневральная тугоухость, характеристики гласных звуков, частота основного тона голоса

DOI: 10.31857/S0869813923040106, EDN: VJRVTV

ВВЕДЕНИЕ

Контроль собственного голоса играет важную роль в организации движений речевых мышц для точного воспроизведения звуков, в формировании произношения отдельных слов и развитии речи в целом. Слуховая система обеспечивает контроль собственного голоса диктора двумя способами — через прямую (feedforward control) и обратную связь (feedback control). Прямая связь активирует сохраненную ранее программу для органов артикуляционного аппарата, тогда как обратная связь дает информацию о достижении речевой цели на данный момент [1, 2]. В случае прелингвальной глухоты оба вида связи утрачиваются, что влечет за собой значительные изменения голоса пациента и процессов формирования речи. Влияние глухо-

ты на речь достаточно подробно исследовано как у детей [3, 4], так и у взрослых [5, 6]. Изменения вокальной речи наиболее четко проявляются в структуре гласных звуков, особенно значений первой и второй формант, поскольку отсутствие слуховой обратной связи приводит к ограничению горизонтальных и вертикальных движений языка [5, 7]. Ряд авторов считает, что нарушение слуховой обратной связи влияет на сегментарные и надсегментарные характеристики речи, поскольку именно этот вид связи дает информацию о тонких движениях речевых мышц [8, 9]. Вместе с тем изменение спектральных показателей речи при нарушении обратной связи может оказаться незначительным при сформированных ранее артикуляторных программах речи.

При сенсоневральной тугоухости (СНТ), развивавшейся уже в постлингвальный период, артикуляторные программы речи сформированы при нормальном контроле голоса. В результате возникают отличные от прелингвальной глухоты условия говорения. В этом случае прямая связь продолжает работать, а обратная связь испытывает дефицит, обусловленный частичной потерей слуха, что должно сопровождаться ухудшением контроля собственного голоса. В случае длительного снижения слуха можно также допустить некоторое ухудшение прямой слухоречевой связи при отсутствии слухопротезирования. Изучение функционирования нейросетей у постлингвальных пациентов с умеренной и умеренно-тяжелой (II–III степень) тугоухостью выявило их глубокую перестройку, включая изменения в обработке эмоциональных звуковых сигналов, изменения уровня слухового внимания, межсенсорного взаимодействия и сенсомоторного контроля [10, 11]. Эти результаты предполагают наличие стойких изменений в контроле голоса уже при умеренной степени тугоухости. Артикуляция пациентов с СНТ характеризуется наличием ряда искажений и фонологических нарушений. Эти искажения речи оцениваются разнообразными спектральными показателями: частотой основного тона (F0), спектральной и амплитудной неравномерностью звучания (jitters and shimmers), соотношением гармонических и шумовых компонент [12].

Среди всех акустических показателей голоса, спектральные характеристики, связанные с фонацией (F0) и артикуляцией (F1, F2), дают наиболее объективную информацию для выявления и оценки изменений, ведущих к ухудшению качества голоса и снижению разборчивости речи при нарушении слуховой обратной связи [13–15]. Голос и артикуляция тесно связаны, поскольку звук, исходящий из гортани, трансформируется в слова путем его сочетания с динамическими и статическими структурами верхних голосовых путей. Эта трансформация в спектре голоса отражается в значениях первой и второй формант гласных звуков. В русском языке базовые гласные звуки [a], [i], [u] в координатной плоскости F1–F2 образуют вершины фонетического “треугольника гласных”, внутри которого расположены остальные гласные фонемы [16, 17].

У пациентов с долингвальной глухотой неоднократно была продемонстрирована выраженная централизация гласных европейских языков, в результате которой область (треугольник) гласных при патологии оказывалась внутри области гласных нормы и размерами была значительно меньше последней [5, 6, 18]. При постлингвальной глухоте аналогичных работ не выполнялось. В единственной обнаруженной нами работе [19] была выполнена оценка спектральных характеристик нескольких гласных звуков [a], [e], [i], однако их формантный анализ не проводили.

Целью работы была проверка гипотезы о том, что при II и III степени постлингвальной СНТ перечисленные выше спектральные показатели голоса, характеризующие процессы фонации и артикуляции, будут свидетельствовать об ухудшении слухоречевой обратной связи и нарушении контроля голоса в текущем моменте. Изучение формантных характеристик гласных звуков [a], [i], [u] позволяет оценить изменения, которые в целом происходят при голосообразовании и артикуляции

вокальных звуков русской речи. При такой оценке необходимо учитывать положение гласного в речевом сигнале, в частности, ударность его позиции в слогоритмической структуре слова (словесное ударение), когда формантные максимумы спектра гласных звуков наиболее выражены благодаря четкости артикуляции [17]. Поэтому для оценки спектральных характеристик мы использовали только ударные гласные в разных положениях, имевшие достаточный для точной количественной оценки стационарный интервал.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Дикторы

В исследовании приняли участие женщины-дикторы молодого и среднего возраста (36–59 лет), носительницы русского языка. Экспериментальные группы составили пациенты Сурдологического отделения Городского гериатрического медико-социального центра г. Санкт-Петербурга с диагностированной симметричной хронической СНТ продолжительностью более 5 лет, которые имели тимпанограмму типа “А” или “Ad” (“As”). В первую группу вошли 7 дикторов с СНТ II степени, при которой средние пороги слуха на частотах 0.5, 1, 2 и 4 кГц составляли от 41 до 55 дБ для обеих ушей. Дикторы этой группы, средний возраст которых был равен 46 ± 6 лет, не носили слуховые аппараты. Во вторую экспериментальную группу вошли 5 дикторов в возрасте 47 ± 6 лет с СНТ III степени со средней потерей слуха на основных аудиометрических частотах в диапазоне от 56 до 70 дБ. Все дикторы этой группы использовали слуховые аппараты в повседневной жизни. Контрольную группу составили 12 дикторов с нормальным слухом (средний возраст – 50 ± 8 лет). Пороги слуха по воздушной тональной пороговой аудиометрии на основных аудиометрических частотах в контрольной группе были не выше 25 дБ для обеих ушей, что соответствует диапазону нормального слуха для данной возрастной группы.

