

Конюхов В. Н., Гаранин А. А., Колсанов А. В.

ФГБОУ ВО «Самарский государственный медицинский университет» Минздрава РФ, Самара, Россия

ПАРАМЕТРЫ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА КАК БИОМАРКЕРЫ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ С ХРОНИЧЕСКОЙ СЕРДЕЧНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ

Цель

Оценка изменения параметров речевого сигнала в процессе лечения у пациентов с хронической сердечной недостаточностью (ХСН) и оптимизация набора параметров речи, которые могут быть использованы для удаленного наблюдения за состоянием пациентов после лечения.

Материал и методы

Проведен анализ речевого сигнала 55 пациентов с ХСН в период обострения и 38 пациентов этой группы в период ремиссии по разработанной авторской методике. Результаты сравнивали с показателями речевого сигнала 57 практически здоровых лиц. Посредством программы Praat v 6.4.35 для трех групп вычисляли следующие акустические и просодические параметры: среднее, минимальное и максимальное значение частоты основного тона, его среднеквадратичное отклонение, диапазон изменения и средний абсолютный наклон, джиттеры (local, abs, rap, ppq5, ddp), шиммеры: (local, apq3, apq5, apq11, dda), отношение гармоники/шум, отношение количества озвученных кадров к общему количеству кадров.

Результаты

В исследовании проведено сравнение трех групп: пациентов до лечения (группа 1.1), после лечения (группа 1.2) и контрольной группы практически здоровых лиц (группа 2). Анализ параметров речевого сигнала показал, что у пациентов до лечения наблюдаются статистически значимые отличия от контрольных значений по ряду показателей, отражающих частотную и амплитудную нестабильность голоса. После курса терапии выявлено статистически значимое снижение показателя Jitter (local) ($p=0,012$), при этом его значения в группе 1.2 не отличались от значений в контрольной группе, что свидетельствует о нормализации частотной стабильности голосового сигнала. Показатель Bowley skew также демонстрирует статистически значимое увеличение ($p=0,041$) и приближается к значениям контрольной группы ($p=0,068$). Показатели Shimmer (dda) и Shimmer (apq3) не проявляют положительную динамику и сохраняют статистически значимые отличия от контрольных значений.

Заключение

Проведенные исследования показали, что в процессе лечения больных с ХСН по мере улучшения их состояния происходят статистически значимое уменьшение джиттера и увеличение непараметрического коэффициента асимметрии основного тона голоса, а также их приближение к значениям контрольной группы. Остальные показатели речи либо достоверно не менялись, либо не приближались к значениям контрольной группы. Этот факт может быть использован для удаленного наблюдения за состоянием больных с ХСН после выписки из стационара.

Ключевые слова

Хроническая сердечная недостаточность; спектральный анализ; речевой сигнал; джиттер; шиммер; акустические параметры

Для цитирования

Konyukhov V. N., Garanin A. A., Kolsanov A. V. Speech Signal Parameters as Biomarkers for Remote Monitoring of Patients with Chronic Heart Failure. Kardiologiya. 2025;65(12):20–27. [Russian: Конюхов В. Н., Гаранин А. А., Колсанов А. В. Параметры речевого сигнала как биомаркеры для дистанционного мониторинга состояния пациентов с хронической сердечной недостаточностью. Кардиология. 2025;65(12):20–27].

Автор для переписки

Гаранин Андрей Александрович. E-mail: sameagle@yandex.ru

Введение

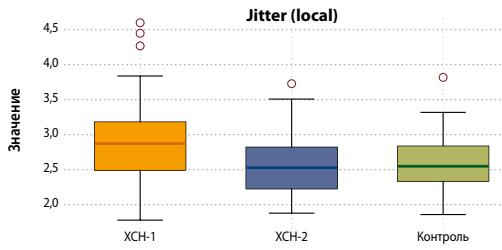
Распространенность синдрома хронической сердечной недостаточности (ХСН) в популяции в зависимости от возраста составляет 2–10% [1] и имеет тенденцию к увеличению [2]. Одна из основных задач кардиологии – наблюдение за пациентами с ХСН после выписки из стационара для предотвращения осложнений, снижения риска повторной госпитализации, смертности и улучшения качества жизни [3–6]. Наиболее остро вопрос мониторин-

га состояния пациентов с ХСН стоит в малых и удаленных населенных пунктах, где отсутствуют необходимые технические средства и наблюдается дефицит медицинского персонала. В этом случае приемлемым решением является использование телемедицинских технологий. В работе С. Н. Насоновой и соавт. [7] проведен анализ различных протоколов удаленного мониторинга, осуществляемый медицинским персоналом и проводящийся при помощи имплантированных устройств. Показано, что, несмотря

Центральная иллюстрация. Параметры речевого сигнала как биомаркеры для дистанционного мониторинга состояния пациентов с хронической сердечной недостаточностью

Цель: оценка изменений параметров речевого сигнала в процессе лечения больных с ХСН и оптимизация набора параметров речи, которые могут быть использованы для удаленного наблюдения за состоянием пациентов после лечения

Ключевые слова: хроническая сердечная недостаточность (ХСН), спектральный анализ, речевой сигнал, джиттер, шиммер, акустические параметры



Методология исследования

Анализ речевого сигнала и его сравнение у трех групп:

- Пациенты с ХСН до лечения (группа 1.1),
 - Пациенты с ХСН после лечения (группа 1.2),
 - Практически здоровые лица (группа 2).
- Вычислялись акустические и просодические параметры: среднее, минимальное и максимальное значение частоты основного тона, его среднеквадратичное отклонение, диапазон изменения и средний абсолютный наклон, джиттеры, шиммеры, отношение гармоники/шум, отношение количества озвученных кадров к общему количеству кадров.
- Статистическая значимость различий определена при $p < 0,05$

Заключение

В процессе лечения больных с ХСН, по мере улучшения их состояния, происходит статистически значимое уменьшение джиттера и увеличение непараметрического коэффициента асимметрии основного тона голоса, а также их приближение к значениям контрольной группы.

