

УДК 534.7+612.21

ШУМЫ ДЫХАНИЯ ЧЕЛОВЕКА: ОБЪЕКТИВИЗАЦИЯ АУСКУЛЬТАТИВНЫХ ПРИЗНАКОВ

И. В. ВОВК*, В. Т. ГРИНЧЕНКО*, С. Л. ДАХНОВ**,
В. В. КРИЖАНОВСКИЙ*, В. Н. ОЛИЙНЫК*

* Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

** Главный военный клинический госпиталь Министерства обороны Украины

Получено 10.08.99

Представлен ретроспективный обзор методов, использовавшихся для объективизации аускультативных признаков шумов дыхания человека за последнее двадцатилетие. Изложены современные взгляды на природу шумов дыхания и систематизированы литературные данные о возможных причинах возникновения основных и дополнительных шумов дыхания. На базе использования спектрально-временных методов анализа и визуального представления сложных звуковых сигналов продемонстрированы возможности объективизации ряда аускультативных признаков. Предпринята попытка классификации разных типов сухих хрипов по характеру их спектральных составляющих.

Представлено ретроспективний огляд методів, що використовувались для об'єктивізації аускультативних ознак шумів дихання людини за останнє двадцятиріччя. Викладено сучасні погляди на природу шумів дихання та систематизовано літературні дані про можливі причини виникнення основних і додаткових шумів дихання. На базі використання спектрально-часових методів аналізу та візуального представлення складних звукових сигналів продемонстровано можливості об'єктивізації ряду аускультативних ознак. Зроблено спробу класифікації різних типів сухих хрипів за характером їхніх спектральних складових.

The retrospective review is presented concerning the techniques utilized for objectivization of auscultatory tags of the breath noise in the last two decades. The modern views on a nature of the breath noise are enunciated, and literary data on the possible reasons of origins of basic and padding respiratory sounds are systematized. On basis of use of a spectral-time technique of analysis and visual representation of composite sound signals the opportunities of objectivization are demonstrated for a number auscultatory tags. There was made an attempt to classify the different types of wheezes by character of their spectral components.

ВВЕДЕНИЕ

Прослушивание (аускультация) шумов дыхания при исследовании больного вот уже более ста лет остается неизменным фундаментом диагностики респираторных заболеваний. При этом практически неизменными продолжают оставаться как сама методика прослушивания шумов с помощью традиционного механического стетофонендоскопа, так и способ их классификации, основанный на оценке аускультативных признаков врачом-диагностом [1, 2]. Между тем, характер дыхательных шумов достаточно сложен и разнообразен. Поэтому неудивительно, что аускультативная семиотика изобилует такими эпитетами, как жесткое дыхание, хрипы гудящие, жужжащие, свистящие, крупнопузырчатые, мелкопузырчатые и т. п. Очевидно, что при подобной классификации затруднительно напрямую поставить в соответствие каждому из приведенных описаний какие-либо объективные информационно значимые количественные характеристики. В табл. 1, 2, заимствованных из Большой медицинской энциклопедии [2], дана принятая в отечественной медицине классификация дыхательных шумов. Здесь

же приведены аускультативные признаки (по-сути вербальные¹ модели [3]) шумов, а также сведения (факты и гипотезы) о физической природе и морфологической основе возникновения тех или иных дыхательных шумов. В данном исследовании мы не будем подробно рассматривать собственно диагностические аспекты аускультации, поэтому из таблиц исключены графы, характеризующие состояния пациента, в которых прослушивается каждый из перечисленных типов шумов дыхания.

Очевидно, что кроме отсутствия четких количественных критериев, в существующих исторически сложившихся вербальных моделях дыхательных шумов изначально заложена значительная доля субъективизма. Дело в том, что чувствительность (порог слышимости) человеческого уха и способность его различать звук по громкости и частоте существенно колеблется от индивида к индивиду [4]. Кроме того, особенности слуха таковы, что звуки высокой частоты субъективно кажутся гораздо громче, чем низкочастотные при одинаковой силе звука (см. кривые равной громкости в [4] на стр. 124). Поэтому даже наличие

¹От латинского *verbalis* – словесный.

Табл. 1. Основные дыхательные шумы: акустическая характеристика (по данным [2])

Вид дыхательных шумов	Аускультативные признаки	Физическая природа и морфологическая основа образования шумов
Везикулярное дыхание нормальное	Характерный частотный диапазон 180–355 Гц. Мягкий шум, слышимый на протяжении всего вдоха и ослабевающий до неслышимого в первую треть времени выдоха. Напоминает шум продувания воздуха через губно-зубную щель при артикуляции для мягкого произношения звука “ф”	Колебания стенок альвеол и воздуха в них, возникающие вследствие упругого напряжения альвеол при их растяжении на вдохе и ослабевающие при уменьшении их напряжения во время выдоха. Ясность везикулярного дыхания зависит от объема легочной ткани на участке выслушивания, от ее эластичности, толщины тканей грудной стенки, а также от объема и скорости дыхания
Везикулярное дыхание ослабленное физиологическое	То же, что для нормального, но с уменьшением звучности шума	То же, что для нормального, но при меньшем объеме и скорости дыхания или при условиях, ухудшающих проведение звука за счет утолщения грудной стенки
Везикулярное дыхание ослабленное патологическое	Более тихий, чем в норме, дыхательный шум, короче слышимый на вдохе и почти не слышимый на выдохе. Ослабление шума может быть равномерным над всей поверхностью легких или только над ее частью	Уменьшение амплитуды колебаний альвеол из-за меньшего их растяжения при вдохе (уменьшение эластичности альвеолярных стенок, ограничение подвижности легких или грудной клетки, затрудненное прохождение воздуха в альвеолы через бронхи, повышение давления в плевральной области). Ухудшение проведения дыхательных шумов к уху исследователя за счет поражения легких, плевры, грудной стенки
Жесткое [везикулярное] дыхание	Шум везикулярного дыхания, но более громкий, нередко с дополнительным изменением тембра (“шероховатый” шум). Время слышимости его в фазе вдоха и выдоха примерно одинаково	Улучшение поведения дыхательных шумов к уху исследователя при уплотнении бронхов (воспалительная инфильтрация, склероз). Усиление шума за счет присоединения дополнительных шумов при сужении бронхов
Бронхиальное дыхание	Характерный частотный диапазон 710–1400 Гц. Громкий шум высокого тембра. Напоминает шум от вдыхания воздуха через языкощельную щель при артикуляции для произношения звука “х”. Слышен на вдохе и на протяжении всей фазы выдоха. Над крупными полостями – своеобразный музыкальный тембр, звук более низкий, чем при типичном бронхиальном дыхании (амфорическое дыхание)	Завихрения воздуха при его прохождении через голосовую щель. Выслушиваются над легкими при патологическом улучшении проведения шума уплотненной легочной тканью (при сохранении проходимости бронхов) или при усилении его за счет резонанса в крупных полостях, сообщающихся с бронхом (амфорическое дыхание)

Табл. 2. Дополнительные дыхательные шумы: акустическая характеристика (по данным [2])

Вид дыхательных шумов	Аускультативные признаки	Физическая природа и морфологическая основа образования шумов
Крепитация	Множественное потрескивание, слышимое “вспышкой” в конце вдоха и напоминающее хруст волос при трении их между пальцами. Иногда выявляется только при глубоком вдохе. После кашля не исчезает	Разлипание стенок альвеол на вдохе после их слипания в фазе выдоха из-за наличия в альвеолах экссудата или трансудата
Хрипы влажные мелко-пузырчатые	Характерный частотный диапазон для незвучных хрипов 180–355 Гц, для звучных – 710–1400 Гц. Напоминают звук множества лопающихся пузырьков в стакане с газированной водой. Выслушиваются в основном на вдохе, меньше – на выдохе. После прокашливания количество их изменяется (уменьшается или увеличивается). Звучные хрипы отличаются лучшей слышимостью, звонкостью	Вследствие прорыва воздухом жидкости (“вспенивание” трансудата или экссудата), содержащейся в просвете мелких бронхов, бронхиол, альвеол. Из-за разницы скоростей воздушного потока большее “вспенивание” наблюдается при вдохе. Звучные хрипы образуются при тех же условиях, но при одновременном уплотнении окружающей паренхимы легкого, что усиливает проведение звука
Хрипы влажные средне-пузырчатые	Характерный частотный диапазон для незвучных хрипов 180–355 Гц, для звучных – 355–710 Гц. Напоминают звук лопающихся пузырьков воздуха в жидкости при продувании ее через очень тонкую соломинку. К этому виду хрипов относят также трескучие хрипы, напоминающие хруст подкожной крепитации, но обычно звонкие, выслушиваемые только на вдохе	Наличие жидкости в бронхах среднего калибра или в мелких полостях. Трескучие хрипы могут образовываться вследствие разлипания (ацинусов) между терминальными бронхиолами
Хрипы влажные крупно-пузырчатые	Характерный частотный диапазон 180–355 Гц. Напоминают звук лопающихся пузырьков воздуха, продуваемого в воду через крупную соломинку или даже трубку камыша (клокотание)	Наличие жидкости в крупных бронхах, трахее или в крупных патологических полостях, сообщающихся с бронхом
Хрипы сухие жужжащие и гудящие	Хрипы музыкального тембра, звучные. Характерный частотный диапазон 180–355 Гц. Тембр гудящих хрипов низкий, “басовый”. Жужжащие хрипы более музыкальные (частота до 710 Гц), обычно громкие протяжные, иногда слышимые на расстоянии. Выслушиваются в фазе выдоха, но нередко и вдоха. Количество и локализация хрипов после кашля нередко изменяются	Нарушение проходимости бронхов крупного (гудящие хрипы) и среднего (жужжащие хрипы) калибра обычно за счет наличия в них вязкой мокроты

Табл. 2 (продолжение). Дополнительные дыхательные шумы: акустическая характеристика (по данным [2])

Вид дыхательных шумов	Аускультативные признаки	Физическая природа и морфологическая основа образования шумов
Хрипы сухие свистящие	Характерный частотный диапазон 355–710 Гц. Музыкальные хрипы с тембром “свиста” или “писка”, протяжные, особенно в фазе выдоха. Нередко изменяются по тембру и количеству в процессе выслушивания	Нарушение проходимости мелких бронхов при воспалительном и аллергическом их отеке, бронхоспазме, скоплении в них вязкого секрета
Шум трения плевры	Характерный частотный диапазон 710–1400 Гц. Слышится как громкий шум, напоминающий скрип кожи, хруст снега, либо как шелестящий шум (шелест бумаги или шелка). Воспринимается расположенным близко к уху. Обычно слышен и в фазе вдоха, и в фазе выдоха. Усиливается при углублении дыхания, при дыхании с наклоном больного в здоровую сторону, при давлении стетоскопом на грудную клетку	Патологические изменения поверхности плевры, затрудняющие скольжение плевральных листков в процессе дыхания

в шумовом спектре низкочастотных составляющих значительной амплитуды вовсе не означает, что врач оценит этот шум как низкочастотный. Присутствие в сигнале высокочастотных компонент значительно меньшей амплитуды может существенно изменить характер восприятия шума.

Отметим, что при слуховом анализе звука огромную роль играют “звуковая память”, одаренность, а также тренировка. Например, музыкально одаренные люди, обладающие абсолютным или, по крайней мере, относительным слухом, легко определяют на слух все обертона (гармоники), входящие в состав сложного звукового сигнала [4]. Однако практика показывает, что среднестатистический врач не обладает и относительным слухом (не говоря уже об абсолютном слухе), т.е. хорошей способностью анализировать сложные звуковые сигналы. Поэтому он способен в лучшем случае разделять на слух сложные звуковые сигналы (каковыми являются дыхательные шумы) на высокочастотные и низкочастотные составляющие (в медицинской терминологии – на звучные и глухие тона). Проанализировать же всю звуковую палитру дыхательных шумов удается только опытным врачам, одаренным слуховым восприятием.

