

УДК 534.7+612.2:613.9

ВОЗРАСТНАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ЗВУКОВ ДЫХАНИЯ У ЗДОРОВЫХ ДЕТЕЙ

Е. А. ЕМЧИНСКАЯ¹, А. А. МАКАРЕНКОВА^{2*}

¹Киевский национальный медицинский университет им. А. А. Богомольца
бульвар Тараса Шевченка, 13, 01601, Киев, Украина

²Институт гидромеханики НАН Украины, Киев
ул. Желябова, 8/4, 03680, ГСП, Киев-180, Украина

*E-mail: maa@mail.ru

Получено 06.06.2012

Приведены результаты акустического анализа звуков дыхания у здоровых детей трех возрастных групп, записанных в клинических условиях с помощью специализированных датчиков, разработанных в Институте гидромеханики НАН Украины. На базе этих данных выделены характерные частотные и временные признаки респираторных сигналов, изменяющиеся с возрастом, и установлены соответствующие им количественные параметры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: звуки дыхания, возрастные изменения, частотно-временной анализ, диагностические признаки

Наведені результати акустичного аналізу звуків дихання у здорових дітей трьох вікових груп, записаних у клінічних умовах за допомогою спеціалізованих сенсорів, розроблених в Інституті гідромеханіки НАН України. На базі цих даних виділено характерні частотні й часові ознаки респираторних сигналів, які змінюються з віком, і встановлено відповідні їм кількісні параметри.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: звуки дихання, вікові зміни, частотно-часовий аналіз, діагностичні ознаки

The paper deals with the results of acoustic analysing the respiratory sounds from healthy children from three age groups recorded in clinical conditions by means of specialized sensors created at the Institute of Hydromechanics of NAS of Ukraine. On the basis of these data, the characteristic frequency and time features changing with age are detected and the corresponding quantitative parameters are distinguished.

KEY WORDS: respiratory sounds, age-related changes, frequency-time analysis, diagnostic features

ВВЕДЕНИЕ

Для регистрации звуков дыхания и звуков сердца врачами широко используются хорошо освоенные и надежные акустические приборы – стетофонендоскопы, а опосредованная аускультация уже почти два столетия остается неотъемлемой частью медицинской диагностики. Однако существенная неравномерность и нелинейность амплитудно-частотной характеристики, одноканальность и невозможность усиления полезного сигнала не позволяют считать данный инструмент измерительным акустическим устройством [1]. Более того, с помощью стетофонендоскопа возможно только субъективное восприятие врачом звукового сигнала и получение лишь качественных оценок содержащейся в нем полезной информации.

Развитие акустоэлектроники и информационных цифровых технологий привело к созданию многоканальных электронных средств регистрации, обработки и анализа звуков жизнедеятельности, которые позволяют исследовать звуки дыхания не только качественно, но и количественно.

При этом объективные данные об их акустических характеристиках отображаются в удобной визуальной форме [2]. Такие компьютеризованные акустические комплексы успешно применяются в научной и практической медицине. На этой принципиально новой инструментальной базе разработаны и внедрены новые экологически безопасные методы диагностики бронхолегочных заболеваний [3–5].

Изучение характеристик основных звуков дыхания у здоровых детей в процессе развития представляет большой научный интерес для уточнения их связи с морфологическими изменениями бронхолегочной системы при взрослении. С практической же точки зрения эти данные важны для повышения селективной эффективности диагностики респираторных заболеваний.

1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Данное исследование выполнено в детской клинике № 6 г. Киева. Обследованы 40 здоровых детей в возрасте от 3 до 17 лет. Все они длитель-

ное время находились под наблюдением врача-педиатра, были предварительно верифицированы стандартными клиническими методами и разделены на возрастные группы в соответствии с анатомически-физиологическими особенностями дыхательной системы. Возрастной и количественный состав групп представлен в табл. 1. Патологий органов дыхания при клиническом мониторинге обнаружено не было.

Исследования возрастной трансформации звуков дыхания осуществлялись с помощью компьютерного фоноспирографического комплекса “КоРА-03М1” [2]. Сигналы регистрировались синхронно в четырех точках грудной клетки (рис. 1):

- на уровне второго межреберья по среднеподключичной линии справа и слева – точки 2П и 2Л соответственно;
- на уровне седьмого межреберья под углом лопатки справа и слева – точки 7П и 7Л соответственно.