Этот факт может быть использован для удаленного наблюдения за состоянием больных с ХСН после выписки из стационара

Результаты

У пациентов до лечения наблюдаются достоверные отличия от контрольных значений по ряду показателей.

После курса терапии выявлено значимое снижение показателя Jitter (local) ($p=0,012$), при этом его значения в группе 1.2 не отличались от контрольной, что свидетельствует о нормализации частотной стабильности голосового сигнала.

Показатель Bowley skew также демонстрирует достоверное увеличение ($p=0,041$) и приближается к значениям контрольной группы ($p=0,068$).

Показатели Shimmer (dda) и Shimmer (apq3) не показывают положительной динамики и сохраняют достоверные отличия от контрольных значений

на неоднозначность результатов мониторинга по различным протоколам, разработка телемедицинских технологий может помочь в снижении частоты госпитализаций и смертности у больных с ХСН. В статье А.П. Потапова и соавт. [8] показано, что дистанционное наблюдение за состоянием пациентов с ХСН с измерением артериального давления и регистрацией электрокардиограммы в домашних условиях статистически значимо уменьшает потребность в госпитализациях. Выявлено преимущество дистанционного мониторинга перед регулярным наблюдением пациентов с ХСН по снижению сердечно-сосудистой смертности через 3 и 12 мес наблюдения [9].

Таким образом, дистанционный мониторинг позволяет существенно снизить число неблагоприятных исходов у пациентов с ХСН. Например, показано, что отношение шансов смерти от сердечно-сосудистых заболеваний через 3 мес составляет 2,73 при 95% доверительном интервале 1,1–7,39 ($p=0,042$) в пользу групп, у которых проводилось дистанционное наблюдение [9]. Однако, несмотря на преимущества, у существующих протоколов дистанционного наблюдения существуют недостатки, связанные с необходимостью использования специализированной аппаратуры в домашних условиях и субъективностью ответов на вопросы медицинского персонала. Преодолеть эти недостатки возможно путем разработки методов и методик с использованием недорогого, доступного и простого в использовании оборудования с возможностью автоматической передачи данных мониторинга в специализированные клинические центры.

Одним из таких подходов является метод, основанный на анализе параметров речевого сигнала, который не требует специализированного оборудования и может быть реализован на обычном смартфоне с соответствующим программным обеспечением.

Цель исследования

Оценка изменения параметров речевого сигнала в процессе лечения ХСН и оптимизация набора параметров речи, которые могут быть использованы для удаленного наблюдения за состоянием пациентов после лечения.

Материал и методы

В исследование были включены 55 пациентов с ХСН II–IV функционального класса (ФК) ишемической этиологии, поступившие в стационар в связи с острой декомпенсацией ХСН или острым коронарным синдромом. Всем обследуемым проводилась регистрация речевого сигнала при помощи пользовательских устройств (смартфона) в день госпитализации. Повторную регистрацию речевого сигнала осуществляли в последний день пребывания в стационаре при достижении ремиссии ХСН. По итогам наблюдения 17 пациентов выбыли из исследования по естественным причинам (смерть, ухудшение состояния, перевод в другие отделения/стационары для лечения коморбидных состояний, отказ от повторной регистрации речевого сигнала). Исходными для статистического анализа данными послужили записи голоса 38 пациентов с ХСН при поступлении (группа 1.1)

и 38 записей тех же пациентов после лечения в состоянии ремиссии в день выписки из стационара (группа 1.2). Диагноз устанавливал лечащий врач при поступлении пациента в стационар в соответствии с клиническими рекомендациями «Хроническая сердечная недостаточность» (2024). Группа пациентов с ХСН включала 21 мужчину (средний возраст $62 \pm 4,32$ года) и 17 женщин (средний возраст $70 \pm 4,74$ года). Контрольную группу (группа 2) составили практически здоровые 57 человек: 20 мужчин в возрасте $21,7 \pm 4,39$ года и 37 женщин в возрасте $22 \pm 5,58$ года.

Для сбора материала была разработана оригинальная методика: во всех группах испытуемым предлагалось прочитать отрывок фонетически представительного текста [10], а затем произвести счет от 1 до 30. Записи голоса всех трех групп были получены в клиниках Самарского государственного медицинского университета. Исследование одобрено Комитетом по биоэтике при ФГБОУ ВО «СамГМУ» Минздрава России (протокол № 300 от 25.02.2025 г.).

Критерии включения пациентов в исследование:

1. Возраст мужчин и женщин старше 18 лет.
2. Подписанное информированное согласие на участие в исследовании и согласие на обработку персональных данных.
3. Госпитализация по поводу инфаркта миокарда (不稳定ной стенокардии) или острой декомпенсации ХСН, при наличии симптомов ХСН, эквивалентных II–IV ФК или фракции выброса (ФВ) $<40\%$.

Процедура информирования проводилась при очном контакте врача-исследователя с пациентом; по итогам информирования пациент подписывал письменное согласие.