У дикторов всех групп отсутствовали: генетические и врожденные заболевания; острая и хроническая бактериальная или вирусная инфекция наружного и среднего уха; острые инфекции верхних дыхательных путей; органическое поражение голосовых связок; анатомические аномалии верхних дыхательных путей; неврологические расстройства; применение ототоксических препаратов в анамнезе; акустическая травма или внезапная потеря слуха в анамнезе; пре- или перилингвальная потеря слуха; речевая профессия (певцы, актеры, учителя, ораторы).

Речевой материал

Для записи использовали 9 слов русского языка с гласными [a], [i], [u] в разных ударных позициях: в начале слова – рУчка, Армия, мИна; в середине – бумАга, малИна, посУда; в конце – кредИт, шалУн, строкаА.

Оборудование и экспериментальное помещение

Исследование проводили в комнате, заглушенной при помощи акустического поролонa. Запись голоса диктора выполняли с применением ноутбука Lenovo V570 и программного обеспечения Cool Edit Pro 2.1. Для записи голоса использовали микрофон Sennheiser E845 с суперкардиоидной диаграммой направленности и звуковую карту Creative E-MU 0202 (44 100 Гц, 16 Бит).

Экспериментальная процедура

Обследование пациентов с СНТ III степени осуществлялось при снятых слуховых аппаратах после 20 мин нахождения без них (адаптации). Во время записи речи диктор располагался на стуле. В 20 см от диктора, на уровне его рта, устанавливали микрофон на стойке. Положение головы не фиксировалось жестко, однако диктору была дана инструкция не поворачивать и не наклонять голову. Таким образом, поддерживалось постоянное расстояние между губами диктора и микрофоном. Поскольку микрофон имел суперкардиоидную диаграмму направленности, отражения звука голоса от стены кабинета, которая находилась перед диктором, не улавливались микрофоном и не могли существенно повлиять на качество записей. Отражения звука голоса от других стен минимизировали при помощи трехсекционной ширмы, покрытой акустическим поролоном, которую располагали за спиной диктора.

Каждый диктор участвовал в трех сессиях, в каждой из которых записывали по три из девяти слов. Сессии различались по набору слов, в которых ударная гласная занимала одну из трех возможных позиций. В течение одной сессии диктор произносил слова друг за другом четыре раза. Для того, чтобы уменьшить различия в интонировании слов, дикторов просили перед каждым словом добавлять местоимение “это”: “Это – ручка, это – армия, это – мина” и т.д.

Для каждого диктора контрольной и экспериментальных групп было записано 36 слов (9 слов × 4 повтора). Общий объем записанного материала для всех 24 дикторов составил 864 слова: 432 слова для контрольной группы, 252 слова для группы с СНТ II и 180 слов для группы с СНТ III степени. После окончания сессии записи голоса сохраняли в формате wav для дальнейшего анализа.

Анализ записей и методы статистического анализа

Из полученных записей при помощи программы Cool Edit Pro 2.1 были вырезаны фрагменты, содержащие слова. Далее эти фрагменты анализировали в программе Praat Version 6.2.05 (свободно распространяемое программное обеспечение, www.praat.org). Анализ ударных гласных звуков включал выделение стационарного участка гласного (не менее 50 мс) для определения частоты основного тона (F0), первой (F1) и второй (F2) форманты. Частотный диапазон для оценки F0 составлял 75–500 Гц. Для определения значений формант использовали авторегрессионный метод Берга (Burg Linear Predictive Coding Autoregressive Method), реализованный в Praat. Шаг по времени составлял 0.01 с, длительность окна интегрирования 0.025 с, максимальное искомое значение формант 5.5 кГц, коррекция предсказания (pre-emphasis) выполнялась на частотах выше 50 Гц.

Результаты формантного анализа использовали для оценок централизации гласных. Определяли три показателя – площадь формантных треугольников, формантный коэффициент централизации и коэффициент вторых формант. Площадь формантных треугольников (ПФТ) рассчитывали по формуле, предложенной Vorperian и Kent [20] и модифицированной для русского языка [16]:

$$\text{ПФТ} = 0.5 ((F2[i] \times F1[a] + F2[a] \times F1[u] + F2[u] \times F1[i]) - (F1[i] \times F2[a] + F1[a] \times F2[u] + F1[u] \times F2[i]));$$

где F1 и F2 значения первой и второй форманты соответствующих гласных звуков в Гц.