Попытки объективизировать аускультативные признаки путем анализа дыхательных шумов, со-

державших эти признаки, предпринимались уже достаточно давно (см. [5–9] и библиографию в них). Ранние работы, например [5, 6], по сути были посвящены определению диапазонов частот, характерных для важнейших аускультативных признаков (т.е. диапазонов частот, где сосредоточена основная доля акустической энергии) и в конечном счете ответу на вопрос: характерен ли для каждого аускультативного признака свой и только свой диапазон частот, полностью отличный от диапазонов частот, присущих другим аускультативным признакам. Очевидно, что при положительном ответе на этот вопрос появилась бы уникальная возможность классифицировать аускультативные признаки по месту размещения на оси частот главной доли звуковой энергии и, тем самым, в значительной мере их объективизировать.

Так, в работе [6] применена оригинальная методика исследований, при которой роль эксперта отводилась опытному врачу-диагносту. Дыхательные шумы, воспринимаемые прижатым к грудной клетке микрофоном, в виде электрических сигналов поступали на электронный усилитель, после чего расфильтровывались с помощью октавных фильтров и далее поступали на головные телефоны. Врач выслушивал шумы в каждом октавном диапазоне поочередно и сопоставлял услышанное с теми звуковыми образами, которые у него возни-

кали при аускультации традиционным механическим стетофонендоскопом. Цель исследований заключалась в том, чтобы установить объективный диапазон частот, в котором присутствуют диагностически значимые особенности воспринимаемых на слух аускультативных признаков. Заимствованные из этой работы [6] результаты представлены в табл. 3. В свое время эти данные и были использованы при составлении Большой медицинской энциклопедии [2] (см. табл. 1, 2).

По оценкам авторов [6] общий диапазон частот, характерный для всех важнейших аускультативных признаков, простирается от 180 Гц до 1400 Гц. Это в целом не противоречит современным представлениям, хотя в более поздних работах [7–10] установлено, что диапазоны частот, характерные для некоторых аускультативных признаков, простираются гораздо ниже 180 Гц и выше 1400 Гц.

В результате проведенных исследований оказалось, что для ряда аускультативных признаков характерные частотные диапазоны полностью или частично перекрываются. Например, диапазон частот 180–355 Гц характерен как для везикулярного дыхания, так и для крупнопузырчатых хрипов, незвучных среднепузырчатых хрипов, незвучных мелкопузырчатых хрипов и гудящих сухих хрипов. Диапазон 355–710 Гц одновременно характерен для бронхо-везикулярного дыхания, звучных среднепузырчатых хрипов, свистящих сухих хрипов и пр. Таким образом, надежда на то, что каждому аускультативному признаку соответствует свой частотный диапазон, отличный от частотных диапазонов, характерных для других признаков, не оправдалась. Стало очевидным, что объективные количественные характеристики, которые можно поставить в соответствие разным аускультативным признакам, следует искать в особенностях спектров дыхательных шумов. Иными словами, необходимо было ответить на вопрос: имеются ли отличия в спектрах, присущих разным аускультативным признакам, но с одинаковыми характерными диапазонами частот, и насколько они существенны.

Поиском ответа на этот вопрос посвящено сравнительно много работ [5, 7–9, 11–14], подавляющее большинство из которых относится к 1980–90-ым годам. Во всех этих исследованиях использовался, по-сути, один и тот же принцип регистрации шумов дыхания. С закрепленного на грудной клетке микрофона или акселерометра сигнал поступал на широкополосный электронный усилитель и далее записывался на измерительном магнитофоне. В более поздних исследованиях сигнал

с усилителя подавался на аналого-цифровой преобразователь и далее поступал на персональный компьютер, где сохранялся уже в цифровом виде. Длительность фонограммы при записи в разных случаях обычно составляла от 2 до 5–10 циклов дыхания. Далее эти фонограммы поступали на спектраллизаторы (или на персональные компьютеры), где обрабатывались с помощью быстрого преобразования Фурье. В результате получались интегральные спектры, осредненные за время записи.

На основе многочисленных исследований записей дыхательных шумов здоровых и больных людей было установлено, что спектры шумов, содержащие разные аускультативные признаки, действительно могут отличаться друг от друга (по крайней мере в статистическом смысле), причем анализ необходимо проводить в широком диапазоне частот: от десятков Герц до 1.5–2.0 кГц.

Кроме того, разработан ряд алгоритмов классификации дыхательных шумов, позволяющих с некоторой вероятностью определять специфические особенности спектров шумов и соотносить их с теми или иными заболеваниями респираторного тракта. Особо следует выделить работы [8, 11].

В работе [11] проблема классификации дыхательных шумов рассматривалась с позиций классической задачи проверки статистических гипотез в совокупности с адаптивным подходом, при котором оптимальный алгоритм обработки шумов дополнялся процедурой обучения, основанной на использовании шумов дыхания, зарегистрированных у хорошо верифицированных здоровых людей. В результате был создан эффективный алгоритм, позволяющий со сравнительно высокой вероятностью отличать здоровых людей от больных с легочными патологиями.

Авторы работы [8] предложили иной подход, суть которого заключалась в следующем. Зарегистрированный спектр дыхательных шумов разбивался на 20 поддиапазонов, в каждом из которых вычислялся интегральный уровень звука. К полученным таким образом данным применялось преобразование Корунева–Лоева, после чего результаты отображались на плоскости. Такой подход позволил выявить кластеры точек, соответствующие шумам дыхания здоровых людей, а также людей с фиброзом альвеол, силикозом легких и отеком легких. Анализ полученных результатов показал, что области, занимаемые разными кластерами, частично (а в некоторых случаях и полностью) перекрывают друг друга. Таким образом, надежда на то, что кластеры, соответствующие разным болезням, будут занимать на плоскости

Табл. 3. Характерные частотные диапазоны для различных типов респираторных звуков (по данным [6])

Тип респираторных звуков	Характерный диапазон (Гц)					
	90	180	355	710	1400	2800
Везикулярное дыхание		■	■			
Бронхо-везикулярное дыхание			■	■		
Бронхиальное дыхание				■	■	
Крупнопузырчатые хрипы		■	■			
Среднепузырчатые хрипы (незвучные)		■	■			
Среднепузырчатые хрипы (звучные)			■	■		
Мелкопузырчатые хрипы (незвучные)		■	■			
Мелкопузырчатые хрипы (звучные)				■	■	
Сухие хрипы (жужжащие)		■	■	■		
Сухие хрипы (гудящие)		■	■			
Сухие хрипы (свистящие)			■	■		
Крепитация				■	■	
Шум трения плевры				■	■	

строго локализованные области, не перекрывающиеся с областями, занимаемыми другими кластерами, не оправдалась. В принципе, этого и следовало ожидать, поскольку каждый вид болезни, как правило, характеризуется не одним, а несколькими аускультативными признаками.

Необходимо отметить, что интегральные спектры, накопленные за время нескольких циклов дыхания, содержат в себе спектральные особенности, соответствующие многим аускультативным признакам.

Очевидно, что интегральный характер осредненных спектров, накопленных за время нескольких циклов дыхания, существенно затрудняет, а, во многих случаях, исключает дифференциацию тонких особенностей этого, в общем-то, нестационарного сигнала. Вместе с тем, давно известно, что характер шумов дыхания, а, следовательно, их частотные спектры в фазах вдоха и выдоха, могут значительно отличаться друг от друга (см. табл. 1, 2). В некоторых исследованиях предпринимались попытки использовать этот факт с целью улучшения “узнаваемости” аускультативных признаков, содержащихся в регистрируемых дыхательных шумах, характерных для разных респираторных заболеваний. Как утверждают авторы работы [13], за счет использования отдельного анализа шумов, возникающих на вдохе и на выдохе, им удалось создать алгоритм, позволяющий с определенной степенью вероятности отличать шумы дыхания здорового человека от шумов дыхания астматика.

Объективная фиксация различий в спектрах ды-

хательных шумов, соответствующих различным фазам дыхания, вероятно, впервые позволила четко осознать, что характер спектра дыхательных шумов зависит от времени и может существенно изменяться не только в масштабе времени, соответствующем длительности фазы дыхания, но и за более мелкие временные интервалы. Этот новый уровень физического понимания особенностей дыхательных шумов стимулировал проведение дальнейших исследований, направленных на разработку методик, позволяющих следить за динамикой их частотных спектров в малых по сравнению с циклом дыхания масштабах времени. Развитию этого этапа исследований во многом способствовали и успехи, достигнутые в области вычислительной техники. Поэтому его с полным правом можно охарактеризовать как современный.

В 1989 году появилась работа [15], которая как нельзя лучше характеризует начало нового этапа изучения дыхательных шумов и объективизации аускультативных признаков. В основу этой работы положено использование широко применяемого в физике и технике метода представления спектров сложных быстро изменяющихся во времени сигналов в координатах время–частота–яркость (или цвет) [16]. Такое представление спектров называют спектрограммой. В частном случае, при изучении звуковых, в том числе и речевых, сигналов иногда используют термин сонограмма. В медицинской же акустике среди специалистов, занимающихся электронной аускультацией, закрепился термин “респиросонограмма”, подчеркивающий природу и специфику отображаемого сиг-

нала. Следует отметить, что впервые частотно–временной образ шумов дыхания был построен McKusick еще в 1955 году, однако только к концу 80-ых стало возможным систематическое применение этой методики визуализации звуковых сигналов в медицинских исследованиях [15, 17].

Суть упомянутого подхода заключается в представлении “мгновенного” спектра мощности сигнала, как функции времени. При этом уровень (амплитуда) спектральных составляющих представляется градацией серых тонов от белого до черного или цветом. Под “мгновенным” спектром понимается спектр, осредненный за интервал времени δt , существенно меньший, чем интервал времени δT , характерный для наблюдаемого процесса. Для дыхательных шумов в качестве интервала δT естественно выбрать время, затрачиваемое на выполнение одного цикла дыхания. Тогда характерное время осреднения δt должно составлять около $\delta T/(10 \div 20)$ и менее.

Уже первые попытки использования респиросонограмм показали их высокую эффективность для объективизации аускультативных признаков и диагностики респираторных заболеваний. Метод относительно быстро стал популярным среди исследователей дыхательных шумов, и на сегодняшний день результаты его применения можно найти не только в печатных публикациях (см., например, [18–20]), но и в сети INTERNET (см., например, респиросонограммы, представленные International Lung Sounds Association по адресу <http://www.umanitoba.ca/faculties/medicine/ILSA/sounds.html> и Institut d'Électronique Fondamentale (Université Paris Sud, France) по адресу <http://www.ief.u-psud.fr/~manu/sounds.html>).

Применение современных акустических методов анализа и отображения респираторных звуков уже получило признание зарубежных медиков. Так, под эгидой International Lung Sounds Association в 80-ые годы была предпринята попытка разработать номенклатуру, ставящую в соответствие субъективным вербальным моделям шумов дыхания их объективные акустические параметры. В настоящее время в ряде передовых стран на основе использования видео- и мультимедийных технологий разрабатываются учебные пособия для студентов-медиков, в которых синхронно со звучанием аудиозаписей соответствующих образцов шумов дыхания на экране наряду с уже привычными для пульмонолога диаграммами, отображающими параметры функции внешнего дыхания, строятся респиросонограммы и другие акустические образы [17, 21]. Это свидетельствует о том, что технология, получившая в последнее время на-

звание цифровой аускультации, уже фактически перешла в разряд апробированных клинических методик исследования органов дыхания.

К сожалению, судя по литературным источникам, на фоне этих достижений, в Украине и странах СНГ клиницисты, физиологи и студенты медицинских вузов в основной своей массе до сих пор продолжают пользоваться результатами исследований дыхательных шумов и их клинико-диагностическими характеристиками, полученными более четверти века тому назад (см. [1, 2, 6, 22]).

К настоящему времени существует уже достаточно много исследований, содержащих новые данные и взгляды на причины возникновения различных типов дыхательных шумов. Такое положение вещей требует определенного пересмотра номенклатуры звуков дыхания (см. табл. 1, 2) в части сведений о их физической природе. Кроме того, необходимо продолжить работу, направленную на систематизацию и анализ объективных спектральных признаков, соответствующих субъективным аускультативным признакам, характерным для важнейших типов дыхательных шумов.