Критерии невключения пациентов в исследование:

1. Вероятные альтернативные заболевания, которые могут имитировать симптомы ХСН у пациента, такие как хроническое заболевание легких; первичная легочная гипертензия; хроническая обструктивная болезнь легких III–IV степени, нарушения бронхиальной проходимости.
2. Злокачественные новообразования, другие заболевания/отклонения или угрожающие жизни состояния, которые могут помешать участнику завершить исследование.
3. Злоупотребление алкоголем, наркотиками, психическое расстройство.
4. Беременность и лактация.
5. Отказ пациента подписать письменное информированное согласие на участие в исследовании.

В связи с тем, что группы 1.1. и 1.2 не различались по составу участников, они были сопоставимы по возрасту, полу, ФВ левого желудочка, ФК ХСН, результату теста с 6-минутной ходьбой, индексу массы тела, систолическо-

Таблица 1. Основные показатели в исследованных группах, полученные при поступлении и выписке пациентов из стационара

Показатель	Группа наблюдения		p
	группа 1.1	группа 1.2	
Возраст, годы	65,25 [60,99; 74,00]	65,25 [60,99; 74,00]	1,0
Мужчины, n (%)	21 (55)	21 (55)	1,0
ФВ ЛЖ, %	54 [46,75; 60]	55 [48; 62]	0,68
ИМТ, кг/м ²	28,6 [26; 33,45]	27 [24,03; 30,93]	0,08
Т6МХ, м	300 [251,25; 340]	350 [255; 400]	0,19
САД, мм рт. ст.	130 [120; 140]	125 [115; 130]	0,18
ДАД, мм рт. ст.	75 [70; 80]	74 [65; 80]	0,1
ЧСС, уд/мин	72,5 [69; 80]	66 [63; 73]	0,08

Данные представлены в виде медианы с указанием интерквартильного размаха [Q1; Q3], если не указано другое. ФВ ЛЖ – фракция выброса левого желудочка; ИМТ – индекс массы тела; Т6МХ – тест с 6-минутной ходьбой; САД – систолическое артериальное давление; ДАД – диастолическое артериальное давление; ЧСС – частота сердечных сокращений.

му и диастолическому артериальному давлению и частоте сердечных сокращений, наличию коморбидного фона: фибрилляция и трепетание предсердий, хроническая болезнь почек и сахарный диабет (табл. 1).

Частота дискретизации составила 48 кГц, средняя длительность записи – 60 с. Из аудиозаписей с помощью разработанного алгоритма выделяли вокализированные звуки и удаляли паузы. Дальнейшая работа проводилась как с исходными, так и с обработанными записями.

Для обработки записей и акустического анализа использовали программы Praat v 6.4.35 [11] и Whisper [12], модель medium.

С помощью программы Praat v 6.4.35 для трех групп вычисляли следующие акустические и просодические параметры: среднее значение частоты основного тона – ЧОТ (Mean pitch, Гц), минимальное и максимальное значение ЧОТ (Min pitch, Max pitch), среднеквадратичное отклонение ЧОТ (Std deviation), диапазон изменения ЧОТ (Pitch range), средний абсолютный наклон ЧОТ (Mean absolute slope), джиттеры: (Jitter (local), Jitter (abs), Jitter (rap), Jitter (ppq5), Jitter (ddp)), шиммеры: (Shimmer (local), Shimmer (apq3), Shimmer (apq5), Shimmer (apq11), Shimmer (dda)), отношение гармоники/шум (HNR mean), отношение количества озвученных кадров к общему количеству кадров (Voicing ratio). Систему автоматического распознавания речи Whisper использовали для оценки темпа речи (Speech_rate). Дополнительно были рассчитаны параметрические и непараметрические эксцессы (kurtosis, moors_kurtosis) и коэффициенты асимметрии (skewness, bowley_skew) ЧОТ. Для выбора набора параметров речи, которые разделяют группы 1.1 и 1.2, были рассчитаны F-критерий в ANOVA и взаимная информация (Mutual Information). Кроме того, по выбранным параметрам речи, наилучшим обра-

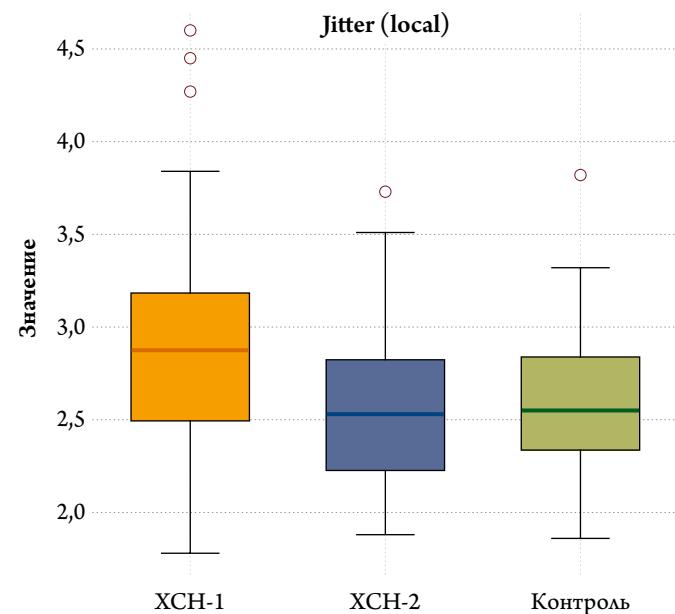
зом разделяющим группы 1.1 и 1.2, был построен классификатор «случайный лес».