Формантный коэффициент централизации (ФКЦ) гласных звуков, который был предложен Sapir и соавт. [21], определяли по формуле:

$$\text{ФКЦ} = (F2[u] + F2[a] + F1[i] + F1[u]) / (F2[i] + F1[a]).$$

Таблица 1. Частота основного тона голоса и расчетные спектральные характеристики гласных для группы дикторов-женщин с нормальным слухом (контрольная группа)

№	F0*, Гц	ПФТ**, у.е.	КВФ***	ФКЦ****
1	203	351658	3.09	0.86
2	167	487144	2.94	0.86
3	148	385617	2.34	0.95
4	175	354874	1.71	1.21
5	178	359876	2.14	1.02
6	166	222752	2.44	0.96
7	219	336583	1.74	0.98
8	186	585099	2.97	0.80
9	220	347541	2.57	0.97
10	205	280775	2.73	0.95
11	176	377592	3.58	0.78
12	224	328407	2.33	0.96
Среднее	169 ± 25	376782 ± 93998	2.58 ± 0.51	0.93 ± 0.11

*F0 — частота основного тона голоса, получена как среднее для 9 слов и 4 их повторений ($n = 36$) по всем анализируемым гласным.

**ПФТ — площадь формантных треугольников (формулу расчета см. в разделе Методы исследования);
***КВФ — коэффициент вторых формант — соотношение вторых формант соответствующих гласных звуков ($F2[i]/F2[u]$), данных в Гц;

****ФКЦ — формантный коэффициент централизации (формулу расчета см. в разделе Методы исследования).

Коэффициент вторых формант (КВФ), применяемый при различных речевых нарушениях [7, 22, 23], рассчитывали по формуле:

$$\text{КВФ} = F2[i]/F2[u].$$

Статистическую обработку данных проводили в программах Excel (Microsoft Office 2013) и Statistica Application 10 (StatSoft Inc.). Для сравнения параметров речи дикторов экспериментальной и контрольной групп использовали непараметрический непарный U -критерий Манна–Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В контрольной группе дикторов индивидуальные значения F0, характеризующие фонацию при норме слуха, находились в диапазоне 148–224 Гц. Результаты оценки значений F0, усредненные по трем гласным звукам в разных ударных позициях, для отдельных групп дикторов представлены в табл. 1.

Аналогичные расчеты были выполнены в экспериментальных группах с СНТ. Результаты представлены в табл. 2. Дикторы с диагностированной СНТ II степени имели F0 в диапазоне 163–238 Гц, с СНТ III степени — 157–220 Гц. Таким образом, диапазоны F0 в норме и при сенсоневральной тугоухости практически совпадали. В то же время отметим, что в обеих экспериментальных группах среднее значение F0 было заметно выше — на 25–30 Гц по сравнению с контролем. Сравнение групп с СНТ II и СНТ III степени с контролем по величине F0 показало отсутствие достоверных различий ($p_1 = 0.37$, $p_2 = 0.59$, здесь и далее непараметрический U -критерий Манна–Уитни, если не указано иного).

Достоверных различий по значениям F0 между двумя группами дикторов с СНТ обнаружено не было ($p = 1.00$, $n_1 = 7$; $n_2 = 5$). Это позволило объединить две груп-

Таблица 2. Частота основного тона голоса и расчетные спектральные характеристики гласных для пациентов женского пола с сенсоневральной тугоухостью II–III степени (экспериментальные группы)*

№	Степень потери слуха	F0, Гц	ПФТ, у.е.	КВФ	ФКЦ
1	II**	169	390189	2.90	0.92
2	II	232	259730	2.10	0.98
3	II	200	446958	2.03	0.98
4	II	238	620432	3.13	0.84
5	II	192	440905	2.87	0.79
6	II	201	378316	2.89	0.84
7	II	163	236534	2.93	0.93
СРЕДНЕЕ СНТ II		199 ± 28	396152 ± 128665	2.69 ± 0.44	0.90 ± 0.07
8	III***	209	349689	2.20	1.02
9	III	180	378878	2.73	0.87
10	III	203	395595	3.63	0.75
11	III	220	180423	1.68	1.15
12	III	157	439299	3.16	0.80
СРЕДНЕЕ СНТ III		194 ± 25	348777 ± 99544	2.68 ± 0.77	0.92 ± 0.16
СРЕДНЕЕ ПО СНТ II–III		197 ± 26	376412 ± 115014	2.69 ± 0.57	0.90 ± 0.11

* Обозначения те же, что в табл. 1;

** пациенты с СНТ II степени, не использующие слуховой аппарат;

*** пациенты с СНТ III степени, использующие слуховой аппарат в повседневной жизни.

пы для дальнейшего анализа. Отметим, что в объединенной экспериментальной группе были выявлены обладатели как достаточно низкого голоса (дикторы №№ 1, 7 и 12), так и более высокого (дикторы №№ 2, 4 и 11) и аналогичная ситуация выявлялась в группе нормы. Диапазон частоты основного тона голоса в группах СНТ и контроля составил 81 и 75 Гц соответственно. Достоверных статистических различий между контрольной и объединенной экспериментальной группами по величине F0 также не было обнаружено ($p = 0.58$, $n_1 = 12$; $n_2 = 12$). Таким образом, наблюдали ожидаемое, но статистически не значимое увеличение F0 в обеих группах с СНТ по сравнению с группой дикторов с нормальным слухом.

Помимо F0, были определены основные показатели артикуляции гласных звуков — F1 и F2, а также расчетные показатели, которые характеризуют централизацию гласных звуков на формантной плоскости F1–F2. Индивидуальные данные для двух экспериментальных групп дикторов (рис. 1a, 1b) и контрольной группы (рис. 1c) представлены на формантной плоскости F1–F2 в виде формантных треугольников, вершины которых образованы гласными звуками [a], [i], [u]. Причем для каждого гласного показано среднее значение по трем ударным позициям, что позволяло устранить влияние его интонирования при произнесении в начале, середине и конце слова.