Именно указанные обстоятельства и послужили стимулом для написания настоящей статьи, цель которой – обобщить и систематизировать новые данные о шумах дыхания и причинах их возникновения, а также о достижениях в объективизации аускультативных признаков. Отметим, что при написании статьи для получения акустических образов шумов дыхания различных типов наряду с оригинальными записями, сделанными с помощью аппаратного комплекса, описанного в [19], нами использованы исходные аудиозаписи, полученные исследователями из Institut d'Électronique Fondamentale (Université Paris Sud, France), а также записи, вошедшие в учебное аудиоприложение к Большой медицинской энциклопедии.

1. ОСНОВНЫЕ ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ШУМЫ

В соответствии с отечественной классификацией, основными дыхательными шумами являются бронхиальные и везикулярные шумы (см. табл. 1). В физиологической норме, т. е. когда человек здоров, бронхиальные шумы выслушиваются над гортанью (ларингеальные шумы), трахеей (трахеальные шумы) и над крупными бронхами (спереди над рукояткой грудины и сзади между лопаток на уровне от 8-го шейного до 4-го грудного позвонков). Везикулярные шумы выслушиваются только над легкими. Следует сказать, что зарубежная классификация основных дыхательных шумов отличается от отечественной тем, что дыхательные

шумы, выслушиваемые над гортанью и шейным отделом трахеи, выделяют в самостоятельный тип шумов – трахеальные шумы. По причине, которая станет понятной ниже, мы будем придерживаться зарубежной классификации.

В настоящее время отечественные [1, 2, 11, 19, 22–24] и зарубежные [7, 9, 18] исследователи шумов дыхания едины во мнении, что трахеальные и бронхиальные шумы возникают за счет пульсаций давления в трахее и главных бронхах, обусловленных турбулизацией потока воздуха в голосовой щели при акте дыхания. Именно голосовая щель в норме является наиболее узким местом бронхиального дерева, и поэтому скорости потока воздуха в ней могут достигать значительных величин (около 10 м/с даже при весьма умеренной интенсивности дыхания – порядка 0.5 л/с). Как известно [25], пульсации давления в турбулизованном потоке характеризуются сплошным спектром, более-менее плавно спадающем по мере роста частоты. При этом скорость спада увеличивается по мере снижения скорости потока [24]. Именно такого характера спектр и наблюдается при электронной регистрации шумов дыхания над трахеей [7, 15, 19]. На рис. 1 приведена типичная респиросонограмма шумов дыхания над трахеей здорового человека. Как видно, характер спектров в фазах вдоха и выдоха практически не отличаются друг от друга. Уровень спектра сравнительно плавно спадает к высоким частотам так, что перепад между уровнями спектра на низких и высоких частотах составляет около 15÷25 дБ. Верхняя граница частот, где еще удается регистрировать трахеальные шумы, зависит от интенсивности дыхания и степени развитости (толщины) подкожного жирового слоя, но в целом колеблется от 800 до 2000 Гц и выше. Заметим, что провалы на сонограммах, приведенных на рис. 1, 2, соответствуют паузам в дыхании пациентов.

В отличие от трахеальных шумов, которые прослушиваются через достаточно тонкую и звукопрозрачную прослойку, образованную стенкой трахеи, мышечно-жировой тканью и кожей (в целом около 3÷6 мм), бронхиальные шумы, прежде чем попасть на поверхность грудной клетки, должны преодолеть значительно более толстый слой биоткани (стенки трахеи или бронхов, биоткани средостения и костно-мышечно-жировую стенку грудной клетки). Естественным следствием этого является ослабление и изменение характера спектра бронхиальных шумов по сравнению с трахеальными.

Помимо этого, как установлено в [26], распределение пульсаций давления в трубах со стенозом та-

ково, что максимальная амплитуда пульсаций давления находится на расстоянии 6÷7 диаметров стеноза вниз по потоку. При больших расстояниях амплитуда пульсаций давления сравнительно быстро уменьшается, что связано с рассеянием и диссипацией вихрей в потоке. В нашем случае роль стеноза в трахее играет голосовая щель. Учитывая, что ее эквивалентный диаметр² в среднем составляет около 0.8 см, можно заключить, что максимальная амплитуда пульсаций давления приходится на участок трахеи, отстоящий от голосовых связок примерно на 5÷6 см, т.е. на область перехода шейного отдела трахеи в грудной. Принимая во внимание, что общая длина трахеи составляет в среднем 12 см [27], становится очевидным, что амплитуда пульсаций давления в грудном отделе трахеи и в главных бронхах будет ниже, чем в шейном отделе трахеи. Вследствие этого громкость бронхиальных шумов заметно ниже громкости трахеальных шумов, и уровень спектра типичных бронхиальных шумов (рис. 2) с ростом частоты спадает значительно быстрее, чем уровень спектра трахеальных шумов (ср. с рис. 1). Указанные отличия между двумя рассмотренными типами шумов являются основной причиной того, что зарубежные исследователи склонны четко разделять дыхательные шумы на трахеальные и бронхиальные.

Перейдем теперь к анализу везикулярных дыхательных шумов, которые выслушиваются на поверхности грудной клетки над легкими. Само название “везикулярный” восходит к латинскому *vesicles* – пузырек (альвеола).

В настоящее время существуют два предположения о причинах возникновения везикулярных шумов. Первое заключается в том, что везикулярные шумы генерируются во всем объеме легких за счет колебаний стенок альвеол и воздуха в них, возникающих вследствие нарастающего упругого напряжения стенок альвеол при их заполнении воздухом на вдохе и уменьшения напряжения на выдохе (см., например, табл. 1).

Согласно второму предположению, везикулярные шумы являются прошедшими через бронхиальное дерево и паренхиму к внешней поверхности грудной клетки шумами, генерируемыми пульсациями давления в трахее и главных бронхах (а возможно и в более мелких бронхах [18, 28]), которые, в свою очередь, вызваны турбулизацией потока воздуха в голосовой щели. Таким образом,

²Голосовая щель чаще всего имеет форму вытянутого треугольника [23]. Поэтому под эквивалентным диаметром щели понимается диаметр круглого отверстия, площадь которого равна площади голосовой щели.