Статистическую обработку полученных данных проводили в Python v.3.11.4 с использованием библиотек scipy.stats и Matlab R2019b. На первом этапе по критериям Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилкса проверяли соответствие распределения параметров нормальному закону. Установлено, что условие нормальности в большинстве случаев не выполняется. С учетом этого вычислены медианы для показателей и определены доверительные интервалы по перцентилям [2,5; 97,5] бутстреп-методом и интерквартильный размах. Для тестирования гипотез о различии групп 1.1 и 1.2 использовали парный критерий Вилкоксона, а для сравнения групп пациентов и контрольной группы – тест Манна–Уитни. Уровень значимости для проверки гипотез принимали равным 0,05.

Результаты

Анализ параметров речевого сигнала показал, что у пациентов до лечения наблюдаются статистически значимые отличия от контрольных значений по ряду показателей, отражающих частотную и амплитудную нестабильность голоса. После курса терапии и достижения ремиссии ХСН выявлено статистически значимое снижение показателя Jitter (local) ($p=0,012$), при этом его значения в группе 1.2 не отличались от таковых в контрольной, что свидетельствует о нормализации частотной стабильности голосового сигнала (рис. 1). Показатель

Рисунок 1. Диаграммы размаха Jitter (local) для трех групп



XCH-1 – группа 1.1 ($p=0,012$); XCH-2 – группа 1.2 ($p=0,09$); Контроль – группа 2.

Bowley skew также демонстрирует статистически значимое увеличение ($p=0,041$) и приближается к значениям контрольной группы ($p=0,068$).

Медианные значения показателей для трех групп приведены в таблице 2. Доверительные интервалы получены для $p<0,05$.

Таблица 2. Значения медианы, доверительные интервалы параметров речевого сигнала, полученные при анализе исходных файлов, и значимость различий между группами

Показатель	Группа			p		
	1.1 (n=38)	1.2 (n=38)	2 (n=57)	группа 1.1 / группа 1.2	группа 1.1 / группа 2	группа 1.2 / группа 2
Mean pitch, Гц	132,45 [131,26; 154,52]	138,6 [134,6; 155,4]	211,61 [189,6; 212,8]	0,34	0,001**	0,001**
Min pitch, Гц	73,06 [70,44; 73,69]	72,6 [69,98; 73,98]	76,71 [78,0; 84,5]	0,98	0,001**	0,001**
Max pitch, Гц	593,03 [70,4; 73,69]	569,91 [519,9; 581]	563,7 [509,33; 572,4]	0,94	0,41	0,59
Std deviation, Гц	41,34 [38,18; 49,58]	39,52 [36,48; 47,54]	45,20 [45,5; 60,7]	0,61	0,16	0,051
Pitch range, Гц	518,7 [465,4; 513,4]	517,4 [446,6; 510,5]	490,6 [426,8; 491,5]	0,92	0,09	0,15
Jitter (local), %	2,92 [2,75; 3,18]	2,58 [2,53; 2,86]	2,60 [2,51; 2,81]	0,012*	0,09	0,86
Jitter (abs), мс	0,2 [0,19; 0,25]	0,18 [0,18; 0,22]	0,13 [0,13; 0,15]	0,084	0,001**	0,001**
Jitter (rap), %	1,26 [1,22; 1,51]	1,25 [1,18; 1,37]	1,26 [1,21; 1,38]	0,32	0,89	0,73
Jitter (ppq5), %	1,36 [1,30; 1,55]	1,34 [1,28; 1,47]	1,41 [1,35; 1,52]	0,66	0,72	0,4
Jitter (ddp), %	3,79 [3,66; 4,55]	3,75 [3,52; 4,11]	3,78 [3,64; 4,13]	0,36	0,087	0,74
Shimmer (local), %	0,12 [0,12; 0,13]	0,13 [0,12; 0,13]	0,13 [0,12; 0,13]	0,66	0,99	0,079
Shimmer (apq ³), %	0,05 [0,5; 0,6]	0,06 [0,05; 0,06]	0,05 [0,05; 0,06]	0,35	0,58	0,096
Shimmer (apq5), %	0,07 [0,7; 0,8]	0,06 [0,05; 0,06]	0,06 [0,07; 0,08]	0,058	0,90	0,27
Shimmer (apq11), %	0,12 [0,12; 0,13]	0,13 [0,13; 0,14]	0,13 [0,12; 0,14]	0,11	0,24	0,98
Shimmer (dda), %	0,15 [0,14; 0,17]	0,17 [0,16; 0,18]	0,14 [0,14; 0,16]	0,042*	0,56	0,001**
HNR mean, дБ	11,17 [9,89; 11,66]	11,39 [11,01; 12,22]	12,34 [11,27; 12,63]	0,11	0,075	0,014**
Voicing ratio, %	47,87 [44,29; 50,19]	51,05 [46,74; 51,62]	50,52 [47,76; 53,05]	0,19	0,41	0,26
Bowley skew	0,12 [0,09; 0,17]	0,16 [0,11; 0,19]	0,22 [0,22; 0,32]	0,041*	0,001**	0,068

* – статистически значимые отличия в группах с ХСН до и после лечения; ** – статистически значимые различия между пациентами с ХСН и практически здоровыми людьми.