Для всех трех групп дикторов была характерна высокая вариативность положений индивидуальных треугольников гласных звуков, на фоне которой особенности спектральных значений формант F1 и F2 гласных звуков для отдельных групп не обнаруживались. Вершины треугольников гласных звуков, построенных по средним данным для контрольной группы и дикторов с СНТ II и III степенями, демонстрируют их близкое расположение и сходную площадь (рис. 1d). Таким образом,

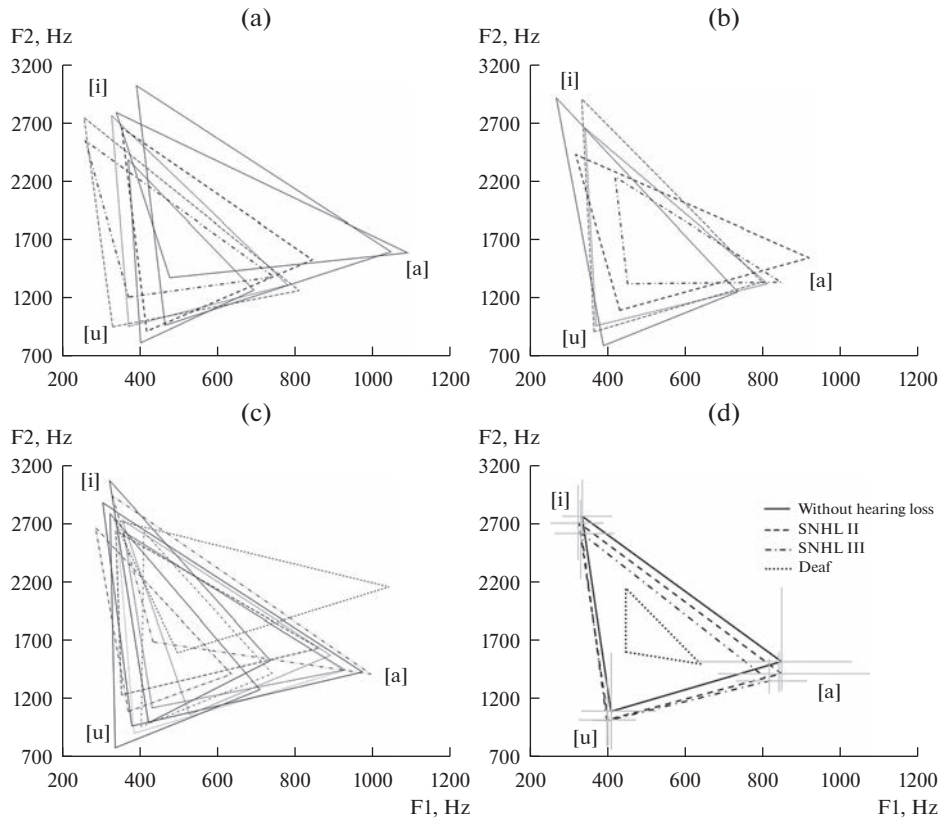


Рис. 1. Треугольники гласных звуков на плоскости формант F1–F2 для дикторов-женщин с нормальным слухом и с постлингвальной хронической сенсоневральной тугоухостью II и III степени. (a) – дикторы с СНТ II степени; (b) – дикторы с СНТ III степени; (c) – дикторы с нормальным слухом; (d) – средние данные, полученные для трех групп дикторов в нашей работе, и для долингвальных глухих дикторов по данным работы [24].

По оси абсцисс – форманта F1, Гц; по оси ординат – форманта F2, Гц.

На панелях рисунка (a–c) разными линиями показаны индивидуальные данные дикторов; (d) – тонкими горизонтальными и вертикальными линиями показаны диапазоны min–max формант F1 и F2.

положения вершин и размеры треугольников, построенных по средним данным, оказались сходны.

Значения F1 и F2 гласных звуков у дикторов с СНТ II и СНТ III степени статистически не различались (для [a] F1 $p = 1.00$, F2 $p = 0.62$; для [i] F1 $p = 1.00$, F2 $p = 0.74$; для [u] F1 $p = 0.74$; F2 $p = 1.00$, $n_1 = 7$, $n_2 = 5$). Это позволило объединить данные, полученные для двух групп дикторов с СНТ.

Для выявления нарушения артикуляции, обусловленного ухудшением слуховой обратной связи при речепродукции у пациентов с СНТ II–III степени, мы рассчитывали ряд показателей, которые характеризуют централизацию гласных звуков на формантной плоскости F1–F2. Одним из наиболее часто используемых является площадь формантных треугольников (ПФТ). Индивидуальные и усредненные по группам значения ПФТ в контрольной и экспериментальной группах представлены в табл. 1 и 2 соответственно. Вариабельность этого показателя оказалась высо-

кой как в контрольной, так и в экспериментальной группах. Минимальное и максимальное индивидуальные ПФТ различались внутри контрольной группы более чем в два раза: 280775 и 585099 у.е. соответственно, в то время как для объединенной экспериментальной группы – более чем в три раза: 180423 и 620432 у.е. соответственно. Достоверных различий между двумя этими группами по данному показателю не было выявлено ($p = 0.62$, $n = 12$).

