

Трахеальные шумы форсированного выдоха человека: происхождение и диагностические приложения

В. И. Коренбаум,* И. А. Почекутова, В. В. Малаева, М. А. Сафронова, А. Е. Костив
Тихоокеанский океанологический институт имени В. И. Ильичева ДВО РАН
Россия, 690041 Владивосток, ул. Балтийская, д. 43
(Статья поступила 16.07.2017; Подписана в печать 18.09.2017)

Форсированный выдох человека сопровождается характерными дыхательными шумами, содержащими широкополосные и узкополосные составляющие. Освещены акустические представления о происхождении и характеристиках шумов форсированного выдоха, полученные в последнее десятилетие. Анализируются акустико-биомеханические взаимосвязи форсированного выдоха, преимущественные механизмы и зоны формирования шумов. Разработанные акустические модели и эмпирически установленные феномены позволили предложить набор акустических параметров, оказавшихся перспективным для функциональной диагностики вентиляционной функции легких как в общемедицинских целях, так и при контроле состояния лиц, находящихся в экстремальных условиях.

PACS: 43.80.+р, 87.18.Tt, 87.19.ug. УДК: 534.7, 612.216.2

Ключевые слова: шумы, форсированный выдох, механизмы, источники, функциональная диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Форсированный выдох (ФВ) — дыхательный маневр, который нашел широкое применение в спирометрической диагностике дыхательной функции. Шумы ФВ — мощный биоакустический сигнал, несущий в себе биомеханическую и физиологическую информацию — характеризуется высокими значениями интенсивности и значительно «большим соотношением сигнал/помеха», чем шумы спокойного дыхания, обычно используемые в медицине при аускультации легких. По этим причинам шумы ФВ активно исследуются в диагностических целях. Тем не менее, механизмы формирования шумов ФВ и уровни бронхиального дерева, ответственные за их происхождение, как и возможности применения параметров шумов ФВ для диагностики и мониторинга состояния дыхательной системы человека продолжают активно дискутироваться.

Целью работы является разработка уточненных акустических представлений о происхождении и характеристиках шумов ФВ, регистрируемых над трахеей, и создание на их основе оригинальных методов акустической диагностики и мониторинга вентиляционной функции легких.

1. ПРОИСХОЖДЕНИЕ ШУМОВ ФОРСИРОВАННОГО ВЫДОХА

Шумы ФВ отличаются от шумов спокойного дыхания увеличением интенсивности широкополосной составляющей и появлением дополнительных узкополосных компонент — интенсивных свистов, называемых

свистами форсированного выдоха (СФВ) [1]. При регистрации дыхательных шумов ФВ на поверхности шеи над трахеей имеют место два механизма формирования регистрируемого сигнала [2]. Первый из них определяется суперпозицией собственно акустических шумов, излучаемых по просвету проводящих дыхательных путей. Этот механизм предполагает распространение акустического сигнала к датчику от удаленных источников в бронхиальном дереве по воздушному просвету и создание внутри трахеи акустического давления. Вторым механизмом является гидродинамическое или так называемое псевдозвуковое воздействие турбулентных пульсаций давления вихревого потока на внутреннюю стенку трахеи, создающее в области установки акустического датчика усредненное гидродинамическое давление. В отличие от первого (акустического) механизма в этом случае не требуется сжимаемости воздушной среды, а регистрируемые сигналы пропорциональны гидродинамическому давлению в вихревом потоке, усредненному по проекции поверхности восприятия акустического датчика.

СФВ могут быть разбиты на звуки, генерируемые зависимыми от потока механизмами (срыв вихрей, вынужденный динамический флаттер) и автоколебательными (автоколебательный флаттер, колебания смыкающей слизистой ткани). Происхождение наиболее мощных среднечастотных СВФ (400–600 Гц) связано с 0–3 уровнями ветвления бронхиального дерева, тогда как высокочастотных СВФ (выше 600–700 Гц) — с 2–6 уровнями ветвления [3].

2. АКУСТИКО-БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ФОРСИРОВАННОГО ВЫДОХА

Основной метод исследования — сопоставление параметров трахеальных шумов ФВ с результатами оценки биомеханических характеристик функции внешнего

*E-mail: v-kor@poi.dvo.ru

дыхания, впервые полученными не только с помощью спирометрии, но и бодиплетизмографии (MasterScreen Body, Jager). Трахеальные шумы ФВ регистрировались с помощью разработанного нами портативного аппаратно-программного комплекса [4]. В качестве акустических параметров предложено вычислять общую продолжительность шумов ФВ в полосе частот 200–2000 Гц, продолжительности и энергии шумов в отдельных 200-х Гц полосах этого диапазона. Исследования проведены на выборке из 230 человек обоего пола, включавшей здоровых испытуемых, лиц с факторами риска развития хронических заболеваний органов дыхания, больных, страдающих бронхиальной астмой (БА) и хронической обструктивной болезнью легких (ХОБЛ).

