

<https://doi.org/10.47183/mes.2025-331>

УДК 612.216.1



ОЦЕНКА ЗАВИСИМОСТИ МОЩНОСТИ ТРАХЕАЛЬНЫХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ШУМОВ ОТ ЛЕГОЧНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ ПРИ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКЕ

С.Н. Астафьева¹, А.И. Дьяченко¹, И.А. Ружичко¹, А.Е. Костив²¹ Институт медико-биологических проблем РАН, Москва, Россия² Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН, Владивосток, Россия

Введение. Оценка функционального состояния дыхательной системы является актуальной задачей в областях спортивной, космической и морской медицины. Использование методов прямой флоуметрии в условиях замкнутого гермообъекта не всегда возможно. Регистрация и анализ дыхательных шумов представляется перспективным способом оценки состояния респираторной системы.

Цель. Выявление возможного характера зависимости между амплитудной характеристикой регистрируемого сигнала дыхательных шумов и величиной легочной вентиляции, а также степени применимости акустического метода для оценки частоты дыхания у здоровых людей при выполнении физической нагрузки независимо от возраста и пола.

Материалы и методы. В исследовании приняли участие 25 добровольцев (20 мужчин и 5 женщин) в возрасте 23–59 лет (средний возраст $35,5 \pm 8,7$ года). Обследуемые выполняли ступенчато-возрастающую нагрузку на велоэргометре Ergoselect 200P (Ergoline GmbH, Германия) до субмаксимальных величин частоты сердечных сокращений с одновременной регистрацией дыхательных шумов над внегрудным участком трахеи, а также величины дыхательного потока методом прямой флоуметрии на приборе Jaeger Oxycon Pro. Статистическая обработка данных проводилась с помощью программного обеспечения Statistica 13 (StatSoft Inc., США). Для оценки взаимосвязи мощности дыхательных шумов и вентиляции легких проведен корреляционный анализ с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s).

Результаты. В ходе исследования у всех испытуемых достигнутые величины максимальной мощности находились в диапазоне 105–240 Вт; мощность свыше 210 Вт смогли развить только 2 испытуемых. Получены зависимости величины мощности шумов от легочной вентиляции. Коэффициент ранговой корреляции Спирмена между изучаемыми параметрами равен 0,58 ($p < 0,001$). Отмечены значимые изменения средней мощности дыхательных шумов при росте нагрузки и легочной вентиляции уже на ступени 30 Вт относительно состояния покоя (0 Вт) ($p < 0,0001$). Мощность трахеальных дыхательных шумов также увеличивалась на 56% между ступенями нагрузки 120 и 135 Вт ($p = 0,023$) и на 75% при нагрузке 180 и 195 Вт ($p = 0,043$). Значимых различий между оценками частоты дыхания методом прямой флоуметрии и акустическим способом не выявлено.

Выводы. Установлена статистически значимая умеренная положительная корреляционная взаимосвязь между величиной легочной вентиляции и средней мощностью дыхательных шумов ($r_s = 0,58$; $p < 0,001$). При значениях легочной вентиляции до 60 л/мин характер зависимости средней мощности трахеальных шумов от легочной вентиляции является линейным. Установлено удовлетворительное соответствие акустической оценки частоты дыхания данным, полученным методами прямой флоуметрии; анализ дыхательных шумов способен дать косвенную оценку состояния дыхательной системы.

Ключевые слова: физическая нагрузка; дыхательные шумы; велоэргометрия; легочная вентиляция; дыхательная система; респираторная акустика

Для цитирования: Астафьева С.Н., Дьяченко А.И., Ружичко И.А., Костив А.Е. Влияние физической нагрузки на вентиляцию легких и трахеальные дыхательные шумы. *Медицина экстремальных ситуаций*. 2025. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-331>

Финансирование: работа выполнена в рамках базовой темы РАН FMFR-2024-0038.

Благодарности: авторы выражают благодарность покойным д-ру тех. наук Коренбауму В.И. и д-ру мед. наук Суворову А.В. за ценные консультации и помощь на ранних этапах исследования.