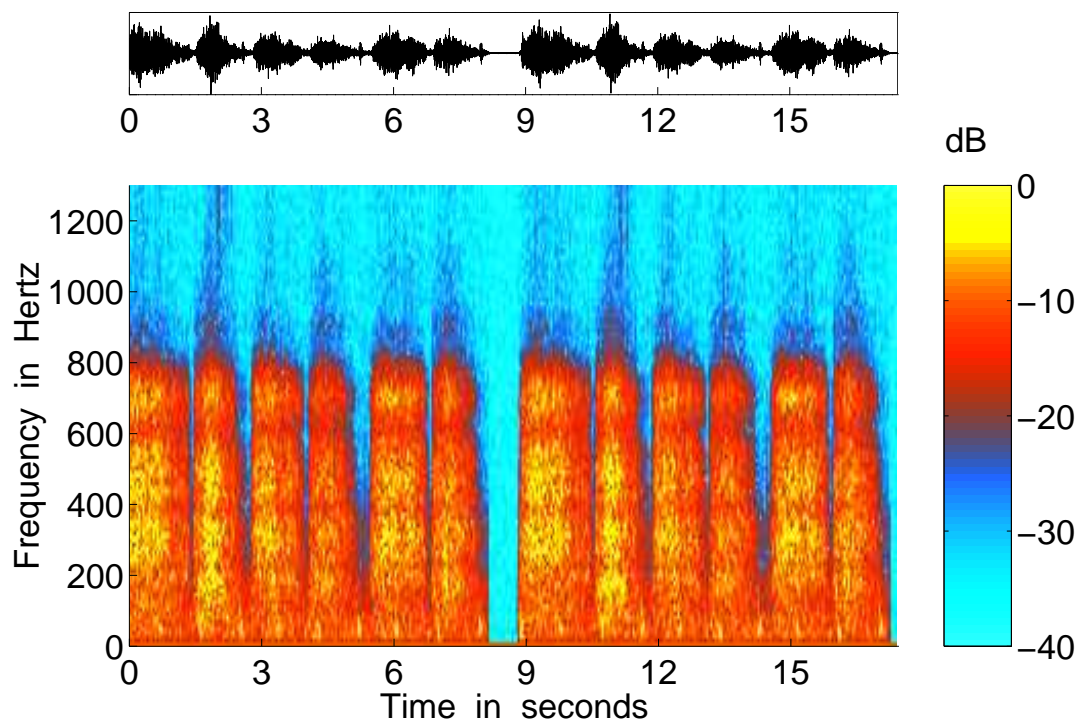


Рис. 1. Трахеальные шумы в норме

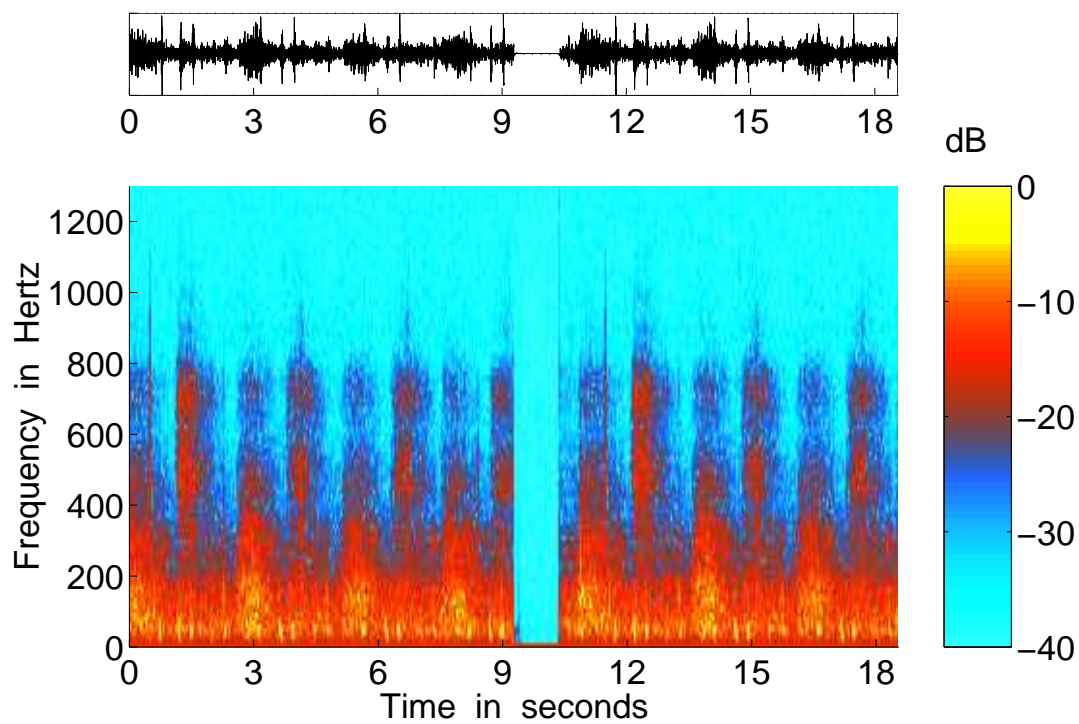


Рис. 2. Бронхиальные шумы в норме

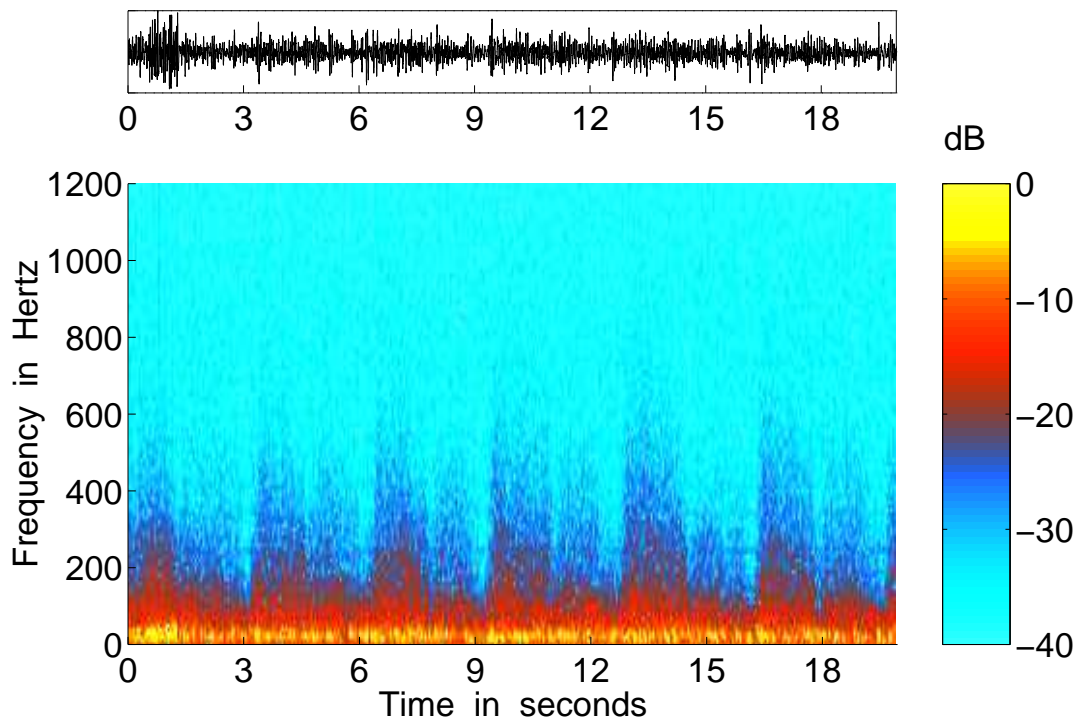


Рис. 3. Везикулярные шумы в норме

подразумевается, что механизм возникновения везикулярных шумов тот же, что и для трахеальных и бронхиальных шумов. Однако, вследствие относительно большого пути прохождения шумов от источника до поверхности грудной клетки, значительная доля звуковой энергии поглощается биотканями, и уровень громкости везикулярных шумов падает примерно на $30 \div 40$ дБ по отношению к уровню громкости шумов, выслушиваемых над трахеей. Кроме того, поскольку степень затухания звука в паренхиме прогрессивно растет с повышением частоты [29], уровень спектра везикулярных шумов в норме с ростом частоты быстро падает. По этой причине область частот, где еще удается выслушивать везикулярные шумы, обычно лежит ниже $400 \div 500$ Гц.

Справедливости ради отметим, что некоторые исследователи убеждены в том, что в настоящее время наука еще не готова указать механизм возникновения везикулярных шумов, поскольку нет достаточно убедительных доказательств ни одной из существующих гипотез (см. работу [30] и имеющуюся там библиографию).

Сначала проанализируем предположение о том, что везикулярные шумы генерируются в легочной ткани, и попытаемся ответить на вопрос: каковы возможные причины возникновения колебаний

стенок альвеол и воздуха в них? Как представляется нам, причин (по крайней мере теоретически) может быть несколько. Рассмотрим их и оценим возможную роль каждой из них как источника везикулярных шумов.

Предположим, что вынужденные и резонансные колебания стенок альвеол и воздуха в них действительно обусловлены воздействием динамических сил, связанных с втеканием и вытеканием воздуха из альвеол при акте дыхания и растяжением (сжатием) стенок альвеол, вызванным периодическими знакопеременными движениями грудной клетки и диафрагмы. Поэтому частота вынужденных колебаний стенок альвеол и воздуха в них равна частоте колебаний грудной клетки в процессе дыхания, т.е. около $0.2 \div 0.4$ Гц. Как известно, такие инфразвуковые колебания на слух восприниматься не могут. Говорить же всерьез о какой либо существенной роли вихреобразования потока воздуха в альвеолах и связанного с ним шумообразования не приходится, так как экспоненциальное увеличение общего поперечного сечения воздухоносных путей в каждом поколении бронхиального дерева [27] приводит к тому, что скорость потока воздуха в бронхиолах 23-го поколения вряд ли будет превосходить величину $5 \cdot 10^{-4}$ м/с [31] (это соответствует числу Рейнольдса около 10^{-2}) при

условии, что скорость потока в голосовой щели равна 10 м/с.

Теперь оценим величину резонансной частоты объемных колебаний воздуха в альвеолах. Если учесть, что характерный диаметр альвеол составляет около $2 \cdot 10^{-4}$ м, а скорость звука в воздухе – примерно 330 м/с, то после элементарных расчетов получаем, что частота резонанса должна находиться в районе 0.6 МГц, т.е. в области ультразвука, неслышимого для человека.

Таким образом, даже если предположить, что указанные выше механизмы генерации шумов в легких и реализуются физически, такие шумы не могут быть обнаружены посредством аускультации, поскольку их частотный диапазон лежит вне пределов зоны слухового восприятия.

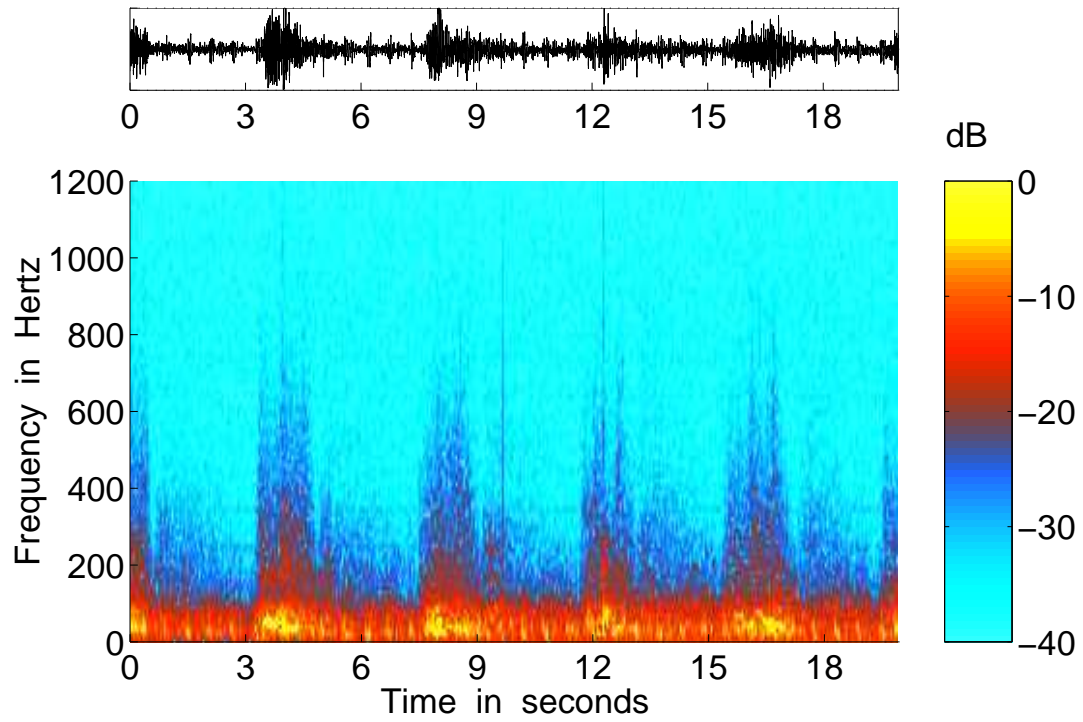
Для полноты анализа упомянем еще один возможный механизм звукообразования в легочной ткани. Известно [32], что деформации легочной ткани (паренхимы) при акте дыхания велики и могут составлять до 200 %. При этом паренхима с точки зрения механики ведет себя как пластический материал, который за счет внутреннего трения поглощает значительную часть подводимой механической энергии, вырабатываемой грудными мышцами и диафрагмой. Возможно, что некоторая, небольшая часть этой энергии преобразуется в звук, который может прослушиваться как везикулярный шум. Однако, судя по литературным источникам, наличие подобных эффектов в паренхиме пока не зафиксировано экспериментально.

Проведенный выше анализ аргументов “за” и “против” для существующих гипотез о механизме возникновения везикулярных шумов позволяет заключить, что на сегодняшний день более реалистичным представляется предположение о том, что основной источник везикулярных шумов – турбулентный поток воздуха в голосовой щели. Серьезными косвенными подтверждениями этой точки зрения являются также экспериментальные результаты оценок передаточной функции, характеризующей прохождение акустической энергии от трахеи до поверхности грудной клетки [29, 33]. Действительно, если спектр трахеальных шумов умножить на такую передаточную функцию, то можно получить новый спектр, очень напоминающий спектр везикулярных шумов.

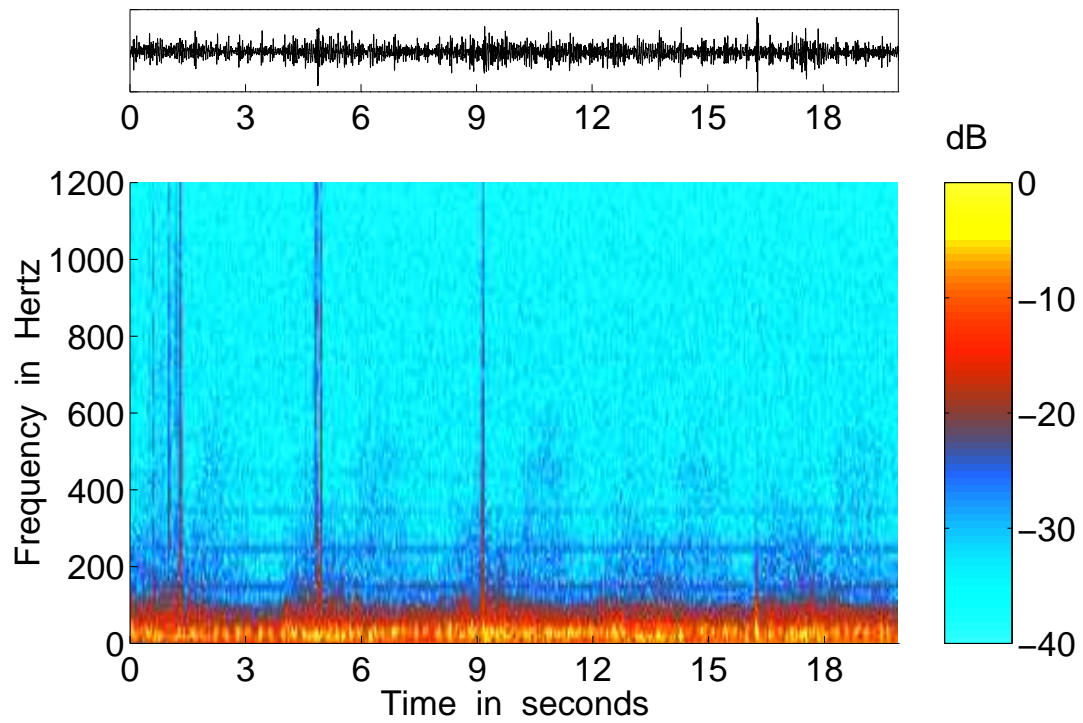
Теперь обратимся к рис. 3, на котором представлена типичная респиросонограмма везикулярных шумов в норме. Как видно, акустический образ этих шумов имеет существенные отличия от акустических образов трахеального и бронхиального шумов. Во-первых, общий уровень этих шумов примерно на 20 дБ ниже, чем, скажем, уро-

вень трахеальных шумов. Во-вторых, уровень спектральных составляющих резко падает с ростом частоты, из-за чего характерный для везикулярных шумов диапазон частот значительно (в 2÷4 раза) уже, чем характерный диапазон частот трахеальных шумов. В-третьих, частотный диапазон сигнала на выдохе почти в два раза уже, чем на вдохе, в связи с чем везикулярные шумы в фазе выдоха почти не слышны (см. табл. 1).