С помощью непараметрического дисперсионного анализа выявлено статистически значимое разнонаправленное влияние фактора встречаемости и выраженности бронхиальной обструкции на акустические параметры ФВ и биомеханические показатели вентилиционной функции легких. На статистической модели, характеризуемой значимым постепенным ростом бронхиального сопротивления и остаточного объема легких, акустические продолжительности и энергии трахеальных шумов ФВ координируют как с сопротивлением спокойного выдоха, так и с остаточным объемом легких, что подтверждает развитые модельные представления о шумообразовании при форсированном выдохе у здоровых и лиц с бронхиальной обструкцией [5]. Установлена частотная избирательность зависимости акустических продолжительностей и энергий от фактора встречаемости и выраженности бронхиальной обструкции.

При корреляционном анализе выборки обследуемых впервые выявлены взаимосвязи между продолжительностями и энергиями трахеальных шумов ФВ и биомеханическими показателями вентилиционной функции легких. Причем наиболее сильные корреляционные связи отмечены между временными акустическими параметрами и сопротивлениями, отражающими преимущественно функционирование крупных дыхательных путей, а также остаточным объемом легких и его отношением к общей емкости легких, которые характеризуют состояние мелких дыхательных путей. Впервые установлена разнонаправленность корреляционных связей между акустическими параметрами трахеальных шумов ФВ и биомеханическими показателями в отдельных группах здоровых лиц, больных БА со спирометрически подтвержденной и неподтвержденной обструкцией, больных ХОБЛ.

3. АКУСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ФВ В ДИАГНОСТИКЕ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ЛЕГКИХ

Продемонстрированы не только достаточно эффективная акустическая диагностика бронхиальной об-

струкции у больных БА с помощью предложенного параметра — продолжительность трахеальных шумов ФВ в полосе частот 200–2000 Гц, (чувствительность и специфичность — около 90%), но и возможность раннего обнаружения скрытой бронхиальной обструкции, не выявляемой традиционной спирометрией [6].

В 2-мерном признаковом пространстве продолжительности трахеальных шумов ФВ в полосе частот 200–2000 Гц и энергии шумов в полосе частот 400–600 Гц, нормированной на суммарную энергию в полосе частот 200–2000 Гц, выявлено разделение больных с обструктивными заболеваниями легких (БА и ХОБЛ) на два кластера. Достоверность разделения больных подтверждается наличием статистически значимых различий в степени выраженности бодиплетизмографических/спирометрических нарушений, которые с акустических и клинико-физиологических позиций могут быть связаны с влиянием тяжести бронхиальной обструкции, обусловленной для кластера с меньшими значениями ограничением воздушного потока в более дистально расположенных бронхах [7].

При моделировании космической невесомости (антиортостатическая гипокинезия) по группе в целом выявлено статистически значимое удлинение акустической продолжительности трахеальных шумов ФВ по сравнению с исходными значениями [8]. Для группы, оставшейся в антиортостатическом положении (невесомость) до конца эксперимента, установлен дальнейший значимый рост акустического показателя. Преобладающей индивидуальной реакцией в группе, переведенной из антиортостатического в ортостатическое положение (лунная гравитация) являлось укорочение продолжительности трахеальных шумов форсированного выдоха. С помощью 2-мерного дисперсионного анализа установлена и значимо большая групповая продолжительность трахеальных шумов ФВ на модели невесомости (гипокинезии), чем на модели лунной гравитации (при ортостатической гипокинезии). Спирометрические показатели разницы между этими вариантами гипокинезии не выявили. После прекращения эксперимента общегрупповые показатели продолжительности трахеальных шумов ФВ вернулись к исходным значениям. Из акустико-физиологических соображений удлинение продолжительности трахеальных шумов форсированного выдоха на модели невесомости (антиортостатическая гипокинезия) может быть объяснено дополнительным по отношению к чисто постуральному (ортостатическая гипокинезия) ростом аэродинамического сопротивления дыхательных путей.

