

О ВОЗМОЖНОСТИ ДАЛЬНОМЕТРИИ ИСТОЧНИКОВ СВИСТОВ ПРИ ИНТЕНСИМЕТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ СИГНАЛОВ, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУДНОЙ КЛЕТКИ ЧЕЛОВЕКА

**В. И. КОРЕНБАУМ^{1,2}, А. А. ТАГИЛЬЦЕВ¹, С. В. ГОРОВОЙ²,
Д. И. ВЛАСОВ², А. Д. ШИРЯЕВ¹**

¹*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток*

²*Дальневосточный федеральный университет, Владивосток*

Предложен и апробирован способ интенсивметрической дальнометрии источников свистов в легких человека с поверхности грудной клетки. Разработаны математические модели для точечных источников в виде монополя, диполя и поперечного квадруполь, излучающих в ткани легких. Обсуждаются возможности и ограничения способа.

ВВЕДЕНИЕ

Локализация источников дополнительных дыхательных шумов в легких человека – актуальная для медицинской диагностики задача, которая, как правило, не может быть решена с помощью методов рентгеновской, магниторезонансной и позитронно-эмиссионной томографии. В настоящее время для этой цели находят применение лишь методы поверхностного акустического картирования [1]. В то же время задача определения местоположения источников/приемников излучения классически решается в навигации угломерным или дальномерным методами. При попытках локализации источников свистов в легких человека пока использовался только первый из этих методов – триангуляционный [2,3]. Использование интенсивметрического подхода к обработке дыхательных звуков открывает возможность применения дальномерного метода. В работах [4] была сделана попытка использования такого подхода к определению дальности до источника свиста.

Целью настоящей работы является углубление и проверка представлений [4] на основе вновь полученных экспериментальных данных.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основная идея интенсивметрического подхода к обработке дыхательных звуков [4,5] заключается в регистрации ортогональных компонент сложного звукового поля и последующем вычислении взаимоспектральных характеристик этих компонент. В неограниченной среде такими компонентами, как хорошо известно, являются звуковое давление и колебательная скорость. Идеи определения дальности до источника звука по отношению вещественной и мнимой частей взаимного спектра звукового давления и колебательной скорости высказывались и ранее. Однако дыхательные звуки регистрируются на поверхности грудной клетки человека. Свободная поверхность тела является абсолютно мягкой границей, и на ней легко можно определить кинематические характеристики звукового поля (колебательные ускорение, скорость или смещение). Сложнее определить звуковое давление. В работах [5,6] предложен комбинированный

акустический датчик (КАД), схема которого приведена на рис.1а, а внешний вид – на рис.1б.

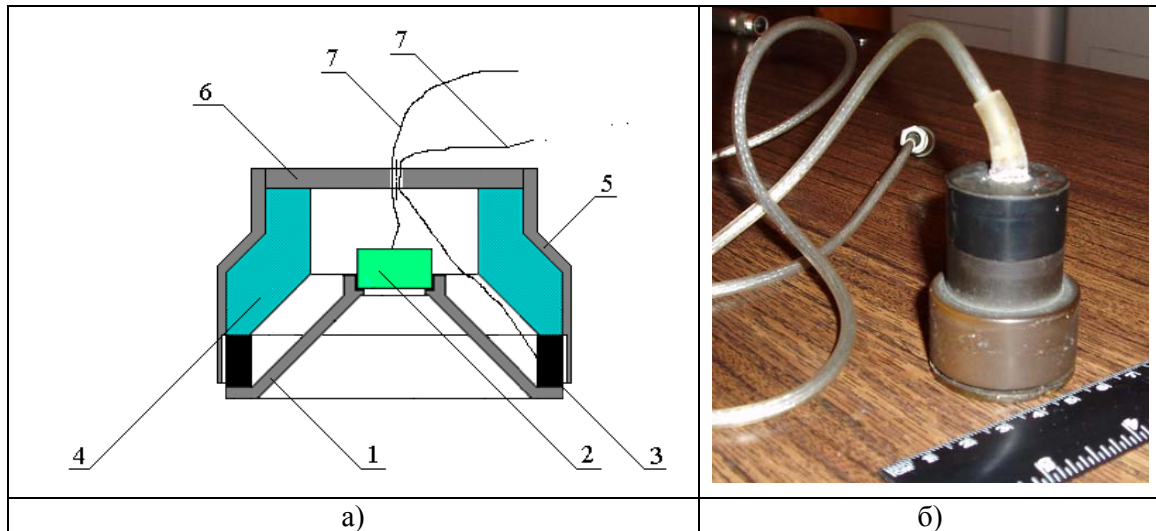


Рис.1.