Еще одним показателем возможной централизации гласных звуков является коэффициент вторых формант (КВФ), результаты расчетов которого приведены в табл. 1 и 2. В контрольной группе значения этого показателя варьировали в диапазоне от 1.71 до 3.58; в объединенной экспериментальной – от 1.68 до 3.63. Достоверных различий между группами не было выявлено ($p = 0.70$, $n = 12$).

Последний из расчетных показателей – формантный коэффициент централизации (ФКЦ), так же, как и КВФ представляет собой безразмерную величину. Этот коэффициент отличался наименьшей вариабельностью в обеих группах и по средним данным был близок к 1. Для контрольной и экспериментальной групп величина ФКЦ не различалась ($p = 0.54$). Все четыре рассчитанные нами показателя – F0, ПФТ, КВФ и ФКЦ, значительно варьировали от диктора к диктору, по средним данным имели близкие значения в контрольной и объединенной экспериментальной группах и достоверно не различались. Таким образом, спектральные показатели, характеризующие фонацию и артикуляцию, не различались в контрольной группе и в группе постлингвальной хронической сенсоневральной тугоухости II–III степени.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Хорошо известно, что пациенты с тяжелыми нарушениями слуха обычно демонстрируют изменение качества голоса и контроля работы мышц гортани. Это свидетельствует о неспособности регулировать напряжение голосовых связок и подсвязочное давление, т.е. процесс фонации [25]. Вместе с тем в литературе, посвященной речепродукции у людей с постлингвальной сенсоневральной потерей слуха, данные об изменениях частоты основного тона голоса (F0) неоднозначны [19, 26, 27]. Наши результаты показали отсутствие достоверных различий по этому показателю в экспериментальных и контрольной группах. Вместе с тем среднее значение F0 в обеих группах с СНТ II и III степени было на 30 и 25 Гц выше, чем в контрольной группе.

Полученный нами результат об отсутствии достоверных различий с группой нормы согласуется с выводами работ [26, 27], в которых исследовали гласный звук [а] у пациентов с СНТ без слухопротезирования. Заметим, что в исследовании [26] были обследованы женщины пожилого и старческого возраста, тогда как в работе [27] группы пациентов составляли и женщины, и мужчины преимущественно пожилого возраста. В еще одной работе [19] была исследована речь (гласные [а], [е], [и]) пациентов только мужского пола среднего возраста с СНТ III степени также без слухопротезирования, как и в двух упомянутых выше работах. Для этой группы с СНТ были обнаружены достоверные различия по величине F0 с группой нормы. Все четыре работы, включая нашу, различаются как подбором испытуемых, так и методологическими подходами (пол и возраст дикторов, наличие или отсутствие слухопротезирования, речевой материал).

Небольшой состав обследованных групп пациентов может также объяснить то обстоятельство, что в одних работах была выявлена лишь незначительная тенденция к увеличению F0 в группах с частичной потерей слуха по сравнению с контролем, тогда как в других исследованиях это изменение было оценено как достоверное. В цитируемых нами работах индивидуальные данные не были представлены.

Во всех трех обследованных нами группах — контроль, СНТ II и III степени, отмечена высокая индивидуальная вариабельность F0. Хорошо известно, что F0 указывает на длину, размер, напряжение и частоту вибрации голосовых связок и отражает резонансные характеристики надгортанного голосового тракта, связанные с артикуляцией и расположением языка [17]. Таким образом, на величину этого показателя влияет множество факторов, и отсутствие слуховой обратной связи является лишь одним из них. Возможно, именно случайный подбор мужских голосов в работе [19] привел к достоверным различиям с контрольной группой. Вместе с тем во всех четырех работах наблюдалась тенденция по средним данным F0 к увеличению при СНТ III степени по сравнению с нормой, что согласуется с повышением F0 при глубокой глухоте [5, 6].

В нашем исследовании участвовали пациенты двух экспериментальных групп. Первую составляли дикторы с СНТ II степени, при которой уровень остаточного слуха был достаточен для поддержания обратной связи и сохранения сформированных ранее речевых навыков. Дикторы с СНТ III степени постоянно носили слуховые аппараты, которые обеспечивали поддержание обратной связи. Для этой группы при речепродукции в эксперименте, во время которого пациенты не использовали слуховой аппарат, обратная связь была затруднена по сравнению с повседневной жизнью. Тем не менее, по средним данным величина F0 оказалась выше на 5 Гц (недостоверное увеличение) у группы с СНТ III степени по сравнению с пациентами с СНТ II степени, у которых ситуация говорения не отличалась от обычной практики. Таким образом, отсутствие обратной связи при сформированных (постлингвальная глухота) и поддерживаемых (слухопротезирование) навыках не приводило к существенному изменению показателя фонации.

Как было упомянуто во введении, нарушения слухоречевого контроля проявляются в централизации гласных на плоскости F1–F2 [24] (рис. 1d). Таким образом, можно было бы ожидать уменьшение ПФТ в экспериментальных группах с частичной потерей слуха по сравнению с контрольной группой. Однако по средним данным для женщин с СНТ II–III степени такое снижение области гласных ПФТ было незначительным — менее 5%. Эти изменения по сравнению с контрольной группой не являлись достоверными. Отметим, что ранее при долингвальной глухоте были неоднократно выполнены исследования, демонстрирующие выраженную централизацию гласных европейских языков, в результате которой область (треугольник) гласных при патологии оказывалась внутри области гласных нормы и размерами была значительно меньше последней [5, 6, 28]. В работе [5] эффект уменьшения площади формантных треугольников (ПФТ) был продемонстрирован для гласных звуков [e], [a], [o] немецкого языка для большой группы пациентов разного пола и возраста с глубокой потерей слуха. При этом значения F1 увеличивались в среднем на 60–80 Гц для всех трех изученных гласных звуков, а F2 — только для одного. В работе [28] по изучению гласных греческого языка ПФТ была сопоставлена с учетом пола пациентов, при этом анализ речи проводили у дикторов с глухотой (порог слуха >99 дБ для лучше слышащего уха) и с нормой слуха. Полученные данные свидетельствовали о том, что при глухоте площадь формантных треугольников уменьшалась примерно в 1.5 раза. Оценка ПФТ в работе [6] не выполнялась, но представленные авторами иллюстрации также свидетельствовали об уменьшении их размеров при глухоте.