Выше мы продемонстрировали респиросонограммы, характерные для основных типов дыхания в норме. Естественно, что при заболеваниях респираторной системы характер шумов (а, значит, и респиросонограмм) может значительно измениться. Степень этого изменения зависит прежде всего от типа заболевания, его тяжести и от ряда других факторов. В настоящей работе мы не преследуем цель дать исчерпывающие данные о том, какой вид респиросонограммы соответствует той или иной болезни. Подчеркнем еще раз, что такие данные могут быть накоплены только в результате длительного наблюдения за большим количеством больных в клинических условиях. Тем не менее, уже сейчас с большой определенностью можно сказать, чего следует ожидать при улучшении звукопрозрачности паренхимы. Это явление характерно для очень многих видов легочных заболеваний, например воспаления легких, и возникает в результате болезненных процессов, происходящих в какой-либо части легочной ткани. При этом, межальвеолярные перегородки могут во много раз утолщаться за счет накопления в них жидкости (отека). В тяжелых случаях жидкость может частично или полностью заполнить альвеолы и мелкие бронхиолы. В этих случаях, следуя медицинской терминологии, говорят: легочная ткань уплотнилась (см. табл. 1). С физической точки зрения наличие жидкости в паренхиме приводит к увеличению ее звукопрозрачности и снижению звукопоглощения ее биотканей, особенно на высоких частотах (от 400 до 1000 Гц). В результате этого создаются условия для более эффективного прохождения звука от источника (пульсации давления в области голосовой щели) к поверхности грудной клетки. В результате, над той областью легкого, где паренхима уплотнилась, вместо везикулярных (см. респиросонограмму на рис. 3) регистрируются бронхиальные шумы (см. рис. 2). Этот эффект имеет для медиков огромное диагностическое значение, так как позволяет локализовать очаг заболевания, а по степени приближения выслушиваемых шумов над этим очагом к бронхиальным шумам оценить степень тяжести заболевания. С акустической же



а



б

Рис. 4. Везикулярные шумы:
а - при жестком дыхании, б - при ослабленном дыхании

точки зрения наличие указанного эффекта свидетельствует в пользу предположения о едином источнике для всех трех основных типов шумов дыхания.

Если очаг заболевания и уплотнение паренхимы невелики, прослушиваемые над ним звуки напоминают нечто среднее между бронхиальными и везикулярными шумами. Медики квалифицируют такое дыхание как “жесткое” (см. табл. 1). При этом вид респиросонограммы становится таким, как на рис. 4, а. Сравнивая его с рис. 2 и 3, заключаем, что при “жестком” дыхании респиросонограмма также принимает промежуточный вид между респирограммами бронхиального и везикулярного дыхания.

В случае ослабленного везикулярного дыхания, которое встречается у пациентов с патологиями респираторной системы, связанными с ограничением подвижности грудной клетки или затрудненным прохождением воздуха в альвеолы через бронхи, респиросонограмма принимает вид, указанный на рис. 4, б (ср. с рис. 3). Как видно, при этом интенсивность шумов и характерная для них полоса частот уменьшаются настолько, что возникают определенные трудности в их прослушивании и регистрации. Отметим, что ослабленное дыхание иногда выслушивается и у страдающих избыточным весом здоровых лиц с сильно развитым подкожным жировым слоем.

2. ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ДЫХАТЕЛЬНЫЕ ШУМЫ

Отечественная классификация дополнительных шумов и сведения о причинах их возникновения отражены в табл. 2. Мы остановимся на феномене хрипов, появление которых всегда однозначно свидетельствует о возникновении патологий в респираторной системе. В соответствии с отечественной медицинской терминологией, по механизму возникновения и особенностям восприятия на слух хрипы подразделяются на влажные и сухие. В англоязычной классификации им соответствуют термины *crackles* – трески и *wheezing*, *wheezes* – дыхание с присвистом, хрипы.

Сначала мы рассмотрим влажные хрипы. Что касается причин их возникновения, отечественные и зарубежные исследователи придерживаются единой точки зрения. Считается, что появление влажных хрипов обусловлено скоплением в дыхательных путях жидкости (экссудата, транссудата, бронхиального секрета и даже крови), вызванное болезненными процессами, сопровождающимися рядом заболеваний респираторной системы.

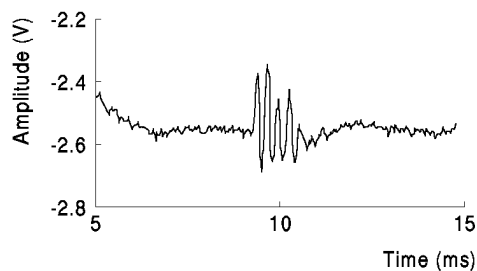
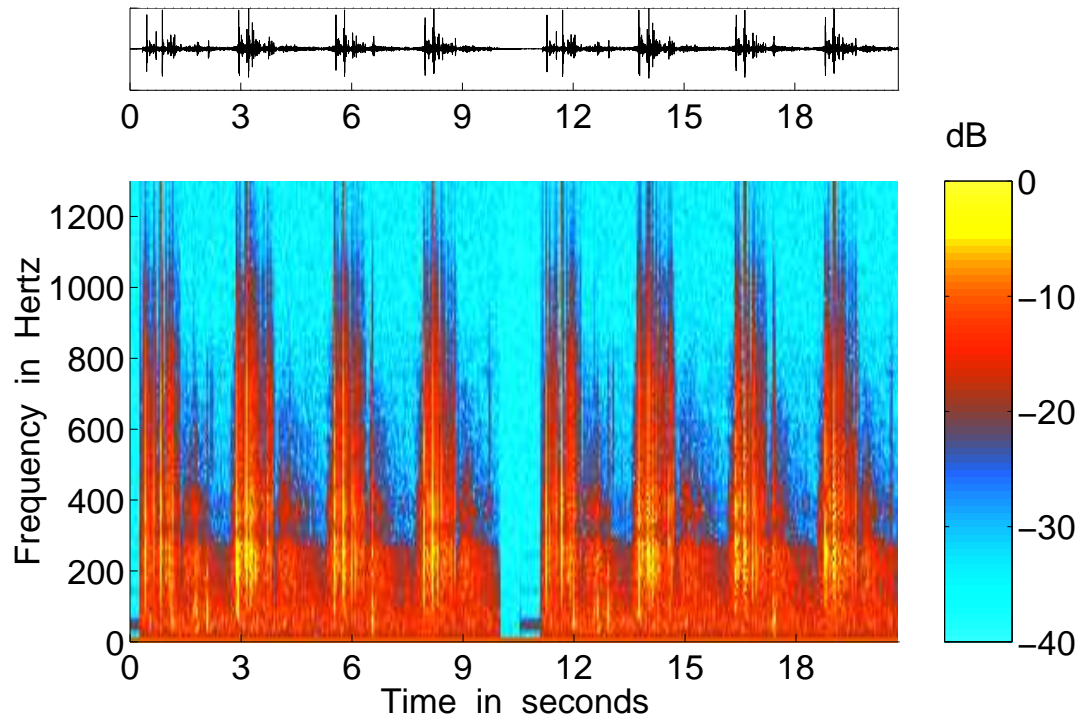


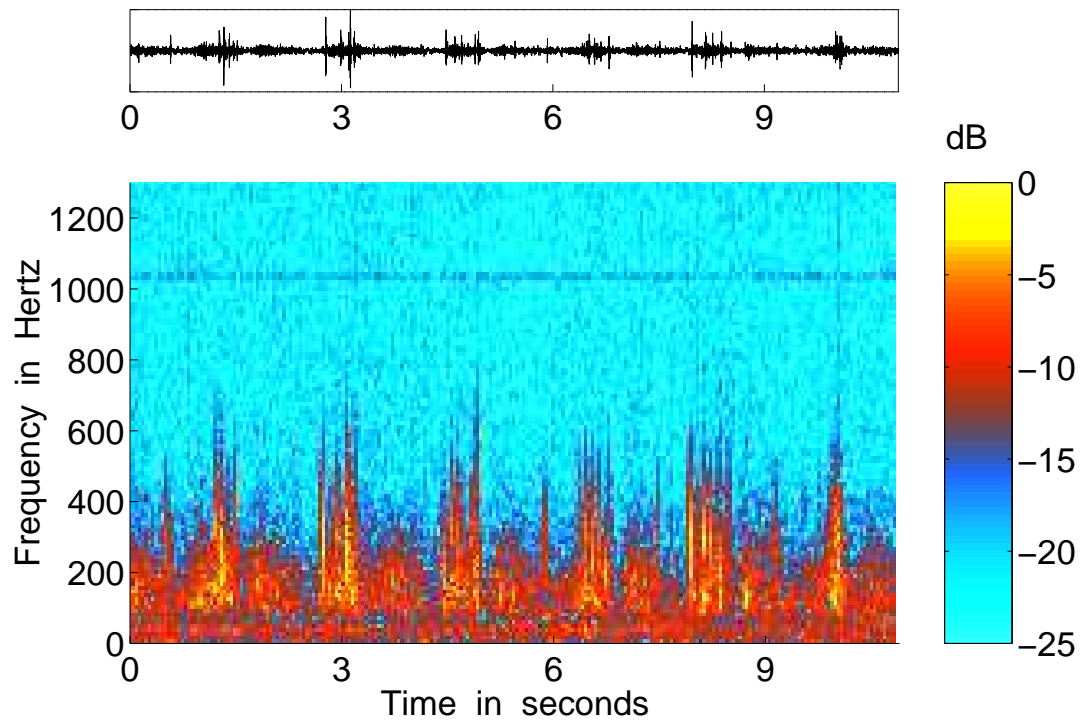
Рис. 5. Фонограмма одиночного импульса, характерного для влажных хрипов

Во время вдоха воздух проходит через эту жидкость, вспенивая ее. Образующиеся при этом пузырьки лопаются, в результате чего генерируются характерные щелчки (трески), которые отчетливо прослушиваются и надежно регистрируются с поверхности грудной клетки. Характер влажных хрипов зависит от калибра бронхов, которые заполнены жидкостью, типа жидкости (ее вязкости), а также от места расположения очага поражения легкого. Отечественная классификация выделяет три основные категории влажных хрипов – мелкопузырчатые, среднепузырчатые и крупнопузырчатые. Предполагается, что такое деление связано с калибром пораженных бронхов (подробные вербальные модели этих трех категорий влажных хрипов приведены в табл. 2). Отметим, что отечественная классификация влажных шумов практически идентична западной, хотя, судя по всему, многие зарубежные специалисты зачастую при прослушивании выделяют только два типа: *fine crackles* – тонкие потрескивания и *coarse crackles* – грубые трески.

К настоящему времени имеется сравнительно много работ, в которых излагаются результаты исследований фонogramm и визуальных образов влажных хрипов [34–37]. В рамках классической гидромеханики сформулирована также математическая модель, позволяющая при определенных допущениях описать механизм генерации влажных хрипов [38]. Анализ этих работ показывает, что акустический сигнал, возникающий в тот момент, когда лопается пузырек жидкости, представляет собой короткий импульс длительностью $2 \div 15$ мс почти периодической, “квазигармонической” формы (рис. 5). В [34, 35], показано, что мелкопузырчатые и крупнопузырчатые хрипы, существенно отличаются друг от друга как по длительности импульсов, так и по характерному периоду заполняющих их “квазигармонических” функций. Во-первых, при мелкопузырчатых хрипах импульсы почти в два раза короче, чем при круп-



а



б

Рис. 6. Влажные хрипы:
а - мелкопузырчатые, б - крупнопузырчатые

нопузырчатых. Во-вторых, характерная частота “квазигармонического” заполнения первых примерно в два раза выше, чем у вторых (для мелкопузырчатых хрипов около 450 Гц, в то время, как у крупнопузырчатых – около 250 Гц). Как следствие, спектр частот, характерный для мелкопузырчатых хрипов, значительно шире спектра частот, характерного для крупнопузырчатых хрипов. Из представленных образов шумов дыхания при наличии мелкопузырчатых и крупнопузырчатых хрипов (рис. 6) видно, что в этих случаях респиросонограммы изобилуют структурами в виде многочисленных узких линий, которые фактически и являются спектрами рассмотренных выше импульсных сигналов, генерируемых лопающимися пузырьками жидкости при прохождении воздуха по бронхиальному дереву. При этом заметно, что ширина спектров, соответствующих мелкопузырчатым хрипам, действительно почти в два раза больше, чем ширина спектров крупнопузырчатых хрипов.