Соответствие принципам этики: исследование проведено в соответствии с принципами Хельсинкской декларации. Все добровольцы проходили медицинский отбор врачебной экспертной комиссией ГНЦ РФ — ИМБП РАН, в ходе которого заболеваний и патологий, препятствующих участию в эксперименте, выявлено не было. Все участники подписали добровольное информированное согласие на участие в исследовании. Исследование одобрено Комиссией по биомедицинской этике ГНЦ РФ — ИМБП РАН (протоколы № 520 от 25.07.2019, № 539 от 17.03.2020).

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

✉ Астафьева Светлана Николаевна a10351@ya.ru

Статья поступила: 25.06.2025 **После доработки:** 03.09.2025 **Принята к публикации:** 03.10.2025 **Online first:** 31.10.2025

ASSESSMENT OF THE RELATIONSHIP BETWEEN TRACHEAL BREATHING SOUNDS AND LUNG VENTILATION DURING PHYSICAL EXERCISE

Svetlana N. Astafyeva¹, Alexander I. Dyachenko¹, Irina A. Ruzhichko¹, Anatoly E. Kostiv²¹ Institute of Biomedical Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia² Il'ichev Pacific Oceanological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia

Introduction. Assessment of the functional state of the respiratory system is a relevant task in the fields of sports, aerospace, and maritime medicine. Direct flowmetry methods cannot always be applied under conditions of a sealed enclosed environment. The recording and analysis of lung sounds appears to be a promising method for assessing the state of the respiratory system.

© С.Н. Астафьева, А.И. Дьяченко, И.А. Ружичко, А.Е. Костив, 2025

Objective. To assess the relationship between the amplitude characteristic of the recorded lung sound signal and the magnitude of pulmonary ventilation, as well as the applicability of the acoustic method for assessing the respiratory rate in healthy individuals during physical exercise, regardless of age and sex.

Materials and methods. The study involved 25 volunteers (20 male and 5 female) aged 23–59 years (mean age 35.5 ± 8.7 years). The participants were subjected to a stepwise increasing workload on an Ergoselect 200P cycle ergometer (Ergoline GmbH, Germany) up to sub-maximal heart rate levels, with simultaneous recording of respiratory sounds over the extrathoracic section of the trachea and measurement of respiratory flow via direct flowmetry using a Jaeger Oxycon Pro device. Statistical data processing was performed using the Statistica 13 software (StatSoft Inc., USA). To assess the relationship between respiratory sound power and pulmonary ventilation, a correlation analysis was conducted using Spearman's rank correlation coefficient (r_s).

Results. During the study, the achieved maximum power output for all participants ranged 105–240 W; only two subjects were capable of developing a power level exceeding 210 W. Dependencies of respiratory sound power on pulmonary ventilation were obtained. Spearman's rank correlation coefficient between the studied parameters was 0.58 ($p < 0.001$). Significant changes in the mean power of respiratory sounds were observed with an increase in load and pulmonary ventilation, already at the 30 W stage compared to the resting state (0 W) ($p < 0.0001$). The power of tracheal respiratory sounds also increased by 56% between the 120 W and 135 W load stages ($p = 0.023$) and by 75% between the 180 W and 195 W load stages ($p = 0.043$). No significant differences were found between respiratory rate assessments obtained by direct flowmetry and acoustic methods.

Conclusions. A statistically significant, moderate positive correlation was established between the magnitude of pulmonary ventilation and the mean power of respiratory sounds ($r_s = 0.58$; $p < 0.001$). For pulmonary ventilation values up to 60 L/min, the relationship between the mean power of tracheal sounds and pulmonary ventilation was found to be linear. A satisfactory agreement was determined between the acoustic assessment of respiratory rate and the data obtained by direct flowmetry methods. The analysis of respiratory sounds is capable of providing an indirect assessment of the state of the respiratory system.