В отличие от исследований речи при долингвальной потере слуха, оценка речевых изменений при постлингвальной СНТ выполнялась в ограниченном числе работ. Кроме того, эти немногочисленные работы характеризуются разными методологическими подходами с применением различных речевых материалов (включая языки разных групп, одиночные фонемы, спонтанную речь и т.д.), разных экспериментальных дизайнов и речевых показателей, часто с ограниченными группами

участников из различных возрастных диапазонов и с разной степенью и длительностью потери слуха. Это обстоятельство позволяет считать наше исследование существенным вкладом в оценку состояния речевой функции при СНТ, несмотря на выявленное отсутствие значимых изменений первых трех формант гласных звуков русской речи.

В поисках возможного критерия для оценки изменений спектральных характеристик речи пациентов с постлингвальной СНТ II–III степени мы применили еще два безразмерных показателя – формантный коэффициент централизации и коэффициент вторых формант, которые были предложены для оценки централизации гласных при речевых нарушениях [21–23]. Особенностью этих показателей является то, что они нивелируют изменения F1 и F2, связанные с разными F0 у разных дикторов. Эти показатели были успешно применены в группах детей с долингвальным снижением слуха от умеренного до тяжелого и глубокой глухоты [7]. В нашем исследовании у взрослых с постлингвальной СНТ эти показатели достоверно не отличались от таковых в группе с нормой слуха. Формантный коэффициент централизации оказался стабильной величиной, которая практически не изменялась ни в контрольной, ни в экспериментальных группах. Таким образом, несмотря на то, что повышение формантных частот при глухоте, в том числе постлингвальной, было неоднократно отмечено в работах разных авторов, нам не удалось в случае постлингвальной симметричной СНТ II–III степени выявить достоверные критерии спектральных изменений голоса. Ни по одному из четырех проанализированных показателей спектральных характеристик голоса мы не получили значимых различий в экспериментальной и контрольной группах. Спектральные характеристики голоса зависят от множества факторов, прежде всего от индивидуальных анатомических особенностей речевого тракта. По-видимому, индивидуальная вариабельность характеристик голоса оказывается велика для того, чтобы можно было обнаружить начальные изменения этих характеристик, которые могут быть обусловлены ухудшением слухоречевого контроля по типу обратной связи.

У здоровых дикторов нарушение слуховой обратной связи, а, следовательно, и контроля собственного голоса, происходит в маскирующем речь шуме [29, 30] и имеет сходный с потерей слуха характер изменений спектральных характеристик голоса. Значения F0 увеличиваются в зависимости от уровня шума на 5–40 Гц [13, 31], что согласуется с полученным по средним данным приростом F0 15–30 Гц при частичной потере слуха. В этих исследованиях было возможно парное сравнение при оценке изменений речи в условиях ухудшения контроля голоса, поэтому индивидуальные различия F0 не влияли на оценку эффекта.

Можно предположить, что изменения спектральных характеристик голоса одного и того же пациента с СНТ при разных условиях формирования слуховой обратной связи (при использовании слухового аппарата и без него) смогут дать полезную информацию об успешности слухопротезирования. Заметим, что F1 [13, 14] в условиях шума по сравнению с тишиной увеличивается, а F2 изменяется разнонаправленно [14]. При этом изменение площади области гласных звуков в шуме не носит однозначного характера: она увеличивалась относительно тишины в работе [14] и уменьшалась в работе [15]. Аналогично с работами, посвященными величине ПФТ при утрате слуха, такое расхождение результатов можно объяснить высокой индивидуальной вариативностью ПФТ и малым числом дикторов, принимавших участие в исследованиях.

Сопоставление спектральных характеристик голоса при различных условиях ухудшения обратной связи приводит к следующему заключению. Значения F0 связаны непосредственно с процессом фонации, то есть с работой голосовых связок. Звук, возникающий при фонации благодаря структуре верхнего голосового тракта и артикуляции, формирует формантную структуру гласных. Таким образом, изме-

нение значений F0 на фоне ухудшения контроля голоса дает наиболее прямое свидетельство о качестве речеобразования в моменте по сравнению с величинами формант и их производных, которые обусловлены в значительной мере моторным навыком на основе прямой слуховой связи [1, 2].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контроль собственного голоса диктором с диагностированной хронической сенсоневральной тугоухостью II–III степени может до определенной степени обеспечиваться сформированными ранее речевыми навыками (прямая связь), на что указывает отсутствие достоверных различий между показателями фонации и артикуляции экспериментальных и контрольной групп. Вместе с тем тенденция к росту F0 у пациентов с СНТ II–III степени по сравнению с нормально слышащими дикторами свидетельствует об ухудшении контроля голоса в режиме реального времени (обратная связь). Поэтому особый интерес представляет оценка изменений речи дикторов с СНТ при использовании слуховых аппаратов как средства восстановления слуховой обратной связи, и без них.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Все процедуры, выполненные в настоящем исследовании с участием людей, соответствовали требованиям Этического комитета Санкт-Петербургского городского гериатрического центра (Протокол № 9 от 14 октября 2021 г.), Этического комитета Института эволюционной физиологии и биохимии им. И.М. Сеченова и Хельсинкской декларации 1964 г. с ее последующими изменениями (Протокол № 3-02 от 26 февраля 2021 г.). Перед началом эксперимента каждый испытуемый подписывал информированное согласие.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа поддержана средствами государственного бюджета по госзаданию (тема № 075-00967-23-00).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией данной статьи.