Всего было получено 160 звуковых образов.

Точки для проведения регистрации были выбраны на основе предыдущих исследований [7] как наиболее информативные по критерию сигнал/помеха на поверхности грудной клетки, т. е. там, где лучше всего выслушиваются звуки дыхания. Крепление датчиков к поверхности грудной клетки осуществлялось двусторонним тонким медицинским лейкопластырем фирмы 3М.

В качестве датчиков использовались высокочувствительные электроакустические приемники колебательного ускорения с рабочим диапазоном частот (60...2000) Гц, преобразующие вызванные звуками дыхания колебания поверхности тела в переменное электрическое напряжение. Полученный аналоговый сигнал через усилители и фильтры поступал на аналого-цифровой преобразователь и далее, в цифровой форме – в компьютер.

Пополнение электронной базы звуков дыхания и цифровая обработка осуществлялись с помощью специально разработанного для фоноспирографического комплекса “КоРА-03М1” программного продукта “Пульмонолог” [2]. Последний позволяет преобразовать звуковые образы в зрительные и получать временные, частотно-временные и корреляционные зависимости, которые могут храниться в памяти компьютера или распечатываться на принтере [2]. Основное преимущество такой формы представления заключается в том, что опорный частотно-временной визуальный образ – фоноспирограмма – весьма наглядно отображает динамику “мгновенных” спектров звуков дыхания

подобно тому, как она воспринимается врачом в процессе аускультации [6]. Графики других акустических характеристик дополняют эту информацию.

Запись звуков дыхания проводилась в режиме спокойного дыхания, пациент сидел. Длительность записи составляла 18 секунд. Для уменьшения нежелательных помех (внешних звуков и электромагнитных наводок) эта процедура выполнялась в малозагрожденном помещении, вблизи которого в других комнатах отсутствовала какая-либо работающая аппаратура.

Как уже указывалось, наиболее информативной формой визуального представления звуков дыхания оказалась фоноспирограмма (трехмерный частотно-временный спектр). Анализ фоноспирограмм позволил определять следующие характеристики:

- длительность дыхательного цикла и его фаз – вдоха, выдоха и паузы;
- соотношение времени выдоха к времени вдоха ($T_{\text{выдох/вдох}}$);
- диапазон частот, характерных для звуков дыхания;
- интенсивность звуков дыхания.

Табл. 1. Возрастной состав групп обследованных детей

Возрастная группа	Всего	
	чел.	%
I (3–6 лет)	13	32.5
II (7–11 лет)	14	35
III (12–17 лет)	13	32.5
Всего	40	100

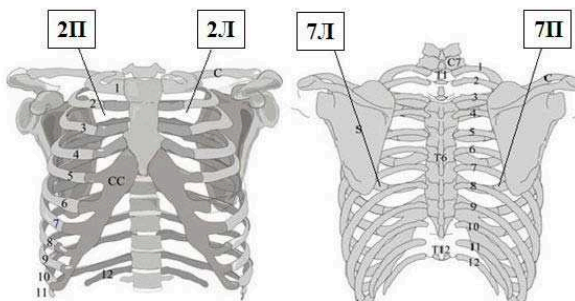


Рис. 1. Точки регистрации звуков дыхания

2. КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ

Сравнительный анализ фоноспирограмм здоровых детей разных возрастных групп выявил значительные отличия в длительности вдоха, выдоха и дыхательной паузы. Эти результаты представлены на рис. 2 в виде гистограмм. Для каждой возрастной группы приведены усредненные длительности каждой из фаз и полного дыхательного цикла.

Длительность дыхательного цикла у детей в возрасте от 3 до 6 лет составляла в среднем 2.2 с, что соответствует частоте дыхания 27 ± 1.5 циклов в минуту. Во второй возрастной группе (от 7 до 11 лет) длительность дыхательного цикла была 2.75 с (частота дыхания 21 ± 0.5 циклов в минуту), а в третьей (12–17 лет) – 3.3 с (частота дыхания 18 ± 0.5 с).