Keywords: physical activity; lung sounds; cycle ergometry; pulmonary ventilation; respiratory system; respiratory acoustics

For citation: Astafyeva S.N., Dyachenko A.I., Ruzhichko I.A., Kostiv A.E. Assessment of the relationship between tracheal breathing sounds and lung ventilation during physical exercise. *Extreme Medicine*. 2025. <https://doi.org/10.47183/mes.2025-331>

Funding: the work was performed within the framework of the RAS (Russian Academy of Sciences) basic research theme FMFR-2024-0038.

Acknowledgments: the authors express their profound gratitude to the late Dr. Sci. (Engin.) Vladimir I. Korenbaum and Dr. Sci. (Med.) Alexander V. Suvorov for their invaluable consultations and assistance during the early stages of this research.

Compliance with the ethical principles: the study was conducted in accordance with the principles of the Helsinki Declaration. All volunteers underwent medical selection by the Medical Expert Commission of the SSC RF — IBMP RAS, during which no diseases or pathologies preventing participation in the experiment were identified. All participants provided signed voluntary informed consent to participate in the study. The study was approved by the Biomedical Ethics Committee of the SSC RF — IBMP RAS (Protocols No. 520 of 25.07.2019, and No. 539 of 17.03.2020).

Potential conflicts of interest: the authors declare no conflict of interest.

✉ Svetlana N. Astafyeva a10351@ya.ru

Received: 25 June 2025 **Revised:** 3 Sep. 2025 **Accepted:** 3 Oct. 2025 **Online first:** 31 Oct. 2025

ВВЕДЕНИЕ

В спортивной, космической и морской медицине, а также сомнологии часто стоит вопрос об оценке функционального состояния дыхательной системы человека. Для этого используются методы прямой флоуметрии, в которых измеряют величину дыхательного потока. Однако в условиях замкнутого гермообъекта (например, орбитальная станция, скафандр) не всегда проведение прямой флоуметрии возможно и целесообразно. С целью поиска более компактного и автономного способа мониторинга и оценки состояния дыхательной системы исследуются методы респираторной акустики, заключающиеся в регистрации и анализе шумов, возникающих в процессе дыхания [1–3].

Методика аускультации традиционно применяется в клинической медицине для косвенной оценки при диагностике патологических состояний легких, а также находит свое применение в области морской медицины [4, 5]. Однако в условиях космического полета, в том числе во время физических нагрузок, мониторинг функционального состояния органов дыхания для предотвращения бронхолегочных заболеваний необходим в первую очередь.

Известно, что во время полетов у космонавтов изменяется форма грудной клетки, смещается диафрагма в краниальном направлении, а также уменьшается функциональная остаточная емкость легких [6–8]. Данные явления отражаются на размерах дыхательных путей, что приводит к изменению акустических характеристик шумов.

Цель работы — выявление наличия и возможного характера зависимости между амплитудной характеристикой регистрируемого сигнала дыхательных шумов и величиной вентиляции при выполнении физической нагрузки у здоровых людей независимо от возраста и пола. Кроме того, анализировали применимость акустического метода для оценки частоты дыхания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследованиях приняли участие 25 добровольцев (20 мужчин и 5 женщин) в возрасте 23–59 лет (средний возраст $35,5 \pm 8,7$ года); ростом 165–189 см (средний рост $178 \pm 6,6$ см) и массой тела 56–104 кг (в среднем $79,2 \pm 11,3$ кг), некурящих и не имевших в анамнезе бронхолегочных заболеваний. Все добровольцы проходили медицинский отбор врачебной экспертной комиссией, в ходе которого заболеваний и патологий,

препятствующих участию в эксперименте, выявлено не было. Всеми участниками подписано добровольное информированное согласие на участие в исследовании и использование обезличенных данных.

Испытуемые выполняли ступенчато-возрастающую физическую нагрузку на велоэргометре Ergoselect 200P (Ergoline GmbH, Германия). Начальная ступень нагрузки равнялась 30 Вт, затем нагрузка возрастала на 15 Вт. Каждая ступень имела продолжительность 1 мин. Исследование выполнялось до достижения субмаксимальной величины ЧСС¹ в лабораторных условиях при оптимальных условиях микроклимата в помещении и составе атмосферы [9].