Таким образом, присутствие в шумах дыхания влажных хрипов, а также их калибр весьма четко отображаются на респиросонограммах, причем эта объективная информация может быть легко воспринята даже недостаточно квалифицированным врачом.

Перейдем к рассмотрению сухих хрипов. Как следует из табл. 2, их главной отличительной особенностью является наличие ярко выраженного музыкального тембра. Согласно отечественной классификации, сухие хрипы подразделяются на гудящие, жужжащие и свистящие. Зарубежная классификация несколько отличается от отечественной, и их термины не всегда могут быть поставлены в однозначное соответствие. Например, принятая англоязычная классификация [39] предусматривает следующее деление: *high/low pitched wheezing* – хрипы высокого/низкого тона; *short/long wheezing* – короткие/длинные хрипы; *single (monophonic) / multiple (polyphonic) wheezing* – одиночные (монофонические) / сложные (полифонические) хрипы.

Считается, что возникновение сухих хрипов связано с колебаниями язычков или нитевидных перемычек в бронхах, образующихся из очень вязкой мокроты [22]. Сухие хрипы также могут появляться за счет сужения сечения бронха (стеноза), вызванного наличием комка мокроты на стенке бронха, местного отека или опухоли. Можно предполагать, что под воздействием потока воздуха при акте дыхания возникают колебания язычка или нитевидной перемычки (в терминах классической механики консоли или струны (тонкой бал-

ки)). При этом звук может генерироваться как за счет колебаний таких структур, так и за счет срыва вихрей при их обтекании потоком (вихревой, или Струхалев звук) [40]. В последние десять лет ведется также интенсивная теоретическая и экспериментальная разработка гипотезы о возникновении сухих хрипов за счет флаттера стенок бронхов. В частности, уже доказано экспериментально (*in vitro*), что вероятность возникновения флаттера при условиях отека слизистой бронха и наличия местного стеноза, ограничивающего поток, весьма высока [41–45]. Важно отметить, что при реализации любого из указанных механизмов генерации звука (по-сути, сухих хрипов) может появиться не только простой тон, т. е. звук с одной частотой, но и сложный сигнал, содержащий несколько составляющих с разными частотами. Наличие гармонических составляющих, как общеизвестно, обусловлено собственными формами колебаний, характерными для данной механической колебательной системы.

Рассмотрим несколько типичных респиросонограмм, на которых присутствуют сухие хрипы. Сначала обратимся к респиросонограмме, характерной для шумов дыхания больного во время приступа бронхиальной астмы (рис. 7, а). Здесь прослеживается один единственный всплеск амплитуды на частоте около 130 Гц, который врачи после контрольного прослушивания идентифицировали как низкий гудящий хрип. На следующей респиросонограмме (рис. 7, б) хорошо видно, что максимум спектрального уровня находится почти вдвое выше по частоте – при 220 Гц, и он тоже один. В этом случае врачи идентифицировали его как просто гудящий хрип.

Продоланный анализ позволяет сделать вывод о том, что гудящие хрипы по своей природе являются монофоническими, т. е. содержат практически только один простой тон (без гармоник).

Обратимся теперь к респиросонограммам, представленным на рис. 8. Первая из них, согласно оценке врачей, соответствует фонограмме с наличием низких жужжащих хрипов, а вторая – просто жужжащих хрипов. На обеих респиросонограммах четко прослеживается присутствие сложного (полифонического) сигнала, состоящего из нескольких гармонических компонент. На рис. 8, а они просматриваются лучше всего при $t=4.5$ с и $t=9$ с, а на рис. 8, б – при $t=0.7$; 4.5; и 8.5 с. Сперва обратимся к рис. 8, а. Проведенные измерения частот спектральных составляющих сухого хрипа показывают, что он характеризуется наличием четырех гармоник, причем первая (низшая) из них имеет частоту 95 Гц, а четвертая (выс-

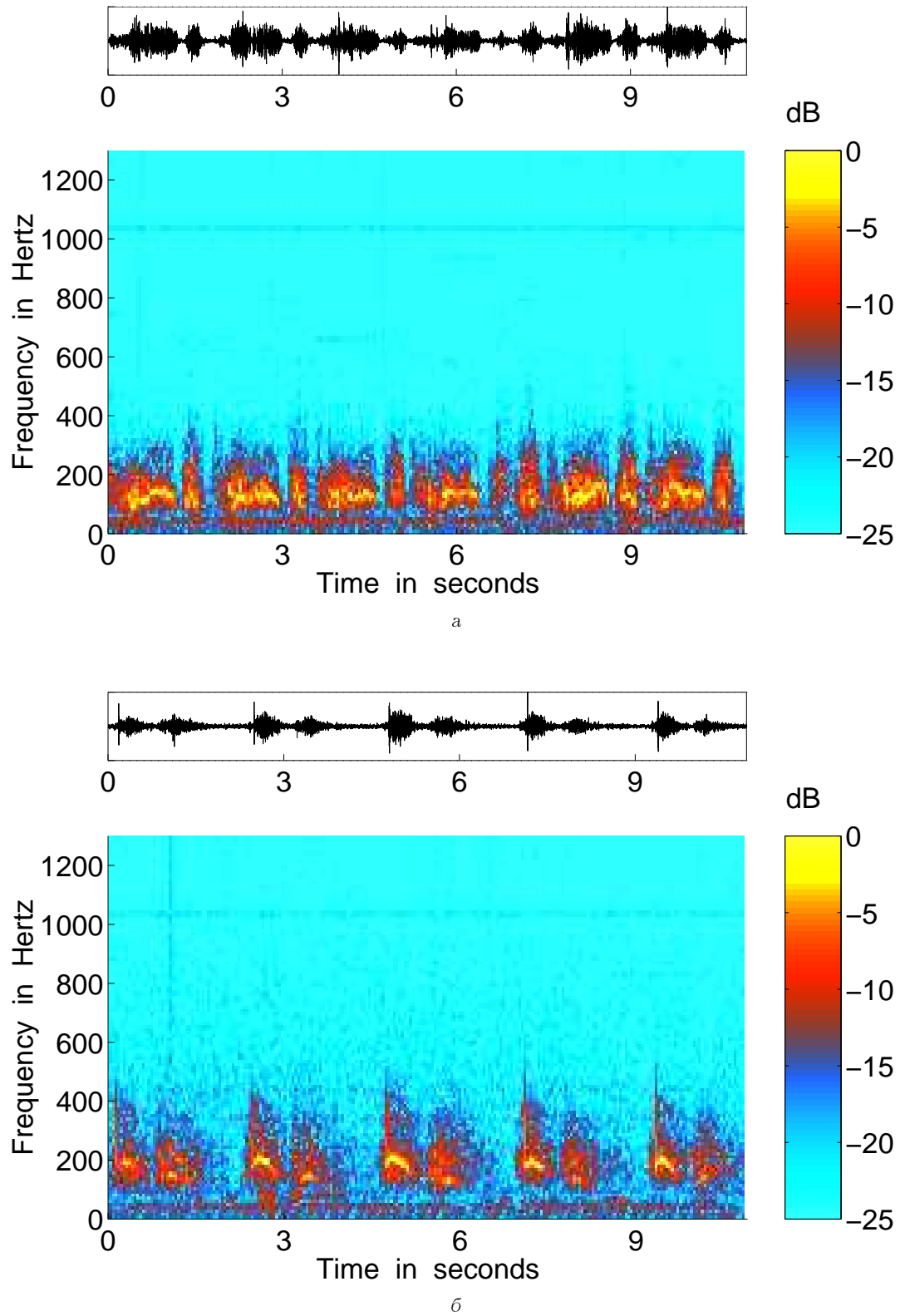
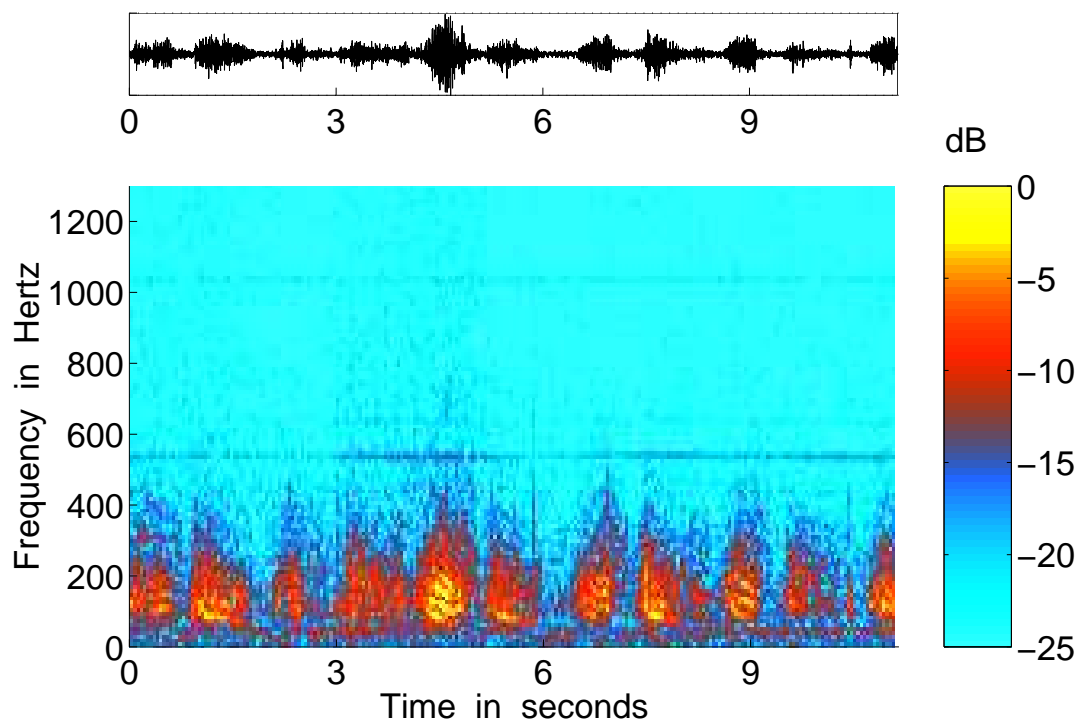
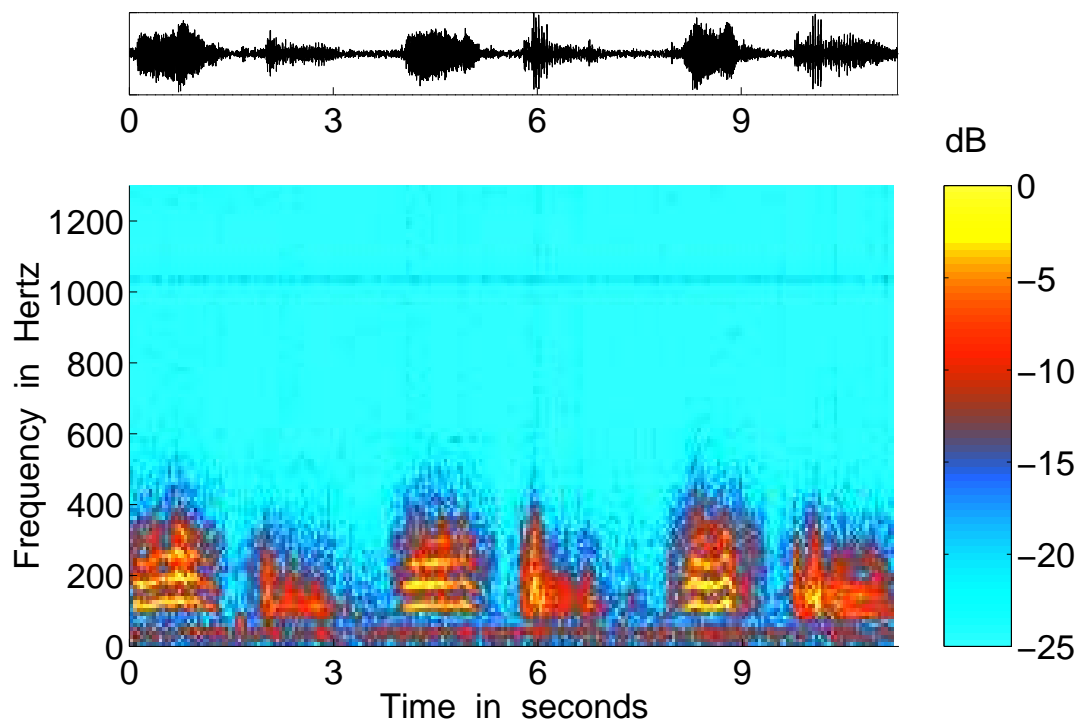


Рис. 7. Сухие хрипы, содержащие один тон (гармонику):
а - низкие гудящие, б - гудящие



a



б

Рис. 8. Сухие хрипы, содержащие несколько гармоник с дробным отношением частот:
а - низкие жужжащие, б - жужжащие

шая) – 230 Гц. Соотношение частот гармоник составляет $1 : 1.42 : 1.85 : 2.4$. У хрипа, отображенного на рис. 8, б, первая гармоника имеет частоту 120 Гц, а четвертая – 310 Гц. При этом частоты гармоник соотносятся как $1 : 1.33 : 2 : 2.6$. Легко видеть, что “пакет” из четырех гармоник на рис. 8, б находится по частоте заметно выше, чем аналогичный “пакет” на рис. 8, а. Поэтому совершенно закономерным является то, что врач фиксирует хрипы, соответствующие рис. 8, а, как более низкочастотные, чем хрипы на рис. 8, б.