Как известно, количество дыхательных движе-

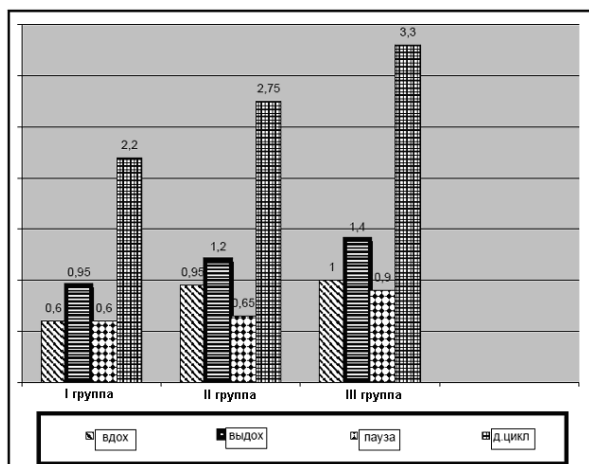


Рис. 2. Длительность фаз дыхания и дыхательного цикла разных возрастных групп здоровых детей

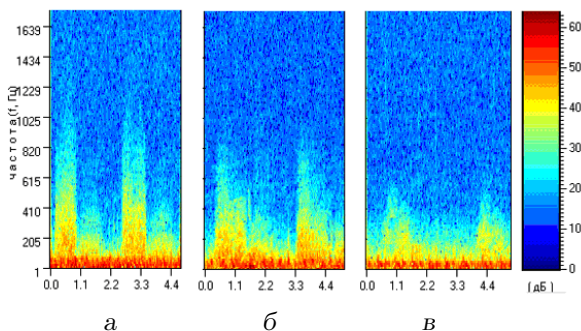


Рис. 3. Типичные фоноспирограммы звуков дыхания здоровых детей:

а – в возрасте 3 года; б – в возрасте 7 лет; в – в возрасте 12 лет

ний в минуту, главным образом, обусловлено длительностью выдоха. Так, дети младшей возрастной группы дышали в 1.5 раза чаще, чем старшие. Следует отметить, что у обследованных детей старше 12 лет длительность дыхательного цикла увеличивалась также за счет выдоха, который возрастал до 1.4 с, и дыхательной паузы (0.9 с).

Рассмотрим результаты исследований спектральных характеристик звуков дыхания здоровых детей разных возрастных групп. Типичные их примеры представлены на рис. 3. Установлено, что частотные диапазоны дыхательных шумов у здоровых детей в попарно симметричных точках слева и справа (рис. 4) близки и различаются не более, чем на $\pm 5\%$.

Выявлено, что частотный диапазон звуков дыхания определяется возрастом детей. Как известно, процесс их генерации осуществляется за счет периодического движения вдыхаемого и выдыхаемого воздуха. Как правило, уровни спектральных составляющих на вдохе существенно превышают уровни на выдохе. Это наглядно видно из табл. 2, в которой представлены усредненные по возрастным группам значения верхних границ частотных диапазонов звуков дыхания детей на вдохе и выдохе, зарегистрированные в различных точках грудной клетки.

Как явствует из таблицы, частотная полоса звуков дыхания у детей младшей возрастной группы составляла в средней 1000 Гц на вдохе и 625 ± 50 Гц на выдохе (см. также рис. 3, а). В возрасте 7–11 лет частотный диапазон вдоха сокращается до 815 ± 30 Гц, а выдоха – до 425 ± 30 Гц соответственно (см. рис. 3, б). У детей, достигших 12–17 лет, частотная полоса звуков на вдохе ограничивалась 585 ± 20 Гц, а на выдохе – 265 ± 20 Гц (см. рис. 3, в). При этом частотные диапазоны сигналов, записанных в точках 7П и 7Л, были несколько уже, чем в точках 2П и 2Л. Таким образом, у детей старше 12 лет частотные характеристики основных звуков дыхания соответствуют вежиккулярному дыханию взрослого человека. Эта закономерность наглядно прослеживается на рис. 5, показывающем возрастную динамику частотного диапазона вдоха и выдоха у детей.