Обследуемые дышали через загубник, вставленный в следующий пневматический тракт: трубка со слюноотсосом; индивидуальный одноразовый фильтр, измерительный узел системы Jaeger Oxycon Pro (Германия), включающей ротационный датчик потока воздуха («турбинка»), трубки для забора выдыхаемого воздуха на газоанализ «breath-by-breath».

Непрерывно регистрировали дыхательные шумы над внегрудным участком трахеи, а также величину дыхательного потока методом прямой флоуметрии на приборе Jaeger Oxycon Pro. По динамике дыхательного потока встроенная в прибор программа определяла величины легочной вентиляции и частоты дыхания, которые использовали в ходе дальнейшего анализа экспериментальных данных.

Регистрация дыхательных шумов проведена путем применения аппаратуры, включающей легкий акселерометр, блок питания, диктофон и кабели [10–12]. Акселерометр PCB 333B52 (США) размещался над внегрудным участком трахеи на шее испытуемого и фиксировался на поверхности шеи с помощью эластичной ленты «Velcro». Сигнал акселерометра оцифровывался с частотой 48 кГц.

Для ослабления фонового шума и сердечного артефакта применялась полосовая фильтрация (рис. 1). Обработку акустического сигнала проводили по алгоритму, аналогичному описанному в работе [11]. Записи