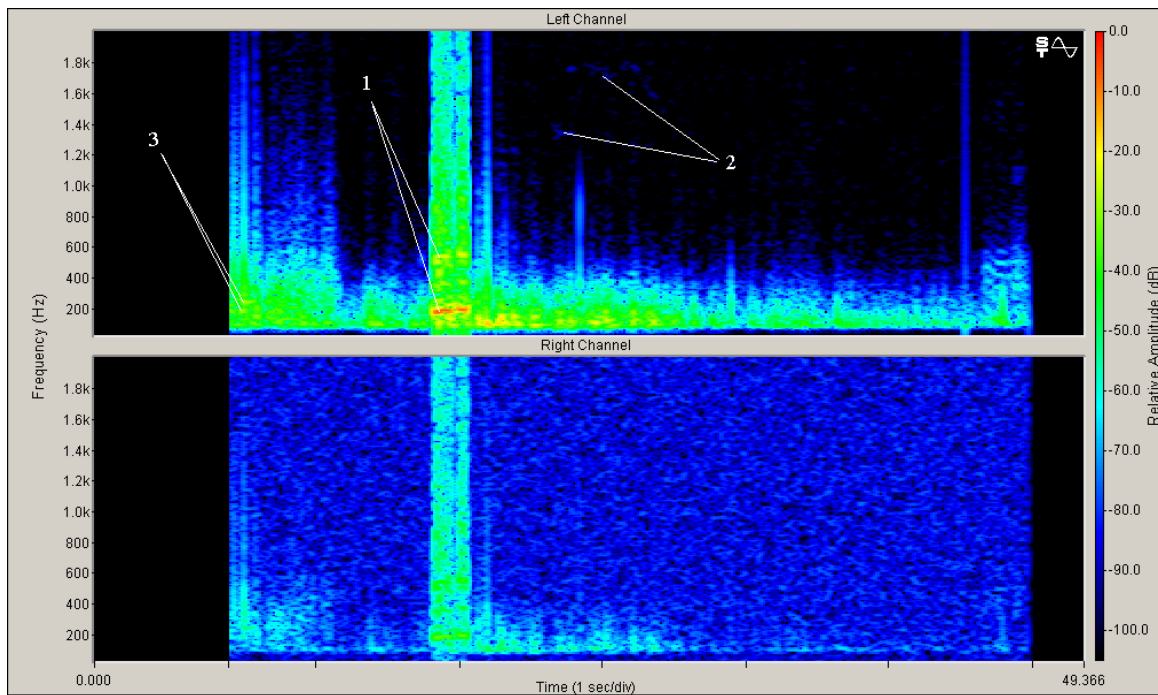


Рис.2.

Жесткая стетоскопическая насадка 1 выполнена из эбонита. Ее внешний диаметр $\varnothing 36$ мм, диаметр отверстия в основании $\varnothing 21$ мм. В горловине насадки, имеющей посадочный диаметр $\varnothing 10$ мм, установлен электретный микрофон МКЭ-3 2. Кольцевой продольно деформируемый пьезопреобразователь 3 склеен из четырех кольцевых пьезокерамических элементов ЦТС-19 с поляризацией по толщине, электрически соединенных последовательно. Фасонная кольцевая массивная накладка 4 выполнена из

латуни. Корпус КАД 5 и его крышка 6 выполнены из эбонита. Общая масса приемника 160 г. Выходы обоих датчиков с помощью экранированных кабелей 7 подключены через 2-канальный усилитель [7] к входам компьютерной лаборатории PowerLab (ADInstruments). Моделирование и численные оценки [8] показывают, что, начиная примерно со 100 Гц и выше, акустические каналы КАД могут рассматриваться как датчики колебательного смещения и динамической силы (давления).