Таким образом, в отличие от гудящих хрипов, жужжащие хрипы содержат несколько гармоник, частоты которых достаточно близко отстоят друг от друга. При этом соотношение частот гармоник может меняться в достаточно широких пределах, но оно не кратно какому-либо целому числу. Именно совокупность этих характерных черт и составляет суть объективной интерпретации приведенной в табл. 2 вербальной модели жужжащих хрипов.

Вернемся к вопросу о соотношении частот гармоник, присущих жужжащим хрипам. Как было показано выше, эти соотношения характеризуются дробными числами. Из теории музыкальной акустики [46] известно, что благозвучие или неблагозвучие какого-либо звука во многом определяется соотношением частот, содержащихся в нем гармонических составляющих. К благозвучным относятся звуки, издаваемые, например, струной или воздушным столбом в трубе (соотношение частот их гармонических составляющих, как известно, кратно целому числу). Известны механические колебательные системы, издающие звуки, отличающиеся прекрасным благозвучием, частоты гармонических составляющих которых хотя и не кратны целому числу, но сильно разнесены друг от друга и имеют строго определенное соотношение, подобранное эмпирическим путем. К таким системам прежде всего относятся колокола. В большинстве же случаев звуки, гармоники которых не кратны целому числу и близки друг к другу по частоте, воспринимаются на слух как неблагозвучные. Именно к таким звукам относятся и большинство сухих хрипов, субъективно характеризующихся как жужжащие. Приведенные рассуждения дают надежду на то, что после накопления представительной базы данных по сухим хрипам, окажется возможным не только эффективно дифференцировать их на гудящие, жужжащие и прочие, но также по соотношению частот гармонических составляющих оценивать тип механической структуры, обуславливающий появление того или иного сухого хрипа.

Обратимся к рис. 9, на котором представлена респиросонограмма сухого хрипа, квалифицируемого врачами как свистящий с изменяющейся высотой тона (“поющий” хрип). Хорошо видно, что пик в его спектре только один (гармоники отсутствуют), и находится он в районе 350 Гц. Отличительной особенностью этого звука является то, что он модулирован по частоте (т.е. частота является функцией времени). Глубина его модуляции (отношение девиации частоты к среднему значению частоты за наблюдаемый отрезок времени) значительна и составляет порядка 40 %. Наш опыт говорит о том, что встречаются хрипы и с более значительной глубиной модуляции – до 50–60 %.

Рассмотрим еще один пример “музыкальных” сухих хрипов (рис. 10). Отличительной чертой этих хрипов является то, что и в фазе вдоха, и в фазе выдоха отношение частот гармоник в пределах точности измерений практически кратно целым числам. Например, при $t=5.5$ с (хорошо выражено три гармоники) это отношение равно $1 : 2 : 3.1$, а при $t=7$ с (четыре гармоники) – $1 : 2 : 2.95 : 3.8$ соответственно. Область частот, занимаемая гармониками, достаточно велика – от 130 до 500 Гц и выше, т.е. охватывает более двух октав. Любопытно, что на слух врачи квалифицируют эти хрипы как свистящие, что является прямым следствием существенно более высокой чувствительности уха к высоким частотам, чем к низким [4].

Анализ приведенных примеров позволяет сделать несколько выводов. Во-первых, сухие хрипы с частотой низшего тона более 300 Гц воспринимаются врачом как свистящие. Во-вторых, если при этом частота хрипа изменяется во времени, то его квалифицируют как “поющий”. В-третьих, как свистящие могут восприниматься также сухие хрипы с набором спектральных составляющих, соотношения частот которых близки к целым числам, а высшие гармоники лежат на частотах от 300 Гц и выше.

Приведенные выше примеры респиросонограмм и фонограмм влажных и сухих хрипов были подобраны нами таким образом, чтобы, во-первых, наиболее ясно и четко продемонстрировать как субъективные вербальные модели соотносятся с объективными спектральными и временными характеристиками этих хрипов, а во-вторых, наглядно показать какие структуры, присутствующие на респиросонограммах, отображают спектрально-временные особенности хрипов. Естественно, в медицинской практике достаточно редко встречаются случаи, когда у пациента

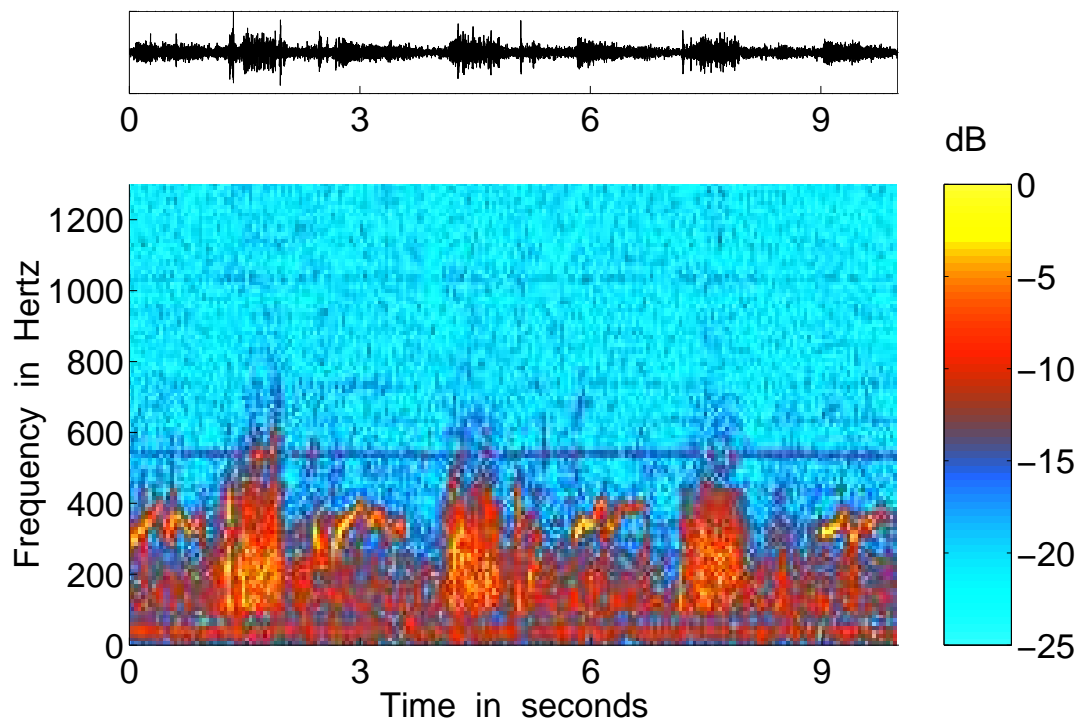


Рис. 9. Сухие свистящие (“поющие”) хрипы, содержащие одну гармонику

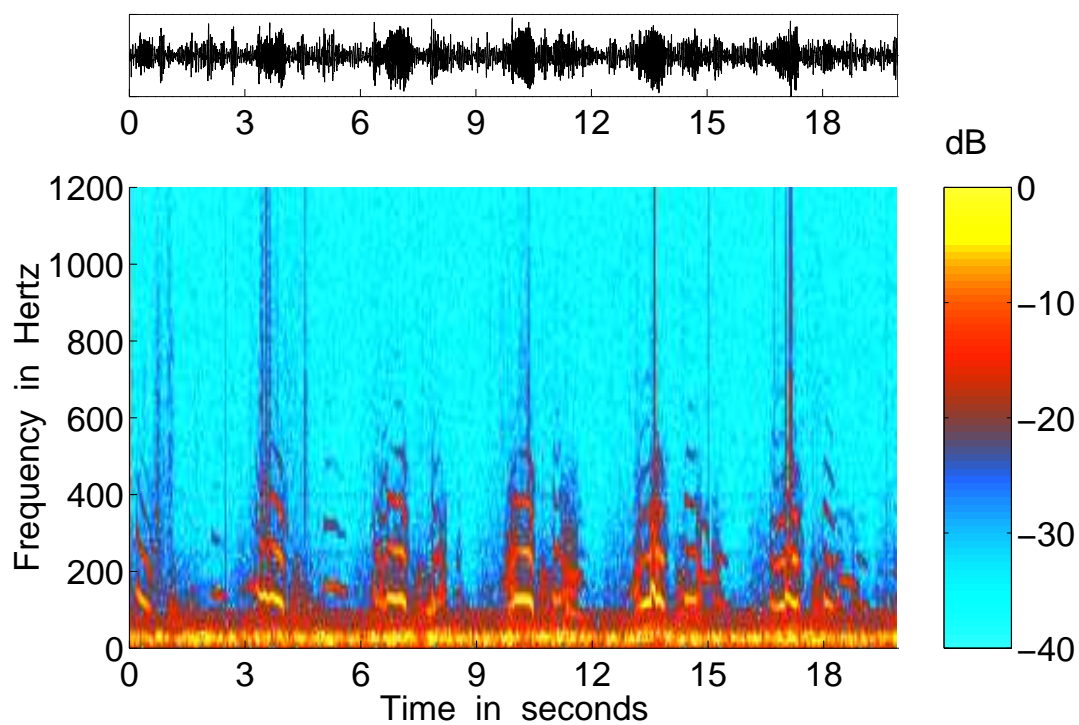


Рис. 10. Сухие свистящие хрипы, содержащие несколько гармоник с отношением частот, кратным целым числам