Таблица 3. Значения медианы и доверительные интервалы параметров речевого сигнала, полученные из фрагментов вокализированных звуков, и значимость различий между группами

Показатель	Группа			p		
	1.1 (n=38)	1.2 (n=38)	2 (n=57)	группа 1.1 / группа 1.2	группа 1.1 / группа 2	группа 1.2 / группа 2
Mean pitch, Гц	130,78 [130,29; 159,43]	134,77 [130,55; 153,64]	190,11 [179,57; 202,33]	0,92	0,001**	0,001**
Min pitch, Гц	98,88 [93,17; 111,33]	101,66 [97,02; 115,41]	170,34 [137,86; 181,74]	0,64	0,001**	0,001**
Max pitch, Гц	207,25 [188,67; 264,71]	201,59 [191,44; 276,42]	251,63 [241,28; 362,08]	0,11	0,001**	0,001**
Std deviation, Гц	28,85 [19,94; 47,71]	17,64 [18,12; 37,22]	29,80 [25,05; 43,18]	0,10	0,45	0,08
Pitch range, Гц	87,92 [87,82; 160,9]	98,68 [84,80; 171,69]	156,31 [122,14; 201,83]	0,09	0,28	0,09
Jitter (local), %	2,88 [2,82; 3,42]	2,68 [2,37; 2,94]	2,58 [2,48; 2,83]	0,0047*	0,018**	0,48
Jitter (abs), мс	0,19 [0,18; 0,24]	0,17 [0,17; 0,23]	0,14 [0,13; 0,17]	0,59	0,002**	0,025**
Jitter (rap), %	1,24 [1,19; 1,51]	1,28 [1,11; 1,47]	1,28 [1,21; 1,43]	0,25	0,87	0,27
Jitter (ppq5), %	1,26 [1,21; 1,50]	1,41 [1,25; 1,43]	1,46 [1,35; 1,58]	0,84	0,43	0,39
Jitter (ddp), %	3,71 [3,56; 4,54]	3,84 [3,33; 4,41]	3,83 [3,63; 4,28]	0,27	0,89	0,28
Shimmer (local), %	0,11 [0,11; 0,12]	0,12 [0,11; 0,14]	0,11 [0,11; 0,13]	0,87	0,77	0,95
Shimmer (apq ³), %	0,05 [0,05; 0,06]	0,05 [0,05; 0,06]	0,05 [0,05; 0,05]	0,53	0,64	0,33
Shimmer (apq5), %	0,07 [0,06; 0,07]	0,07 [0,07; 0,08]	0,06 [0,06; 0,08]	0,51	0,43	0,95
Shimmer (apq11), %	0,11 [0,10; 0,13]	0,10 [0,10; 0,13]	0,10 [0,09; 0,11]	0,42	0,89	0,49
Shimmer (dda), %	0,14 [0,14; 0,17]	0,16 [0,15; 0,19]	0,14 [0,14; 0,16]	0,36	0,86	0,36
HNR mean, дБ	8,89 [8,24; 9,86]	10,00 [9,32; 11,02]	9,95 [9,08; 10,19]	0,025*	0,62	0,26
Bowley_skew	0,19 [0,01; 0,024]	0,09 [0,00; 0,18]	0,12 [0,05; 0,17]	0,27	0,59	0,044**

* – статистически значимые отличия в группах с XCH до и после лечения; ** – статистически значимые различия между пациентами с XCH и практически здоровыми людьми.

Кроме того, статистически значимо изменялись значения Shimmer (dda). Однако следует учесть, что медиана параметра Shimmer (dda) увеличивалась, в то время как для контрольной группы медиана меньше, чем у группы 1.1. Для остальных параметров изменения были статистически незначимыми.

Ожидаемо статистически значимо изменились значения ряда показателей в группах пациентов с XCH по отношению к контролю. Для групп 1.1 и 1.2 статистически значимо повысились по отношению к группе контроля следующие показатели: Mean pitch (p=0,001), Min pitch

(p=0,001) и снизился Jitter (abs) (p=0,001). Дополнительно получены статистически значимые различия по параметру HNR mean в группе 1.2 и контрольной группе (p=0,014).

Аналогичные исследования проведены с фрагментами, состоящими из вокализированных звуков, выделенных из исходных записей (табл. 3).

По аналогии с таблицей 2 были рассчитаны различия показателей между группами 1.1 и 1.2. Статистически значимые различия установлены для параметров Jitter (local) (p=0,0047) и HNR mean (p=0,025). В то же