Запись дыхательных шумов со свистами была выполнена на здоровом добровольце в правой подлопаточной области с частотой дискретизации 10 кГц и динамическим диапазоном 16 бит на электронном самописце PowerLab (ADInstruments). Полученные записи преобразованы в формат wav и далее обрабатывались в программе SpectraLab (SoundTech Inc.). Спектрограмма каналов КАД (выборки 1024 отсчета, перекрытие 50%, окно Хэннинга, масштаб по амплитуде логарифмический) показана на рис.2, где сверху – канал колебательного смещения, снизу – канал динамической силы, 1 – мощные свисты ФВ, 2 – слабые свисты в конце ФВ, 3 – свисты на вдохе. На спектрограмме (рис.2) выделены дорожки свистящих звуков (свистов). Для фрагментов времени, в которых свисты наблюдаются, рассчитаны авто и взаимные спектры каналов. В наиболее мощной части шумов ФВ выделены свисты на частотах 341.8, 498, 537.1, 1152.3 Гц. Также выделены слабые свисты в конце ФВ с частотами 1328.1 и 1757.8 Гц. На вдохе выделены свисты с частотами 175.8, 234.4, 322.3 Гц.

2. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВИСТЯЩИХ ЗВУКОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАЛЬНОСТИ ДО ИХ ИСТОЧНИКОВ

Большинство известных механизмов формирования свистов (за исключением, пожалуй, динамического флаттера) предсказывают генерацию свистов в достаточно ограниченной по длине ДП области (модели срыва вихрей на бифуркациях, сужении сечения или автоколебания смыканий слизистой ткани [9]), составляющей по порядку 1 см. Диаметры ДП (кроме трахеи), в которых наиболее вероятно образование свистов, находятся в пределах 2-10 мм. С другой стороны, при скорости звука в паренхиме 30 м/с длина продольной звуковой волны с частотой 300 Гц составляет 10 см. Таким образом, источник свистов может рассматриваться точечным в волновом смысле при распространении от него звуковой волны в паренхиме легких (структурное проведение [4]) в диапазоне частот до примерно 300-500 Гц.

Как известно точечный источник звука может совершать колебания различных типов: монополюсные, дипольные, квадрупольные [10]. Пусть источник свиста – поперечный квадруполь [10]. Создаваемые им звуковое давление и радиальная колебательная скорость (тангенциальную мы не учитываем по соображениям, изложенным в [4]) при излучении в тканевую среду (структуру) легких может быть позаимствовано из [10]. Переходя к представлению каналов КАД в качестве приемника колебательного смещения и приемника динамической силы, с точностью до чувствительностей этих приемников [4,5], получаем на выходе первого из них электрический отклик $U_{od} \sim v_r/i\omega = i2k^2Q_{xy}\exp(-ikr)xy/4\pi r^3 \square [i + 6/kr - 15i/(kr)^2 - 15/(kr)^3]$, второго – $U_{df} \sim -i2k^3\rho cQ_{xy}\exp(-ikr)xy/4\pi r^3 \square [1 - 3i/kr - 3/(kr)^2]$. Вычисляя взаимный спектр откликов приемников, запишем: $Re(W)/Im(W) = 3/kr + 12/(kr)^3 \square + 45/(kr)^5$. Полагая, что экспериментально измеренное значение отношения вещественной и мнимой компонент взаимного спектра пиковой частоты структурного свиста $Re(W)/Im(W) = C$ и вводя обозначение $z = 1/kr$, получим уравнение

$$45z^5 + 12z^3 + 3z - C = 0. \quad (1)$$

Аналогічно для джерела в вигляді Монополя:

$$z - C = 0, \quad (2)$$

а для джерела в вигляді Диполя:

$$2z^3 + z - C = 0 \quad (3)$$

Можно в якості середньої швидкості звуку в системі паренхіма – грудна стінка взяти $c = 30$ м/с. Тоді, розв'язуючи рівняння (1,2,3), отримаємо $r = c/2\pi f z$ для джерел різного типу.