Остановимся на рассмотрении изменения усредненной интенсивности звуков дыхания (по терминологии пульмонологов – громкости). Из анализа фоноспирограмм следует, что у здоровых детей в первой и второй группе на вдохе она практически одинакова. Следует, однако, обратить внимание, что интенсивность в первой группе представлена в более широкой полосе частот – от 100 до 700 Гц, в то время как во второй – от 90 до 500 Гц. У детей

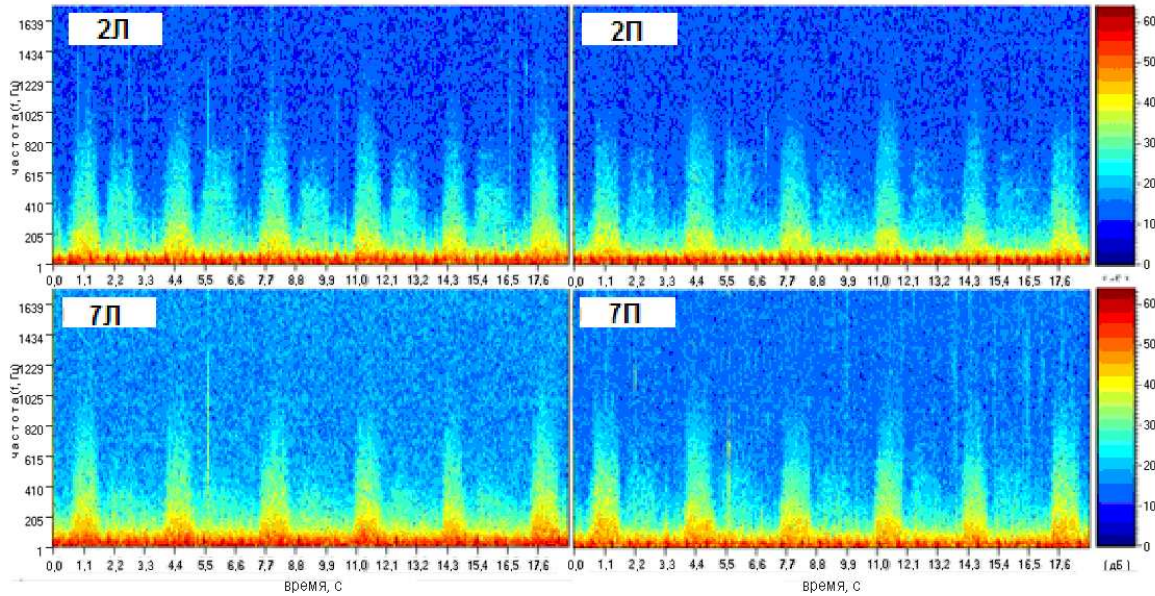


Рис. 4. Фоноспирограммы звуков дыхания здорового ребенка в возрасте 5 лет (точки регистрации указаны на графиках)

Табл. 2. Верхняя граница частотного диапазона дыхательных шумов детей разных возрастных групп

Возрастная группа	Вдох		Выдох	
	2Л и 2П	7Л и 7П	2Л и 2П	7Л и 7П
I (3–6 лет)	1025±50 Гц	980±30 Гц	670±40 Гц	580±50 Гц
II (7–11 лет)	820±30 Гц	810±30 Гц	480±30 Гц	370±30 Гц
III (12–17 лет)	610±20 Гц	560±20 Гц	320±20 Гц	210±20 Гц

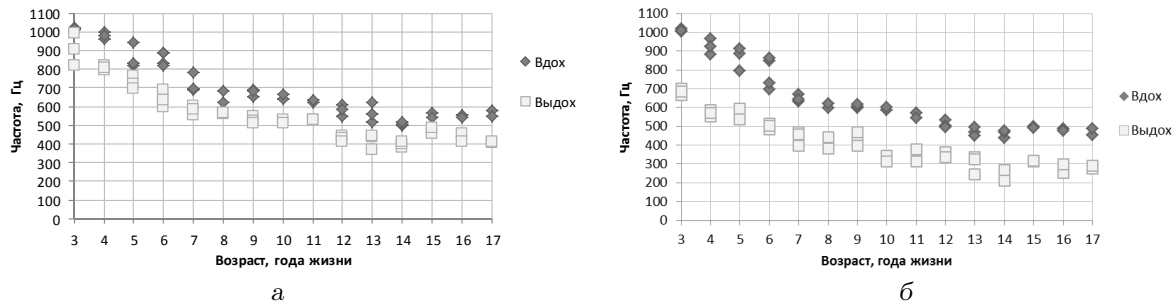


Рис. 5. Возрастная динамика верхней границы частотного диапазона у детей при вдохе и выдохе: а – точки 2Л и 2П; б – точки 7Л и 7П