Рисунок 2. Ранжирование признаков по F-критерию в ANOVA и Mutual Information

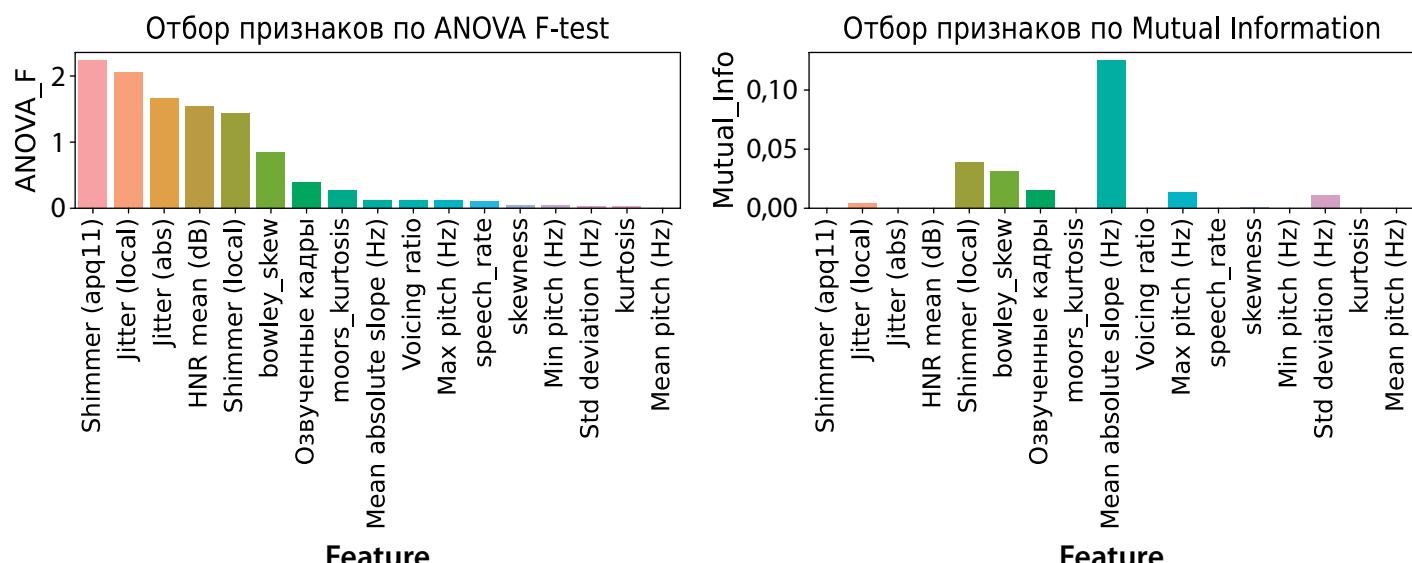


Таблица 4. Отобранные по двум критериям параметры речи

Признак	ANOVA_F	Mutual_Info	Важность (по обеим метрикам)
Jitter (local)	Высокая (2.05)	Есть (0.0128)	Лучший компромисс
Shimmer (local)	Средняя (1.44)	Лучшая (0.0405)	Информативен, но хуже по ANOVA
bowley_skew	Низкая (0.85)	Хорошая (0.0315)	Нелинейная связь
Shimmer (apq11)	Высшая (2.24)	0.0	Только линейная связь

Таблица 5. Результаты тестирования классификатора «случайный лес»

Класс	Точность	Полнота	F1-мера
XCH-1	0,86	0,75	0,80
XCH-2	0,78	0,88	0,82

XCH – хроническая сердечная недостаточность.

время исчезла статистическая значимость различий между группами по параметру Bowley_skew ($p=0,27$). Для Jitter (local) уровень статистической значимости увеличился по сравнению с исходными записями. Однако необходимо учитывать, что выделенные вокализованные звуки имели незначительную длительность, в среднем 200 мс, а это не позволяет, в частности, надежно оценить Jitter (local). Использование тестов с продолжительными гласными позволяет повысить достоверность оценки параметров [13].

По аналогии с исходными значениями получены статистически значимые различия параметров Mean pitch, Min pitch и Max pitch в группах пациентов с XCH по сравнению с контролем ($p=0,001$ во всех случаях). Дополнительной находкой стало снижение параметров Jitter (local) и Jitter (abs) в группе 1.1 по сравнению с контрольной группой ($p=0,018$ и $0,002$, соответственно). Кроме того, показатель Bowley_skew снижался в группе 1.2 по отношению к контрольной группе ($p=0,044$).

Результаты отбора признаков и выбора признаков по ANOVA F-критерию и Mutual Information, разделяющих группы 1.1 и 1.2, представлены на рисунке 2.

Суммарные результаты по выбору параметров приведены в таблице 4.

Для трех выбранных параметров Shimmer (apq11), Jitter (local), bowley_skew был построен классификатор «случайный лес» (random forest). Точность на обучении – 0,95, на тесте – 0,812, AUC – 0,828 Результаты по классам приведены в таблице 5.

Обсуждение

После лечения отмечается статистически значимое снижение показателя Jitter (local), что свидетельствует о повышении регулярности колебаний голосовых скла-

док. При этом значения данного показателя после терапии не отличаются от контрольных, указывая на нормализацию частотной стабильности фонации. Показатель Bowley skew также статистически значимо увеличивается и приближается к значениям контрольной группы. Параметр Shimmer (dda), несмотря на достоверные изменения, не демонстрирует улучшений, и сохраняет отличия от нормы. Исследование вокализованных звуков, выделенных из речи, показало, что для Jitter (local) наблюдается повышение статистической значимости эффекта. Остальные показатели речи либо статистически значимо не менялись, либо не приближались к значениям контрольной группы. Этот факт может быть использован для удаленного наблюдения за состоянием больных с XCH после выписки из стационара.

Существуют различные предположения, обосновывающие влияние XCH на параметры речи. Основным, и наиболее очевидным, является задержка жидкости в тканях организма, которая приводит к изменению вязкости в голосовых связках [14]. Поскольку величина отека, необходимая для заметного изменения голоса, невелика по сравнению с величиной, необходимой для увеличения массы тела, мониторинг голоса может позволить обнаружить и отследить отек, связанный с XCH, на более ранней стадии [15]. В работе Е. Maor и соавт. [16] выдвинута гипотеза о том, что блуждающий нерв, который играет важную роль в процессе формирования речи и автономного контроля функции сердца, может быть ключевым звеном в связи между XCH и голосом. В статье K. R. Mittapalle и соавт. [17] рассмотрены вопросы акустических и физиологических особенностей голосообразования у пациентов с XCH. Выявлены отклонения в динамике воздушного потока, которые могут указывать на дыхательные нарушения, возникающие вследствие сердечной недостаточности. Все это указывает на возможность использования параметров речи как биомаркеров XCH.