ВКЛАД АВТОРОВ

Идея работы и планирование эксперимента (Л.Е.Г., И.Г.А., К.С.Ш.), подготовка методики (И.Г.А., А.П.Г.), сбор данных (К.С.Ш., А.М.Л.), обработка данных (К.С.Ш., А.М.Л.), написание и редактирование манускрипта (К.С.Ш., И.Г.А., А.М.Л., А.П.Г., Л.Е.Г.).

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Л.Г. Зайцевой за консультации при обработке речевого материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Selleck MA, Sataloff RT* (2014) The impact of the auditory system on phonation: a review. *J Voice* 28: 688–693.
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2014.03.018>
2. *Perkell JS* (2012) Movement goals and feedback and feedforward control mechanisms in speech production. *J Neurolinguistics* 25: 382–407.
<https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2010.02.011>

3. *Bolfan-Stosic N, Simunjak B* (2007) Effects of hearing loss on the voice in children. *J Otolaryngol* 36: 120–123.
<https://doi.org/10.2310/7070.2007.0009>
4. *Dehqan A, Scherer RC* (2011) Objective voice analysis of boys with profound hearing loss. *J Voice* 25: 61–65.
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2010.08.006>
5. *Schenk BS, Baumgartner WD, Hamzavi J-S* (2003) Effect of the loss of auditory feedback on segmental parameters of vowels of postlingually deafened speakers. *Auris Nasus Larynx* 30: 333–339.
[https://doi.org/10.1016/S0385-8146\(03\)00093-2](https://doi.org/10.1016/S0385-8146(03)00093-2)
6. *Subtelny JD, Whitehead RL, Samar VJ* (1992) Spectral study of deviant resonance in the speech of woman who are deaf. *J Speech Lang Hear Res* 35: 574–579.
<https://doi.org/10.1044/jshr.3503.574>
7. *Naderifar E, Ghorbani A, Moradi N, Ansari H* (2019) Use of formant centralization ratio for vowel impairment detection in normal hearing and different degrees of hearing impairment. *Logoped Phoniatr Vocol* 44: 159–165.
<https://doi.org/10.1080/14015439.2018.1545867>
8. *Hilger AI, Kim SJ, Lester-Smith R, Larson CR* (2019) Auditory feedback control of vocal intensity during speech and sustained-vowel production. *J Acoust Soc Am* 146: 3052
<https://doi.org/10.1121/1.5137580>
9. *Weerathunge HR, Voon T, Tardif M, Cilento D, Stepp CE* (2022) Auditory and somatosensory feedback mechanisms of laryngeal and articulatory speech motor control. *Exp Brain Res* 240: 2155–2173.
<https://doi.org/10.1007/s00221-022-06395-7>
10. *Luan Y, Wang C, Jiao Y, Tang T, Zhang J, Teng G-J* (2019) Dysconnectivity of multiple resting-state networks associated with higher-order functions in sensorineural hearing loss. *Front Neurosci* 13: 55.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2019.00055>
11. *Husain FT, Carpenter-Thompson JR, Schmidt SA* (2014) The effect of mild-to-moderate hearing loss on auditory and emotion processing networks. *Front Neurosci* 8: 10.
<https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00010>
12. *Coelho AC, Medved DM, Brasolotto AG* (2015) Hearing loss and the voice. *Update On Hearing Loss* 103–128.
<https://doi.org/10.5772/61217>
13. *Garnier M, Henrich N* (2014) Speaking in noise: How does the Lombard effect improve acoustic contrasts between speech and ambient noise? *Comput Speech & Language* 28: 580–597.
<https://doi.org/10.1016/j.csl.2013.07.005>
14. *Tang P, Rattanasone NX, Yuen I, Demuth K* (2017) Phonetic enhancement of Mandarin vowels and tones: Infant-directed speech and Lombard speech. *J Acoust Soc Am* 142: 493–503.
<https://doi.org/10.1121/1.4995998>
15. *Kawase S, Smith ML, Wright R* (2019) Exploring the Lombard Effect in first language Japanese speakers of English. *J Acoust Soc Am* 146: 2843–2843.
<https://doi.org/10.1121/1.5136861>
16. *Ляко ЕЕ, Григорьев АС* (2013) Динамика длительности и частотных характеристик гласных на протяжении первых семи лет жизни детей. *Рос физиол журн* 99: 1097–1110. [*Lyakso EE, Grigorev AS* (2013) Dynamics of duration and frequency characteristics the vowels over the first seven years of life of children. *Russ J Physiol* 99: 1097–1110. (In Russ)].
17. *Бондарко ЛВ* (1998) Фонетика современного русского языка. СПб. С-Петербург универ. [*Bondarko LV* (1998) Phonetics of the modern russian language. SPB. S-Peterburg Univer. (In Russ)].
18. *Nicolaidis K, Sfakianaki A* (2016) Acoustic characteristics of vowels produced by Greek intelligible speakers with profound hearing impairment I: Examination of vowel space. *Int J Speech-Lang Pathol* 18: 378–387.
<https://doi.org/10.3109/17549507.2015.1101155>
19. *Mora R, Crippa B, Cervoni E, Santomauro V, Guastini L* (2012) Acoustic features of voice in patients with severe hearing loss. *J Otolaryngol-Head & Neck Surg* 41: 8–13.
<https://doi.org/10.2310/7070.2011.110150>
20. *Vorperian H, Kent RD* (2007) Vowel acoustic space development in children: A synthesis of acoustic and anatomic data. *J Speech Lang Hear Res* 50: 1510–1545.
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2007/104\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2007/104))
21. *Sapir S, Ramig LO, Spielman JL, Fox C* (2010) Formant centralization ratio: a proposal for a new acoustic measure of dysarthric speech. *J Speech Lang Hear Res* 53: 114–125.
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2009/08-0184\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2009/08-0184))
22. *Sapir S, Spielman J, Ramig L, Story BH, Fox C* (2007) Effects of intensive voice treatment (the Lee Silverman Voice Treatment [LSVT]) on vowel articulation in dysarthric individuals with idiopathic Parkinson disease: acoustic and perceptual findings. *J Speech Lang Hear Res* 50: 899–