3. РЕЗУЛЬТАТИ І ЇХ ОБСУЖДЕНИЕ

Вещественные корни уравнений (1,3) рассчитаны численно. Из физических соображений для модели источника в виде квадруполь из 5 полученных оставлено 3 положительных корня, для модели источника в виде диполя из 3 полученных – 2 положительных корня. Для выделенных выше свистов (рис.2) полученные решения и соответствующие им расстояния (см) и волновые расстояния (kr) сведены в табл.1.

Табл.1.

Частота, Гц	Квадруполь		Диполь		Монополь		Re(W)/Im(W)
	расстояния/kr		расстояния/kr		расстояние/kr		
Мощные свисты ФВ							
341.8	16.9/12.1	2.74/2	2.73/2	6.1/4.3	1.88/1.3	5.5/3.92	0.255
498	16.4/17.1	1.88/2	1.88/2	5.7/5.9	1.32/1.4	5.4/5.62	0.178
537.1	16.4/18.5	1.75/2	1.74/2	5.7/6.4	1.23/1.4	5.4/6.09	0.164
1152.3	28.3/62.2	0.82/2	0.82/2	9.5/22.8	0.59/1.4	-9.4/2.27	-0.044
Слабые свисты в конце ФВ							
1328.1	2.1/5.8	0.69/1.9	0.68/1.9	0.84/2.3	0.44/1.2	0.62/1.72	0.582
1757.8	1.4/5.2	0.52/1.9	0.51/1.9	0.58/2.1	0.32/1.2	0.4/1.47	0.681
Свисты на вдохе							
175.8	22.6/8.3	5.29/2	5.25/1.9	8.5/3.1	3.5/1.3	7.1/2.61	0.383
234.4	15.5/7.6	3.96/1.9	3.93/1.9	6.0/2.9	2.59/1.3	4.8/2.37	0.422
322.3	14.3/9.6	2.89/2	2.88/1.9	5.3/3.6	1.95/1.3	4.6/3.07	0.325

С учетом ориентировочной толщины грудной стенки 2 см корни решения уравнений (1-3), оценивающие дальность до источника величиной менее 2.5-3 см, могут быть отброшены из физических соображений. Наличие отрицательного отношения $Re(W)/Im(W)$ для источника мощного свиста с частотой 1152.3 Гц явно противоречит модели чисто структурного распространения. Вероятно, в этом случае часть сигнала может проходить по воздушному просвету ДП.

Согласно [11] наиболее интенсивные среднечастотные (400-600 Гц) свисты ФВ у здоровых лиц преимущественно образуются в центральных отделах бронхиального дерева (нижняя часть трахеи и главные/долевые бронхи). С этой точки зрения дальности, рассчитанные для мощных свистов ФВ на частотах 341.8, 498, 537.1 Гц при использовании модели квадрупольного источника, представляются вполне правдоподобными. Действительно, прямое расстояние (пелвиметр) между положением

КАД под углом правой лопатки и яремной впадиной у обследованного добровольца составляет 23-24 см. Таким образом, измеренные значения прямой дальности 16.4-16.9 см указывают на локализацию их, видимо, общего источника на 6.1-7.6 см вглубь (и вниз) грудной клетки от яремной впадины, что из анатомических соображений хорошо соответствует нижней части трахеи либо области бифуркации трахеи и главных/долевых бронхов. Дипольная же и монопольная модели излучателя дают почти втрое меньшие оценки дальности до источника, которые поэтому представляются в данном случае нереалистичными. Однако ожидаемым источником наиболее мощных среднечастотных свистов ФВ согласно [9] является Струхалев поочередный срыв вихрей, который должен, по крайней мере, в простейшем представлении обеспечивать при воздушно-структурной трансформации дипольное излучение в окружающие ткани. В то же время полученные данные об адекватности модели поперечного квадрупольного свидетельствуют, скорее, в пользу механизмов динамического флаттера или автоколебаний смыкания тканей как источника этих звуков.