третьей возрастной группы интенсивность звуков дыхания на вдохе оказалась на (4...5) дБ ниже, чем у двух первых. На выдохе различие интенсивности звуков дыхания для всех трех групп лежит в пределах (2...3) дБ.

Кроме того, исследовался индекс $I_{\text{выдох/вдох}}$ для разных возрастных групп (табл. 3). Для детей в

возрасте от 3 до 6 лет получено $I_{\text{выдох/вдох}} = 1.6$. Такое соотношение продолжительности выдоха к вдоху служит дополнительным подтверждением наличия более интенсивного и широкополосного (пуэрильного) дыхания в данной группе. У детей старше 12 лет данный индекс соответствует везикулярному дыханию взрослого человека.

Табл. 3. Соотношение длительности выдоха к вдоху у детей разных возрастных групп

Возрастная группа	$I_{\text{выдох/вдох}}$
I (3–6 лет)	1.6
II (7–11 лет)	1.33
III (12–17 лет)	1.4

3. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде чем перейти к обсуждению полученных результатов, кратко рассмотрим анатомические особенности бронхолегочной системы у детей. Органы дыхания у детей разных возрастных групп имеют анатомические, морфологические и функциональные особенности, которые в процессе развития организма существенно изменяются [6, 8–10].

У детей до 6 лет голосовая щель узкая, голосовые связки короткие. Трахея имеет достаточно малый диаметр, ее верхний конец находится на уровне V шейного позвонка у детей трехлетнего возраста, постепенно опускаясь до уровня VII шейного позвонка к 15 годам. Трахея состоит из 16–20 хрящевых полуколец, количество которых с возрастом не меняется, но они становятся более жесткими.

Бронхи у детей короткие и меньшего диаметра, чем у взрослых. Бифуркация главных бронхов у детей первой возрастной группы расположена выше, чем у взрослых, а именно, на уровне III позвонка (у взрослых – на уровне V позвонка). Правый бронх является непосредственным продолжением трахеи и отходит почти вертикально, а левый – под углом 90°. Хрящи бронхов – достаточно развитые, мягкие, но с возрастом ужесточаются. Мышечная и эластичная ткани бронхов слабо развиты. Диаметр бронхов, бронхиол у детей 3–5 лет в два–три раза меньше, чем у детей 14–16 лет.

Как и у взрослых, левое и правое легкое у детей разделены соответственно на две (верхняя, нижняя) и три (верхняя, средняя, нижняя) части. Следует отметить, что развитие отдельных частей легких происходит неравномерно. Сегментарное строение легких у детей такое же, как и у взрослых. Объем легких у детей трехлетнего возраста в 15 раз меньше, чем в юношеском возрасте (15–17 лет). Рост легких происходит за счет ветвления мелких бронхов и бронхиол.

Отмечая морфологические особенности легких детей, необходимо подчеркнуть, что альвеолы у них в раннем возрасте однокамерные, а альвео-

лярные ходы широкие. Размеры альвеол у трехлетних детей в четыре раза меньше, чем у взрослых, а общее количество их приблизительно в 12–15 раз меньше. Новые альвеолы наиболее интенсивно растут в течение первых двух лет жизни и этот процесс завершается к 8 годам. Увеличиваются и размеры самих альвеол. Все это и определяет функциональные особенности системы дыхания у детей разного возраста [6].

Дыхание у детей частое и поверхностное. С возрастом частота дыхания уменьшается, а длительность дыхательного цикла возрастает, поскольку увеличиваются количество альвеол и суммарная площадь их поверхности. С шести–семи летнего возраста начинают проявляться половые отличия в типах дыхания: у девочек преобладает грудное, а у мальчиков – брюшное дыхание [8]. Половая дифференциация типов дыхания заканчивается к 15–17 годам.