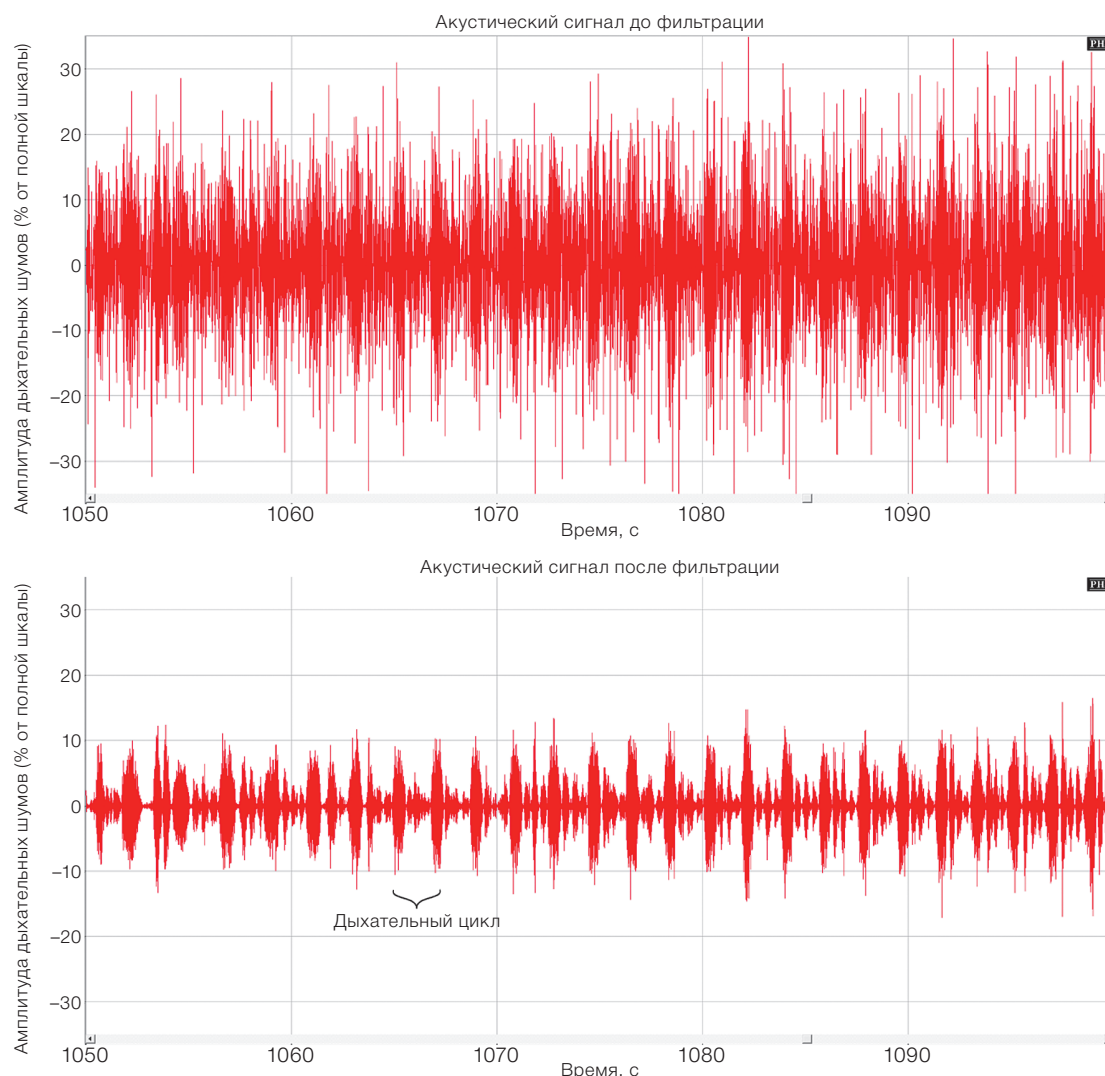


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 1. Фильтрация сигнала дыхательных шумов: ось абсцисс — время (сек); ось ординат — амплитуда дыхательных шумов (% от полной шкалы)

¹ Быстрова АГ, Ковалева ИО, Кузьмина АЮ, Парнес ЕЯ, Потиевский БГ, Эренбург ИВ и др. Велоэргометрическое исследование в практике врачебно-летной экспертизы гражданской авиации. Учебное пособие. М.: ФГБОУ ДПО РМАНПО; 2020.

дыхательных шумов обрабатывали в программном обеспечении SpectraPLUS 5.0 (США) с помощью полосового фильтра в диапазоне частот 200–1000 Гц для удаления сердечных и мышечных шумов, которые обычно наблюдаются на частотах ниже 200 Гц, а также высокочастотных помех, имеющих частоту выше 1000 Гц [13].

Расстояние между соседними пиками, характеризующими экспираторные шумы, считали продолжительностью дыхательного цикла, что давало акустическую оценку частоты дыхания (ЧД) и периода дыхательного цикла. Кроме того, с помощью программного обеспечения SpectraPLUS определяли среднеквадратичное значение (Root Mean Square, сокращенно RMS) амплитуды дыхательных шумов (ДШ) с учетом каждого оцифрованного значения сигнала акселерометра на участках, соответствующих степеням нагрузки. Эту величину принято условно называть средней мощностью дыхательных шумов и отображать в процентах (%) от полной шкалы, т.е. максимального значения амплитуды сигнала [11, 13–15].

Статистический анализ данных проводили в программном обеспечении Statistica 13 (StatSoft Inc., США) и Microsoft Excel (Microsoft, США). Для оценки динамики показателей применяли непараметрический дисперсионный анализ (ANOVA Фридмана), изменения изучаемых параметров оценивали с помощью критерия Вилкоксона (для мощности ДШ и легочной вентиляции) и Манна – Уитни (для сопоставления акустической оценки ЧД и данных флюометрии). Для оценки взаимосвязи мощности ДШ и вентиляции легких проведен корреляционный анализ с использованием коэффициента ранговой корреляции Спирмена (r_s) [16]. Для установления зависимости мощности ДШ от вентиляции легких применен линейный регрессионный анализ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования у всех испытуемых достигнутые величины максимальной мощности находились

в диапазоне 105–240 Вт. При этом мощность свыше 210 Вт смогли развить только 2 человека. Для получения более корректных данных статистический анализ ограничили диапазоном мощности до 210 Вт.