В настоящее время известен ряд работ, в которых различные показатели, построенные на анализе речи, использовались для оценки вероятности смерти, госпитализации, скопления жидкости в легких при декомпенсированной XCH. Так, в статье Е. Maor и соавт. [16] оценивали вероятность смерти в течение двадцати 20 мес и время первой госпитализации у групп больных с четырьмя сопутствующими заболеваниями. Для анализа использовались мел-частотные кепстральные коэффициенты, частота первой форманты, джиттер, шиммер, громкость и ряд других параметров. Всего использовалось 223 акустических признака. Показано, что голосовые характеристики связаны с неблагоприятным исходом у пациентов с XCH. В работах О.М. Murton и соавт. [15] и О. Amir и соавт. [18] исследовалась связь между отеком легких при XCH и параметрами речи, в качестве

которых использовались описательные статистики речи, например, среднее значение и стандартное отклонение основной частоты голоса. Было установлено, что наблюдаются значимые изменения у пациентов с отеком легких при ХСН. В статье M. K. Reddy и соавт. [19] рассматривался вопрос о возможности автоматического обнаружения сердечной недостаточности посредством анализа речи. Авторы использовали четыре алгоритма машинного обучения для классификации пациентов с ХСН и без нее. Максимальная достигнутая точность классификации составила 95% нейронной сетью прямого распространения при отношении сигнал/шум 30 дБ. Разрабатываются также приложения для смартфона, использующие признаки голоса для оценки состояния больных с ХСН. Так, описан опыт применения программы, которая анализировала ежедневные голосовые записи и выявляла изменения, связанные с накоплением жидкости в легких [20]. Исследование показало, что приложение способно прогнозировать ухудшение состояния пациентов с ХСН примерно за 3 нед до необходимости госпитализации.

Проведенный анализ показал, что использование параметров речи для дистанционного мониторинга состояния больных с ХСН позволяет организовать доступную непрерывную процедуру наблюдения, которая позволит на ранних стадиях выявлять ухудшение состояния пациента. Однако в литературе отсутствуют данные аналогичных исследований по русскоговорящим пациентам. Кроме того, авторы либо не раскрывают, как именно рассчитываются показатели для анализа голоса [18, 20], либо используют слишком большое число признаков [16], что требует большого объема выборки для построения классификатора.

Остается также открытым вопрос о необходимости и способе предобработки записей голоса. Для статистик лучшие результаты получились на исходных записях, а для джиттера и шиммера – для записей с выделенными вокализированными звуками и удаленными паузами.

Тем не менее, учитывая потенциальные преимущества мониторинга состояния пациентов с ХСН по па-

метрам голоса, а именно, неинвазивность, доступность, оперативность, возможность непрерывного мониторинга и ранней диагностики, представляется перспективным проведение работ в этом направлении.

Заключение

Наибольшую чувствительность к эффекту лечения у пациентов с хронической сердечной недостаточностью проявляют показатели акустического анализа голоса, характеризующие временную структуру сигнала, а именно Jitter (local) и Bowley skew. Этот факт может быть использован для удаленного наблюдения за состоянием больных после выписки из стационара. Дополнительно может быть построен классификатор, оценивающий вероятность ухудшения состояния пациента. Такой мониторинг не требует специализированного оборудования, квалифицированных специалистов и позволяет помимо субъективных ощущений пациента использовать дополнительный объективный критерий для решения о направлении на углубленное обследование. Кроме того, полученные данные о динамике характеристик голоса во время лечения дают возможность определить наиболее подходящий набор признакового пространства для конкретного человека, персонализировать подход к наблюдению, что позволит повысить эффективность мониторинга.

Учитывая значительное и статистически значимое изменение параметров акустического сигнала: увеличение Mean pitch, Min pitch и Max pitch и снижение Jitter (abs) в группах пациентов с хронической сердечной недостаточностью по отношению к контрольной группе, можно рассматривать в перспективе указанные голосовые биомаркеры как инструмент скрининга и ранней диагностики хронической сердечной недостаточности, а также отбора пациентов для углубленного обследования.

Конфликт интересов не заявлен.

Статья поступила 08.09.2025

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Metra M, Teerlink JR. Heart failure. *The Lancet*. 2017;390(10106):1981–95. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)31071-1
2. Savarese G, Lund LH. Global Public Health Burden of Heart Failure. *Cardiac Failure Review*. 2017;3(1):7–11. DOI: 10.15420/cfr.2016.25.2
3. Drapkina O.M., Boytsov S.A., Ageev F.T., Blankova Z.N., Dzhioeva O.N., Drozdova L.Yu. et al. Outpatient follow-up of patients with chronic heart failure by a general practitioner in primary health care. *Guidelines*. *Primary Health Care*. 2025;2(1):53–114. [Russian: Драпкина О.М., Бойцов С.А., Агеев Ф.Т., Бланкова З.Н., Джиоева О.Н., Дроздова Л.Ю. и др. Диспансерное наблюдение пациентов с хронической сердечной недостаточностью врачом-терапевтом в первичном звене здравоохранения. Методические рекомендации. Первичная медико-санитарная помощь. 2025;2(1):53–114]. DOI: 10.15829/3034-4123-2025-39
4. Pandor A, Gomersall T, Stevens JW, Wang J, Al-Mohammad A, Bakhai A et al. Remote monitoring after recent hospital discharge in patients with heart failure: a systematic review and network meta-analysis. *Heart*. 2013;99(23):1717–26. DOI: 10.1136/heartjnl-2013-303811
5. Ong MK, Romano PS, Edgington S, Aronow HU, Auerbach AD, Black JT et al. Effectiveness of Remote Patient Monitoring After Discharge of Hospitalized Patients With Heart Failure: The Better Effectiveness After Transition–Heart Failure (BEAT-HF) Randomized Clinical Trial. *JAMA Internal Medicine*. 2016;176(3):310–8. DOI: 10.1001/jamainternmed.2015.7712
6. Morken IM, Storm M, Søreide JA, Urstad KH, Karlsen B, Husebø AML. Posthospitalization Follow-Up of Patients With Heart Failure Using eHealth Solutions: Restricted Systematic Review. *Jour-*