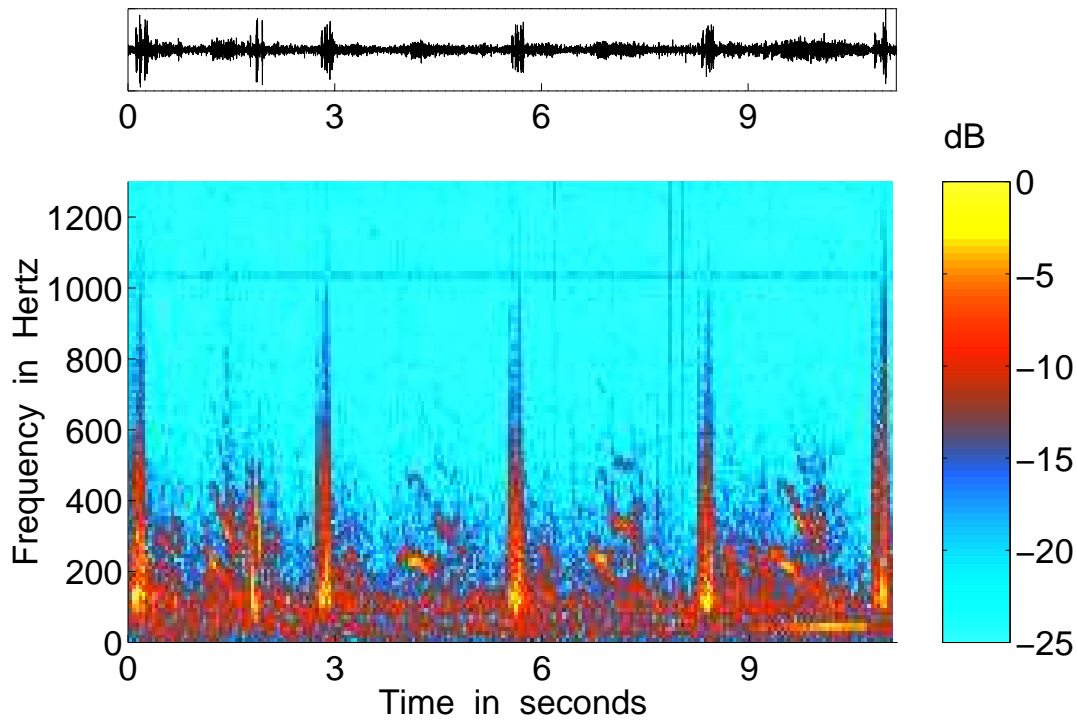


Рис. 11. Смесь влажных хрипов (в фазе вдоха) и сухих хрипов разного калибра (в фазе выдоха)

обнаруживается только один из характерных аускультативных признаков. Однако, усвоив и запомнив особенности приведенных выше объективных акустических образов для простейших случаев, в принципе нетрудно разобраться в дыхательных шумах более сложного характера. В качестве примера приведем пример шумов дыхания, в которых одновременно присутствуют и влажные, и сухие хрипы. Так, на рис. 11 представлена респиросонограмма шумов, в которых на вдохе присутствуют влажные хрипы, а на выдохе – сухие хрипы разного калибра.

Отметим еще одну интересную особенность приведенных респиросонограмм. На многих из них на фоне полезного сигнала, соответствующего шумам дыхания, достаточно ясно различимы горизонтальные полосы, соответствующие электронным наводкам и механическим помехам, внесенным измерительной и записывающей аппаратурой. Однако, в силу того, что характерный временной масштаб таких помех существенно отличается от временного масштаба цикла дыхания, при визуальном восприятии они легко “отфильтровываются” от полезного сигнала.

В заключение хотелось бы отметить, что проведение объективной акустической классификации шумов дыхания человека и установление механиз-

ма генерации этих шумов представляют не только большой научный интерес, но и огромное практическое значение. Решение этих проблем позволило бы вплотную приблизиться к реализации автоматизированных комплексов для диагностики респираторных заболеваний, которые явились бы новым эффективным инструментом в руках врача.

ВЫВОДЫ

1. Представлен ретроспективный взгляд на проблемы и методы объективизации аускультативных признаков шумов дыхания человека за последние двадцать лет.
2. Систематизированы современные данные о причинах возникновения основных и ряда дополнительных шумов дыхания.
3. Проведено сопоставление отечественной и зарубежной номенклатуры в части основных респираторных звуков, а также сухих и влажных хрипов.
4. На конкретных примерах продемонстрированы современные возможности объективизации аускультативных признаков шумов дыхания.

5. Предпринята попытка объективной классификации сухих хрипов на основе анализа соотношений между частотами их спектральных составляющих.
1. Большая медицинская энциклопедия.– М.: Сов. Энцикл., 1975.– Т. 2.– С. 366–368.
2. Большая медицинская энциклопедия.– М.: Сов. Энцикл., 1975.– Т. 7.– С. 532–534.
3. Антомонов Ю. Г. Моделирование биологических систем. Справочник.– К.: Наук. думка, 1977.– 260 с.
4. Ржевкин С. Н. Слух и речь в свете современных физических исследований.– М.-Л.: ОНТИ НКТП СССР, 1936.– 336 с.
5. Зислин Д. М., Розенблат В. В., Лихачева Е. И. Объективное исследование дыхательных шумов с помощью частотного анализа // Терапевт. архив.– 1969.– 41, N 11.– С. 108–112.
6. Замотаев И. П., Магазаник Н. А., Водолазский Л. А., Голиков В. А., Щедрина О. И. Спектральный анализ важнейших аускультативных признаков // Клин. мед.– 1974.– 52, N 5.– С. 97–101.
7. Gavriely N., Palti Y., Alroy G. Spectral characteristics of normal breath sounds // J. Appl. Physiol.– 1981.– 50, N 2.– P. 307–314.
8. Urguhart R. B., McGhee J., Macleod J. E. S., Banham S.W., Moran F. The diagnostic value of pulmonary sounds: a preliminary study by computer-aided analysis // Comput. Biol. Med.– 1981.– 11, N 3.– P. 129–139.
9. Makoto Yonemary, Koji Kikuchi, Masaaki Mori, Akira Kawai, Tadashi Abe, Takeo Kawashiro, Tsuneo Ishihara, Tetsuro Yokoyama Detection of tracheal stenosis by frequency analysis of tracheal sounds // J. Appl. Physiol.– 1993.– 72, N 2.– P. 605–612.
10. Gavriely N., Irving C. S. Tracheal whistles – a new physical sign of airway constriction // Proc. 24-th Int. Lung Sounds Conf.– Marburg: Inst. of Physiology, 1999.– P. 17.
11. Вовк И. В., Гринченко В. Т., Красный Л. Г., Макаренко А. П. Проблемы регистрации и классификации шумов дыхания человека // Акуст. ж.– 1994.– 40, N 1.– P. 750–756.
12. Iyer V. K., Ramamoorthy P. A., Ploysongsang Y., Fan H. Reduction of heart sounds from lung sounds by adaptive filtering // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 1986.– ВМЕ-33, N 12.– P. 1141–1148.
13. Charbonneau G., Raccineux J. L., Subraud M., Tuchais E. An accurate recording system and its use in breath sounds spectral analysis // J. Appl. Physiol.– 1983.– 55, N 4.– P. 1120–1127.
14. Cohen A., Landsberg D. Analysis and automatic classification of breath sounds // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 1984.– ВМЕ-31, N 9.– P. 585–589.
15. Pasterkamp H., Carson C., Daien D., Oh Y. Digital respirosography. New images of lung sounds // Chest.– 1989.– 96, N 6.– P. 1405–1412.
16. Применение цифровой обработки сигналов.– М.: Мир, 1980.– 552 с.
17. Understanding digital breath sounds technology.– Israel: Karmel Medical Acoustic Technologies LTD, Sensor Medics, 1999 (CD-ROM).
18. Pasterkamp H. Neue entwicklungen und erkenntnisse bei der erforschung von atemgeräuschen // Pneumologie.– 1992.– 46, Dezember.– S. 602–611.
19. Вовк И. В., Дахнов С. Л., Крижановский В. В., Олійник В. Н. Возможности и перспективы диагностики легочных патологий с помощью компьютерной регистрации и обработки шумов дыхания // Акуст. вісн.– 1998.– 1, N 2.– С. 21–33.
20. Гринченко В. Т., Глєбова Л. П., Майданник В. Г., Макаренко А. П., Рудницький А. Г. Комп'ютерні методи обробки аускультативних даних // Педіатрія, акушерство та гінекологія.– 1998.– N 5.– С. 29–33.
21. Melbye H., in coop. with Loudon R. G. Lung sounds and lung function (a guide to the video).– Oslo: The Norwegian Medical Association, 1999.– 28 p.
22. Ковалевский А. А. Перкуссия и аускультация.– Томск: Изд-во Томского ун-та, 1961.– 170 с.
23. Вовк И. В., Гринченко В. Т., Дахнов С. Л. Влияние физиологических особенностей дыхательных путей на характеристики шумов дыхания // Акуст. вісн.– 1998.– 1, N 3.– С. 14–23.
24. Вовк И. В., Вовк О. И. О возможности физического моделирования шумов, генерируемых потоком воздуха в элементах дыхательных путей человека // Акуст. вісн.– 1999.– 2, N 2.– С. 11–25.
25. Смольяков А. В., Ткаченко В. М. Измерение турбулентных пульсаций.– Л.: Энергия, 1980.– 264 с.
26. Sanaa A. Abdallah, Ned H. C. Hwang Arterial stenosis murmurs: An analysis of flow and pressure fields // J. Acoust. Soc. Amer.– 1988.– 83, N 1.– S. 318–334.
27. Вейбель Э. Р. Морфометрия легких человека.– М.: Медицина, 1970.– 175 с.
28. Kraman S. S., Austrheim O. Comparison of lung sound and transmitted sound amplitude in normal men // Amer. Rev. Respir. Dis.– 1983.– 128, N 3.– S. 451–454.
29. Wodicka G. R., Stevens K. N., Golub H. L., Cravallo E. G., Shannon D. C. A model of acoustic transmission in the respiratory system // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 1989.– 36, N 9.– S. 925–933.
30. Ploysongsang Y., Iyer V. K., Ramamoorthy P. A. Reproducibility of the vesicular breath sounds in normal subjects // Respiration.– 1991.– 58.– P. 158–162.
31. Уэст Дж. Физиология дыхания. Основы.– М.: Мир, 1988.– 200 с.
32. Самойлов В. О., Пономаренко Г. Н., Енин Л. Д. Низкочастотная биоакустика.– С.-Пб.: Ревверс, 1994.– 215 с.
33. Cohen A., Berstein A. D. Acoustic transmission of the respiratory system using speech stimulation // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 1991.– 38, N 2.– S. 126–132.
34. Munakata M., Ukita H., Doi I., Ohtsuka Y., Masaki Y., Homma H., Kawakami Y. Spectral and waveform characteristics of fine and coarse crackles // Amer. Rev. Respir. Dis.– 1990.– 141, N 4, Pt. 4 (suppl).– S. A226.
35. Hoevers J., Loudon R. G. Measuring crackles // Chest.– 1990.– 98 N 5.– S. 1240–1243.
36. Walshaw M. J., Nisar M., Pearson M. G., Calverley P. M. A., Earis J. E. Expiratory lung crackles in patients with fibrosing alveolitis // Chest.– 1990.– 97 N 2.– S. 407–409.

37. Ono M., Arakawa K., Mori M., Sugimoto T., Harashima H. Separation of fine crackles from vesicular sounds by a nonlinear digital filter // IEEE Trans. Biomed. Eng.– 1989.– **36**, N 2.– S. 286–291.
38. Fredberg J. J., Holford S. K. Discrete lung sounds: crackles (rales) as stress-relaxation quadrupoles // J. Acoust. Soc. Amer.– 1983.– **73**, N 3.– S. 1036–1046.
39. Shah P. D., Ludemann J. P., Holinger L. D. Wheezing in children. Part 1: is obstruction the cause? // J. Respir. Dis.– 1999.– N 5.– S. 365–368.
40. Блохинцев Д. И. Акустика неоднородной движущейся среды.– М.: Наука, 1981.– 206 с.
41. Gavriely N., Shee T. R., Cugell D. W., Grotberg J. B. Flutter in flow-limited collapsible tubes: a mechanism for generation of wheezing // J. Appl. Physiol.– 1989.– **66**, N 5.– S. 2251–2261.
42. Grotberg J. B., Gavriely N. Flutter in collapsible tubes: a theoretical model of wheezing // J. Appl. Physiol.– 1989.– **66**, N 5.– S. 2262–2273.
43. Beck R., Gavriely N. The reproducibility of forced expiratory wheezing // Amer. Rev. Respir. Dis.– 1990.– **141**, N 5.– S. 1418–1422.
44. Grotberg J. B., Shee T. R. Compressible-flow channel flutter // J. Fluid Mech.– 1985.– **159**– S. 175–193.
45. Gavriely N., Kelly K. B., Grotberg J. B., Loring S. H. Critical pressures required for generation of forced expiratory wheezing // J. Appl. Physiol.– 1989.– **66**, N 3.– S. 1136–1142.
46. Белявский А. Г. Теория звука в приложении к музыке.– М.-Л.: Госиздат, 1925.– 239 с.