Были получены зависимости средней мощности ДШ и величины легочной вентиляции от величины физической нагрузки (рис. 2).

Отмечено значимое возрастание средней мощности ДШ с 0,0004 до 0,0009% уже на ступени 30 Вт относительно состояния покоя (0 Вт) ($p < 0,0001$). Кроме того, мощность трахеальных дыхательных шумов также увеличивалась на 56% между степенями нагрузки 120 и 135 Вт ($p = 0,023$), на 75% между нагрузкой 180 и 195 Вт ($p = 0,043$).

Рост RMS с увеличением физической нагрузки (рис. 2) свидетельствует о возрастании амплитуды дыхательных шумов. В ходе проведенного корреляционного анализа установлена статистически значимая умеренная положительная взаимосвязь между абсолютными величинами вентиляции легких и мощности дыхательных шумов ($r_s = 0,58$; $p < 0,001$).

Для оценки характера предполагаемой связи между RMS и величиной легочной вентиляции провели линейный регрессионный анализ по всему массиву данных (рис. 3). Отмечен разброс величины индивидуальной мощности шумов с возрастанием объема легочной вентиляции. По-видимому, одной линейной зависимостью все индивидуальные показатели описать невозможно. Значительные индивидуальные различия и нелинейность зависимости мощности шумов от легочной вентиляции привели к разбросу данных и низкому значению коэффициента детерминации $R^2 = 0,35$.

В литературных источниках присутствуют различные способы описания зависимости между дыхательным потоком и амплитудой дыхательных шумов [17]. В работе E.F. Banaszak и соавт. описана линейная зависимость между мгновенным потоком и амплитудой звука дыхания, измеренной над грудной стенкой

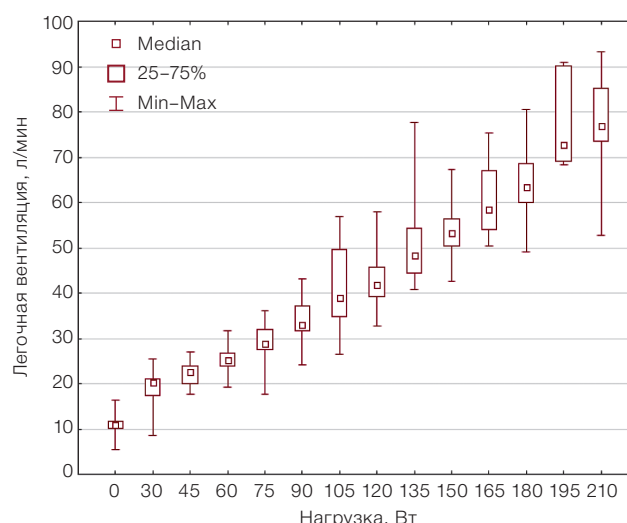
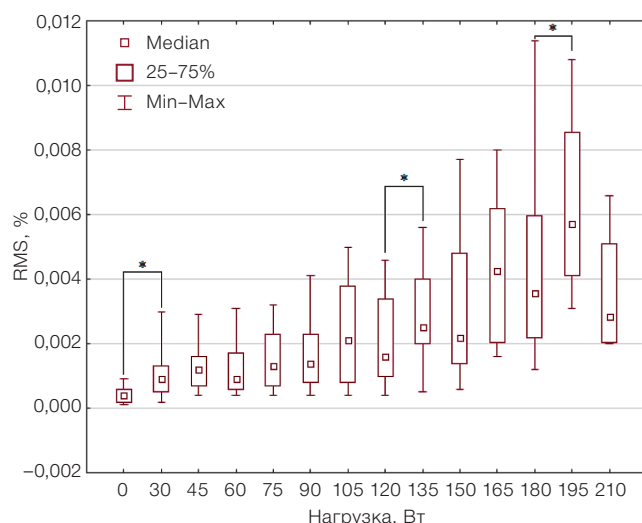


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 2. Зависимость средней мощности дыхательных шумов и легочной вентиляции от величины ступенчато-возрастающей физической нагрузки

Примечание: RMS (Root Mean Square) — среднеквадратичное значение амплитуды дыхательных шумов; * — статистически значимые изменения ($p < 0,05$).