Напротив, дыхательные шумы вдоха у здоровых лиц предположительно формируются в значительно более дистально расположенных отделах бронхиального дерева до 9-13 уровней его ветвления [4]. Поэтому дистанции 14.3-22.6 см, полученные здесь для первого корня уравнения (1) при квадрупольном излучении представляются неправдоподобно большими. Это умозаключение подкрепляется тем обстоятельством, что шумы вдоха намного менее интенсивны по уровню, чем шумы ФВ, и маловероятно, чтобы они хорошо проводились по структуре из столь удаленных участков легких за счет высокого затухания [5]. Гораздо более реалистичными выглядят дистанции, получаемые для второго корня квадрупольного источника и для монопольного и дипольного источников. Согласно [4] именно монопольный характер излучения для шумов вдоха (шум турбулентного потока) представляется наиболее обоснованным. Для такого типа излучения рассчитанные дальности позволяют выделить 2 источника (табл. 1): один на удалении 7.1 см, второй – 4.6-4.8 см. Впрочем, и дипольная модель источника дает в этом случае достаточно близкие оценки дальности до источников 8.5 и 5.3-6.0 см. Второй и третий корни для квадрупольного излучения дают здесь дистанции 5.3 и 3.9-4.0 см соответственно. Интересно отметить, что здесь, при всех рассмотренных моделях излучения, удается разрешить два источника с разными частотами свистов. Однако неоднозначность оценки дистанции, связанная с выбором возможного типа источника сохраняется. Очевидно, что эта неоднозначность может быть в значительной мере устранена путем синхронного или последовательного определения дистанции из нескольких участков поверхности грудной клетки при нахождении пересечения сферических поверхностей построенных из центров положений не менее чем 4 датчиков. Это позволит исключить те решения по дальности, которые не обеспечивают пересечения данных сферических поверхностей в пределах размеров грудной клетки, а для обеспечивающих пересечение, построить тетраэдр ошибок, позволяющий оценить точность определения местоположения источника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Положение источников свистов с различными частотами может быть найдено и разрешено в пространстве с помощью интенсивметрической обработки. Дальнейшие исследования необходимы для уточнения возможностей предложенного способа. Исследование частично поддержано грантом РФФИ 13-08-00010-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Sen I., Saraclar M., Kahua Y. P.* Acoustic mapping of the lung based on source localization of adventitious respiratory sound components // 32 Annual Int. conf of IEEE EMBS Buenos Aires, Argentina, 2010. Book Series: IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Conference Proceedings.– P. 3670–3673.
2. *Patent US 5844997.* Metod and apparatus for locating the origin of intrathoracic sounds / Murphy R.L.H. Filled 10.10.1996. Published 01.12.1998.
3. *Kompis M., Pasterkamp H., Wodicka G. R.* Acoustic imaging of the human chest // Chest. – 2001. – **120**(4). – P.1309–1321.
4. *Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Кулаков Ю. В.* Особенности акустических явлений, наблюдаемых при аускультации легких // Акуст. журн. – 2003. – **49**(3). – С.376–388.
5. *Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Кулаков Ю. В.* Особенности передачи звука голоса человека на стенку грудной клетки // Акуст. журн. – 1998. – **44**(3). – С.380–390.
6. *Патент РФ 2496421* Способ регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки и комбинированный приемник для осуществления способа / Коренбаум В.И., Тагильцев А.А. заявл. 03.08.2012. опубл. 27.10.2013. Бюл. № 30.
7. *Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Костив А. Е., Горовой С. В., Почкутова И. А., Бондарь Г. Н.* Акустическая аппаратура для исследования дыхательных звуков человека // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – **51**(2). – С.147–154.
8. *Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Дьяченко А. И., Костив А. Е.* Сравнение характеристик акустических датчиков различных типов при регистрации дыхательных звуков на поверхности грудной клетки человека // Акуст. журн. – 2013. – **59**(4). – С.530–538.
9. *Коренбаум В. И., Кулаков Ю. В., Тагильцев А. А.* Акустические эффекты в системе дыхания человека при форсированном выдохе // Акуст. журн. – 1997. – **43**(1). – С.78.
10. *Скучик Е.* Основы акустики. Т.2. М.: Мир, 1976. С.10-31.
11. *Коренбаум В. И., Сафронова М. А., Маркина В. В., Почкутова И. А., Дьяченко А. И.* Исследование механизмов формирования свистящих звуков форсированного выдоха здорового человека при дыхании газовыми смесями с разной плотностью // Акуст. журн. – 2013. – **59**(2). – С.268–278.