Даже такой краткий экскурс в развитие бронхолегочной системы с возрастом позволяет утверждать, что общая протяженность дыхательных путей и их диаметры у детей значительно меньше, чем у взрослых. Эти морфологические особенности должны влиять на процессы генерации и распространения звуков дыхания у детей в возрасте от 3 до 17 лет. Действительно, результаты наших исследований показали, что процесс дыхания и сопутствующие ему акустические феномены претерпевают существенные изменения как по усредненным характеристикам внешнего дыхания (длительности цикла дыхания и его фаз), так и по расходу вдыхаемого воздуха. Однако наиболее контрастные различия наблюдаются в спектральном составе и интенсивности звуков для разных возрастных групп.

В ходе исследования посредством традиционных механических стетофонендоскопов осуществлялось контрольное выслушивание звуков дыхания здоровых (согласно заключению медиков) детей всех трех возрастных групп тремя опытными пульмонологами. Согласно их выводам, в первой группе у семи детей (в возрасте от 3 до 4 лет) было выявлено пуэрильное дыхание, а у остальных шести – везикулярное. Во второй и третьей группах выслушивалось везикулярное дыхание, однако во второй группе, по мнению экспертов, были слышны более высокие тона, чем в третьей.

Пульмонологи считают, что пуэрильное дыхание на слух можно охарактеризовать как звуковые явления, у которых высокие звуки представлены более полно, чем в везикулярном, а их громкость несколько выше. У детей в возрасте от 3 до 6 лет происходит переход пуэрильного дыхания к уси-

ленному везикулярному, которое к 14–15 годам становится нормальным везикулярным.

Исследования, проведенные с помощью фonoспирографического компьютерного комплекса “КоРА-03М1”, подтвердили наличие количественных и качественных отличий в акустических характеристиках звуков дыхания для детей всех трех возрастных групп. Обнаруженное при этом сужение частотной полосы таких звуков при взрослении можно объяснить следующим образом.

Как известно, количество альвеол, которыми заканчиваются бронхиолы у детей, на порядок меньше, чем у взрослых [11] – $8 \cdot 10^7$ у детей 3–6 лет и $8 \cdot 10^8$ у детей 15–17 лет. Более того, у детей младшей возрастной группы бронхиолы оканчиваются всего двумя–тремя альвеолами. Эти морфологические различия приводят к тому, что у трехлетнего ребенка объемный расход Q воздуха при дыхании составляет ~ 40 мл/с, а у десятилетнего – ~ 80 мл/с, т. е. в 2 раза выше [6].

Верхняя частота звука f , генерируемая в воздухопроводных путях человека, пропорциональна V/d , где V – скорость потока; d – диаметр воздуховода [12]. Очевидно, что при постоянной скорости вдыхаемого воздуха с увеличением диаметра характерные частоты должны снижаться. Кроме того, $V \sim QS$, где S – площадь сечения бронха. Так как V обратно пропорциональна площади (а значит и квадрату диаметра) воздухопроводного канала, то в процессе взросления f будет уменьшаться пропорционально $1/d^3$. Это в целом не противоречит тенденции, наблюдаемой при сопоставлении фonoспирограмм на рис. 3, а и в.

Как следует из соотношений объемных расходов и поперечных размеров бронхов, усредненная скорость воздуха в респираторной системе трехлетнего ребенка оказывается примерно в два раза выше, чем у десятилетнего (здесь не учтены коэффициенты гидравлического сопротивления). Положим, что пульсации давления в основных воздухопроводных путях имеет порядок $P \sim V^{1.8}$ [13]. Отсюда следует, что уровень звуков дыхания трехлетнего ребенка должен быть примерно в четыре раза выше, чем у десятилетнего. Этот вывод также подтверждается на качественном уровне полученными нами результатами.

Все это позволяет предположить, что у детей раннего возраста (2–4 лет) основным источником звуков усиленного везикулярного (или пуэрильного) дыхания будут не колебания стенок альвеол, а движение воздуха в бронхах и бронхиолах проводящей зоны (третья–шестнадцатая генерации), турбулизующегося за счет прохождения их бифуркаций и смешения струй. Кроме того, небольшой

поперечный размер грудной клетки ребенка и малое количество альвеол в легких способствуют лучше, чем у взрослых, прохождению звуков, генерируемых в воздухопроводных путях, на поверхность грудной клетки.