[18]. В исследовании В.Е. Shykoff и соавт. была использована квадратичная функция [14, 19]. Авторами N. Gavriely и соавт. охарактеризована степенная функция, при этом средняя по группе величина степени составила $1,66 \pm 0,35$, что, по их мнению, значительно меньше предполагаемой второй степени [20, 21].

Выше отмечено, что взаимосвязь индивидуальных величин мощности шумов и вентиляции легких характеризуется большим разбросом мощности шумов при определенной величине вентиляции легких (рис. 3). По-видимому, данный разброс связан с большими различиями геометрии дерева воздухоносных путей в группе испытуемых. Возможно, в более однородной группе испытуемых (по полу, возрасту, росту, массе тела, физической подготовке и др.) разброс был бы меньше. Подбор однородных групп является одним из возможных направлений будущих исследований в данной области респираторной акустики. Кроме того, перспективным является поиск индивидуальных регрессионных зависимостей.

Можно предположить, что влияние индивидуальных различий на искомую зависимость сглаживаются при переходе от индивидуальных данных к усредненным. Поэтому был проведен регрессионный анализ по усредненным значениям показателей мощности ДШ и вентиляции легких на каждой ступени нагрузки. При этом если рассматривается весь диапазон достигнутых величин легочной вентиляции до 100 л/мин, то коэффициент детерминации равен всего лишь 0,68. Возможно, это связано с проявлением нелинейной зависимости между мощностью ДШ и величиной вентиляции легких и индивидуальными различиями при большем диапазоне легочной вентиляции. Поэтому в рамках задачи поиска линейной регрессионной зависимости необходимо было ограничить диапазон легочной вентиляции (до 60 л/мин) (рис. 4). В этом случае коэффициент детерминации R^2 заметно возрастал до 0,93. Далее зависимость отклонялась от линейной, и разброс данных существенно увеличивался, что приводило к снижению R^2 , аналогично

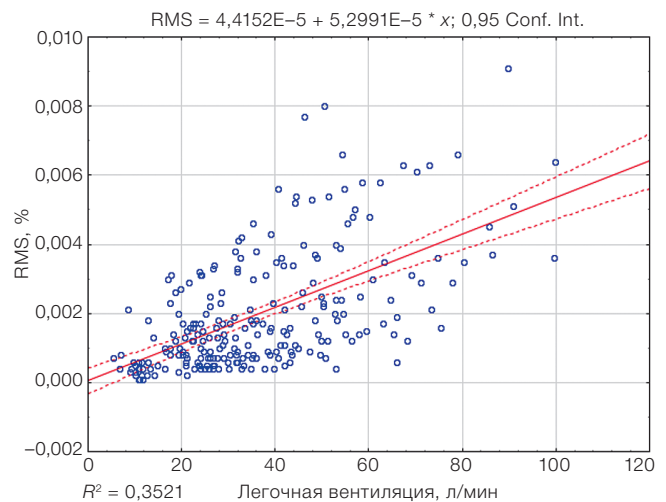


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 3. Взаимосвязь индивидуальных величин средней мощности дыхательных шумов и показателей вентиляции легких

Примечание: RMS (Root Mean Square) — среднеквадратичное значение амплитуды дыхательных шумов.

снижался и коэффициент корреляции r_s . Это может быть обусловлено упомянутыми выше нелинейными явлениями и индивидуальными различиями.

Практическая значимость полученной регрессионной зависимости заключается в возможности оценки величины вентиляции легких по трахеальным дыхательным шумам.

С целью выявления степени соответствия величин ЧД, полученных акустическим методом, данным прямой флоуметрии проводили сравнение акустической оценки ЧД с флоуметрическим показателем (рис. 5).