Для группы из 6 водолазов, совершавших подводные погружения в современных дыхательных аппаратах замкнутого цикла типа Amphora (AquaLung) в прибрежной зоне Японского моря, показано статистически значимое групповое увеличение продолжительности трахеальных шумов ФВ, свидетельствующее о неблагоприятном влиянии даже непродолжительной гипербарической гипоксии на бронхиальное сопротивление [9]. Этот эффект согласуется с данными, получен-

ными для дыхательных аппаратов замкнутого цикла предыдущего поколения ИДА-71 [10]. В то же время оценка индивидуальной реакции акустического параметра на погружение в сопоставлении с естественным внутрииндивидуальным разбросом позволила проследить особенности динамики вентиляционной функции легких каждого из водолазов, не выявляемые спирометрическими показателями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана уточненная модель шумообразования при форсированном выдохе человека. Выявлены связи акустических характеристик форсированного выдоха с биомеханикой дыхательной системы. Выделены информативные акустические параметры шумов фор-

сированного выдоха, пригодные для диагностики вентиляционной функции легких. Разработан аппаратно-программный комплекс, реализующий регистрацию шумов и оценку предложенных параметров. Премонстрировано, что контроль продолжительности трахеальных шумов ФВ в полосе частот 200–2000 Гц может быть использован в качестве простого, доступного и высокочувствительного инструментального средства для оценки вентиляционной функции легких и мониторинга воздействия экстремальных факторов (в том числе моделирования невесомости и водолазных погружений) на дыхательную систему человека.

Исследование выполнено при частичной поддержке НИР № АААА-А17-117030110041-5 по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг.

-
- [1] *Korenbaum V.I., Tagiltsev A.A., Kulakov J.V., Kilin A.S., Avdeeva H.V., Pochekutova I.A.* J Sound Vibr. 1998. **213**, N 2. P. 377.
- [2] *Коренбаум В.И., Дьяченко А.И., Почекутова И.А., Кирьянова Е.В., Шулагин Ю.А., Осипова А.А., Михайловская А.Н., Попова Ю.А., Костив А.Е., Шин С.Н.* Труды ИОФАН. 2012. **68**. С. 1823.
- [3] *Коренбаум В.И., Сафронова М.А., Маркина В.В., Почекутова И.А., Дьяченко А.И.* Акуст. Журн. 2013. **59**, N 2. С. 268.
- [4] *Korenbaum V.I., Pochekutova I.A., Kostiv A.E., Tagiltsev A.A., Shubin S.B.* IFMBE Proceedings. 2013. **39**, P. 2192.
- [5] *Почекутова И.А., Коренбаум В.И.* Физиология человека. 2007. **33**, N 1. С. 70.
- [6] *Pochekutova I.A., Korenbaum V.I.* Respirology. 2013. **18**, N 3. С. 501.
- [7] *Почекутова И.А., Коренбаум В.И., Малаева В.В.* Ульяновский медико-биологический журнал. 2016. NS4, С. 61.
- [8] *Малаева В.В., Коренбаум В.И., Почекутова И.А., Костив А.Е., Шин С.Н., Катунцев В.П., Баранов В.М.* Медицина экстремальных ситуаций. 2016. **55**, N 1. С. 40.
- [9] *Малаева В.В., Коренбаум В.И., Почекутова И.А., Катунцев В.П., Баранов В.М., Костив А.Е., Лисеенко М.В., Шин С.Н.* Ульяновский медико-биологический журнал. 2016. NS4. С. 42.
- [10] *Почекутова И.А., Коренбаум В.И.* Физиология человека. 2011. **37**, N 3. С. 76.
-

Human tracheal forced expiratory noises: origin and diagnostic application

V.I. Korenbaum^a, I.A. Pochekutova, V.V. Malaeva, M.A. Safronova, A.E. Kostiv

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute of FEB RAS. Vladivostok, 690041, Russia
E-mail: ^av-kor@poi.dvo.ru*

Human forced exhalation is accompanied by specific respiratory noise, containing broadband and narrowband components. Acoustic considerations about the origin and characteristics of forced expiratory noises obtained in the last decade are highlighted. The acoustic–biomechanical interrelations of the forced exhalation as well as primary mechanisms and noise production zones are analyzed. The developed acoustic models and empirically revealed phenomena provided to develop a set of acoustic parameters that proved to be promising for functional diagnostics of lung ventilatory function both in general medical practice and in monitoring the human respiratory status under extreme conditions.

PACS: 43.80.+p, 87.18.Tt, 87.19.ug.

Keywords: noises, forced exhalation, mechanisms, sources, ventilatory function.

Received 16 July 2017.

Сведения об авторах

1. Коренбаум Владимир Ильич — доктор техн. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (423) 237-56-98, e-mail: v-kog@poi.dvo.ru.
 2. Почекутова Ирина Александровна — доктор мед. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (423) 237-56-98, e-mail: i-roch@poi.dvo.ru.
 3. Малаева Вероника Викторовна — канд. мед. наук, науч. сотрудник; тел.: (423) 237-56-98, e-mail: vrk@mail.ru.
 4. Сафронова Мария Андреевна — канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотрудник; тел.: (423) 237-56-98, e-mail: rasskazova_m@mail.ru.
 5. Костив Анатолий Евгеньевич — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (423) 237-56-98, e-mail: kostiv@poi.dvo.ru.
-