ВЫВОДЫ

1. Характер звуков дыхания с возрастом претерпевает существенные изменения как по частотному диапазону, так и по интенсивности.
2. В раннем детском возрасте (от 3 до 6 лет) на вдохе преобладают высокочастотные интенсивные звуки (по терминологии пульмонологов – звуки пуэрильного дыхания, что соответствует усиленному везикулярному дыханию).
3. Начиная со среднего детского возраста (7–12 лет), происходит постепенная трансформация звуков дыхания: сужается диапазон характерных частот и интенсивность, т. е. осуществляется переход от усиленного к обычному везикулярному дыханию, которое преобладает у детей 15–17 лет.
4. На основании полученных результатов и с учетом возрастных морфологических изменений бронхолегочной системы здоровых детей предложена рабочая гипотеза, объясняющая процессы генерации звуков везикулярного дыхания. По нашему мнению, у детей в возрасте 3–6 лет основной вклад в уровень сигнала вносят процессы взаимодействия потоков воздуха с элементами бронхолегочной системы (турбулизация в местах бифуркаций, смешение струй), а не колебания стенок альвеол, количество которых в этом возрасте на порядок меньше, чем у детей 15–17 лет.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность академику АМН Украины профессору В. Г. Майданнику за предоставленную возможность проведения исследований и ведущему научному сотруднику Института гидромеханики НАН Украины, канд. техн. наук А. П. Макаренкову за ряд ценных предложений и замечаний, учтенных при написании статьи.

1. Abella M., Formolo J., Penney D. G. Comparison of the acoustic properties of six popular stethoscopes // J. Acoust. Soc. Amer. – 1992. – 91. – P. 2224–2228.

2. Комплекс фonoспирографический компьютерный "КоРА-03М1".– Технические условия.– ТУ УЗЗ.1 05417354 001: 2006.
3. Вовк И. В., Дахнов С. Л., Крижановский В. В., Олейник В. Н. Возможности и перспективы диагностики легочных патологий с помощью компьютерной регистрации и обработки шумов дыхания // Акуст. вісн.– 1998.– 1, № 2.– С. 21–33.
4. Майданник В. Г., Хайтович Н. В., Глебова Л. П., Емчинская Е. А., Макаренкова А. А., Макаренко А. П. Способ акустической диагностики пневмоний у детей. – Пат. 57221 Україна, МПК 7 А61 В7/00 // Бюл. № 3, 10.02.2011.
5. Кулаков Ю. В. Акустическая диагностика заболеваний легких: Возможности методов и перспективы развития экспертизы нового типа // Тихоокеан. мед. ж.– 2008.– № 3.– С. 66–69.
6. Чеботарьова В. Д., Майданник В. Г. Пропедевтична педіатрія.– К.: Здоров'я, 1999.– 578 с.
7. Емчинская Е. А., Косовец Л. И., Макаренкова А. А. Объективизация дополнительных звуков дыхания у детей с бронхолегочными заболеваниями // Акуст. вісн.– 2010.– 13, № 4.– С. 23–33.
8. Васильев В. Н., Капилевич Л. В. Физиология дыхания. Лекции по физиологии.– Томск: Чародей, 2009.– 36 с.
9. Gehr P., Heyder J., Eds. Particle-lung interactions. Lung biology in health and disease.– New York: Marcel Dekker, 2000.– 815 p.
10. Churchill Livingstone Gray's anatomy for students.– New York: Elsevier, 2007.– 1150 p.
11. Катиллов А. В., Зайков С. В., Дмитриев Д. В. Дискуссионные вопросы методики оценки аускультации легких у детей // Дитячий лікар.– 2011.– № 5.– С. 19–26.
12. Борисюк А. О. Акустика течій у каналах з локальними нерегулярностями геометрії. Дис...докт. фіз.-мат. наук.– 01.04.06 – акустика.– К.: Ін-т гідромех. НАН України, 2006.
13. Петровский В. С. Гидродинамические проблемы турбулентного шума.– Л.: Судостроение, 1966.– 252 с.