912.
[https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2007/064\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2007/064))
23. Moura C, Cunha L, Vilarinho H, Cunha MJ, Freitas D, Palha M, Pueschel S, Pais-Clemente M (2008) Voice parameters in children with Down syndrome. *J Voice* 22: 34–42.
<https://doi.org/10.1016/j.jvoice.2006.08.011>
 24. Leder SB, Spitzer JB (1993) Speaking fundamental frequency, intensity, and rate of adventitiously profoundly hearing-impaired adult women. *J Acoust Soc Am* 93: 2146–2151.
<https://doi.org/10.1121/1.406677>
 25. Langereis MC, Bosman AJ, van Olphen AF, Smoorenburg GF (1998) Effect of cochlear implantation on voice fundamental frequency in post-lingually deafened adults. *Audiology* 37: 219–230.
<https://doi.org/10.3109/00206099809072976>
 26. Baraldi GS, Almeida LC, Calais LL, Borges AC, Gielow I, Cunto MR (2007) Study of the fundamental frequency in elderly women with hearing loss. *Rev Bras Otorrinolaringol* 73: 378–383.
[https://doi.org/10.1016/S1808-8694\(15\)30082-3](https://doi.org/10.1016/S1808-8694(15)30082-3)
 27. Lee GS, Lin SH (2009) Changes of rhythm of vocal fundamental frequency in sensorineural hearing loss and in Parkinson's disease. *Chin J Physiol* 52: 446–450.
<https://doi.org/10.4077/CJP.2009.AMH074>
 28. Nicolaidis K, Sfakianaki A (2016) Acoustic characteristics of vowels produced by Greek intelligible speakers with profound hearing impairment I: Examination of vowel space. *Int J Speech-Lang Pathol* 18: 378–387.
<https://doi.org/10.3109/17549507.2015.1101155>
 29. Hotchkin C, Parks S (2013) The Lombard effect and other noise-induced vocal modifications: insight from mammalian communication systems. *Biol Rev* 88: 809–824.
<https://doi.org/10.1111/brv.12026>
 30. Luo J, Hage SR, Moss CF (2018) The Lombard effect: from acoustics to neural mechanisms. *Trends Neurosci* 41: 938–949.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2018.07.011>
 31. Kleczkowski P, Żak A, Król-Nowak A (2017) Lombard effect in Polish speech and its comparison in English speech. *Arch Acoust* 42: 561–569.
<https://doi.org/10.1515/aoa-2017-0060>

Spectral Characteristics of Cardinal Vowels as Indicators of the Auditory Speech Feedback Control in Patients with Moderate and Moderately Severe Chronic Postlingual Sensorineural Hearing Loss

K. S. Shtin^{a, *}, A. M. Lunichkin^a, A. P. Gvozdeva^a, L. E. Golovanova^b, and I. G. Andreeva^a

^a*Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia*

^b*North-Western Mechnikov State Medical University, St. Petersburg, Russia*

*e-mail: misery01@ya.ru

Chronic sensorineural hearing loss (SNHL) is characterized by an increase in hearing thresholds at basic speech frequencies, which implies the auditory speech feedback control worsening and, as a result, changes of speech characteristics. A hypothesis was tested that such worsening can manifest itself in an increase of F0, F1, F2 formants of speech vowel sounds in patients with moderate and moderately severe postlingual SNHL. Recordings of elicited speech were performed for young and middle age women (36–59 years): 7 women speakers with moderate SNHL who did not use hearing aids; 5 women speakers with moderately severe SNHL who were hearing aid users but were not using them during the recordings; a control group of 12 normally hearing women speakers. An assessment of F0, F1 and F2 of stressed vowels [a], [i], [u] and calculations of vowels' centralization indices – vowel space area, vowel formant centralization ratio and the second formant ratio (F2i/F2u), were performed. All the studied spectral indices in groups of patients with postlingual SNHL were similar to those in the control group, no statistically reliable differences were revealed.

Keywords: audiomotor control, feedback control, sensorineural hearing loss, vowel sounds characteristics, fundamental frequency