- nal of Medical Internet Research. 2022;24(2):e32946. DOI: 10.2196/32946
7. Nasonova S.N., Lapteva A.E., Zhirov I.V., Tereshchenko S.N., Boytsov S.A. Remote monitoring of patients with heart failure in real clinical practice. *Kardiologiya*. 2021;61(8):76–86. [Russian: Насонова С.Н., Лаптева А.Е., Жиров И.В., Терещенко С.Н., Бойцов С.А. Дистанционный мониторинг пациентов с сердечной недостаточностью в реальной клинической практике. *Кардиология*. 2021;61(8):76–86]. DOI: 10.18087/cardio.2021.8.n1683]
 8. Potapov A.P., Yartsev S.E., Lagutova E.A. Remote monitoring of patients with chronic heart failure using blood pressure telemonitoring and ECG. *Russian Journal of Telemedicine and E-Health*. 2021;7(3):42–51. [Russian: Потапов А.П., Ярцев С.Е., Алагутова Е.А. Дистанционное наблюдение за пациентами с хронической сердечной недостаточностью с применением телемониторинга АД и ЭКГ. *Российский журнал телемедицины и электронного здравоохранения*. 2021;7(3):42–51]. DOI: 10.29188/2712-9217-2021-7-3-42-51]
 9. Isaeva A.V., Demkina A.E., Vladzimyrskyy A.V., Zingerman B.V., Korobeynikova A.N., Bykov A.N. et al. Remote monitoring of patients with chronic heart failure: A prospective randomized study. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):203–18. [Russian: Исаева А.В., Демкина А.Е., Владзимирский А.В., Зингерман Б.В., Коробейникова А.Н., Быков А.Н. и др. Телемедицинский мониторинг пациентов с хронической сердечной недостаточностью: проспективное рандомизированное исследование. *Digital Diagnostics*. 2024;5(2):203–18]. DOI: 10.17816/DDS68897]
 10. Bondarko L.V., Stepanova S.B. The text module “Phonetically representative text”. *Bulletin of the phonetic Fund of the Russian language*. 1992;4:132–4. [Russian: Бондарко Л.В., Степанова С.Б. Текстовый модуль «Фонетически представительный текст». *Бюллетень фонетического фонда русского языка*. 1992;4:132–4]
 11. Voice. Praat's voice analysis methods. [Internet] Available at: <https://www.fon.hum.uva.nl/praat/manual/Voice.html>
 12. Radford A, Kim JW, Xu T, Brockman G, McLeavey C, Sutskever I. Robust Speech Recognition via Large-Scale Weak Supervision. Av. at: <https://cdn.openai.com/papers/whisper.pdf>.
 13. Dubbioso R, Spisto M, Verde L, Iuzzolino VV, Senerchia G, Salvatore E et al. Voice signals database of ALS patients with different dysarthria severity and healthy controls. *Scientific Data*. 2024;11(1):800. DOI: 10.1038/s41597-024-03597-2
 14. Sivasankar M, Fisher KV. Vocal Fold Epithelial Response to Luminal Osmotic Perturbation. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*. 2007;50(4):886–98. DOI: 10.1044/1092-4388(2007/063)
 15. Murton OM, Hillman RE, Mehta DD, Semigran M, Daher M, Cunningham T et al. Acoustic speech analysis of patients with decompensated heart failure: A pilot study. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2017;142(4):EL401–7. DOI: 10.1121/1.5007092
 16. Maor E, Perry D, Mevorach D, Taiblum N, Luz Y, Mazin I et al. Vocal Biomarker Is Associated With Hospitalization and Mortality Among Heart Failure Patients. *Journal of the American Heart Association*. 2020;9(7):e013359. DOI: 10.1161/JAHA.119.013359
 17. Mittapalle KR, Pohjalainen H, Helkkula P, Kaitue K, Minkkinen M, Tolppanen H et al. Glottal flow characteristics in vowels produced by speakers with heart failure. *Speech Communication*. 2022;137:35–43. DOI: 10.1016/j.specom.2021.12.001
 18. Amir O, Abraham WT, Azzam ZS, Berger G, Anker SD, Pinney SP et al. Remote Speech Analysis in the Evaluation of Hospitalized Patients With Acute Decompensated Heart Failure. *JACC: Heart Failure*. 2022;10(1):41–9. DOI: 10.1016/j.jchf.2021.08.008
 19. Reddy KM, Helkkula P, Keerthana MY, Kaitue K, Minkkinen M, Tolppanen H et al. The automatic detection of heart failure using speech signals. *Computer Speech & Language*. 2021;69(3):101205. DOI: 10.1016/j.csl.2021.101205
 20. European Society of Cardiology. Speech analysis app predicts worsening heart failure before symptom onset. [Internet] Available at: <https://medicalxpress.com/news/2022-05-speech-analysis-app-worsening-heart.html>