На рисунке 5 показано, что при нагрузке 135 Вт ЧД по акустическим данным была минимальной, а при величине ступенчато-возрастающей физической

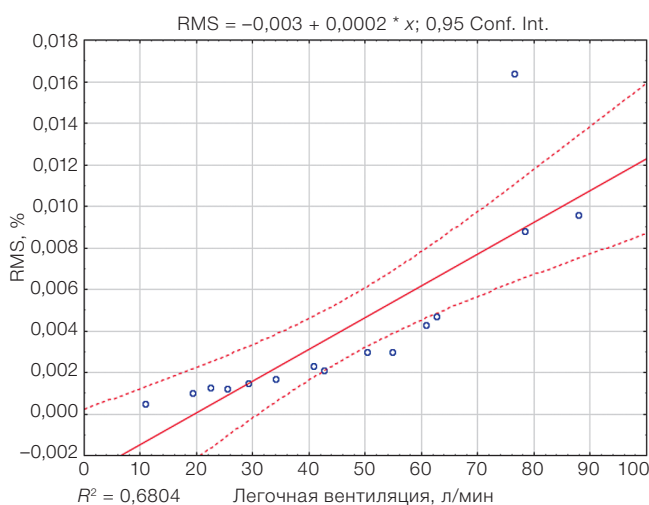
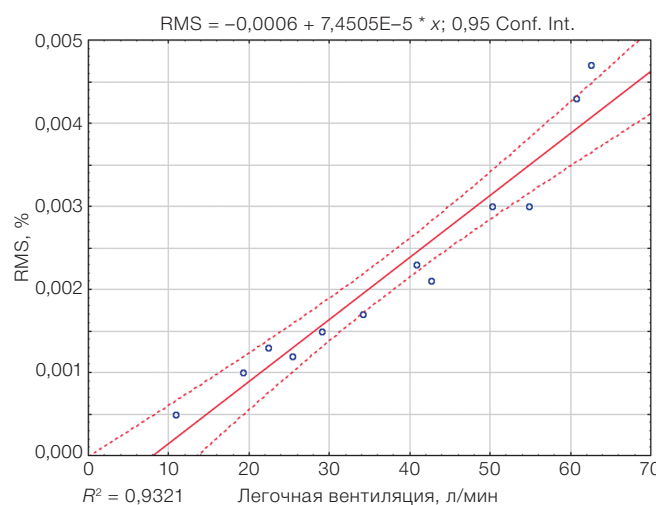


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 4. Зависимость мощности дыхательных шумов от величины вентиляции легких по средним значениям показателей

Примечание: RMS (Root Mean Square) — среднеквадратичное значение амплитуды дыхательных шумов.



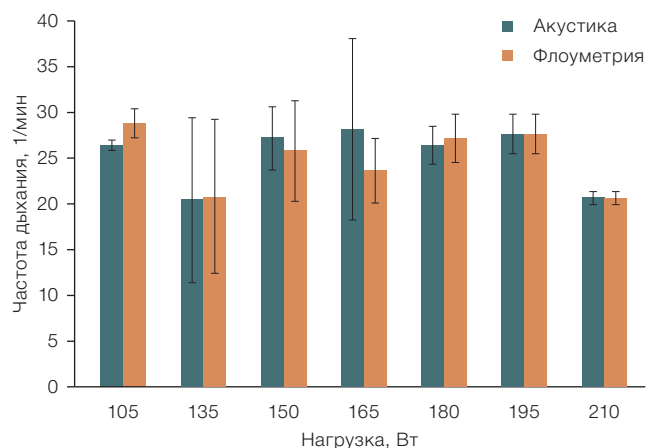


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 5. Сопоставление значений частоты дыхания, полученных акустическим методом, с данными прямой флоуметрии на различных уровнях ступенчато-возрастающей физической нагрузки

нагрузки на уровне 165 Вт — максимальной. По-видимому, на эти крайние значения больше влияет индивидуальный разброс показателей. Значимых отличий между величинами ЧД, полученными двумя методами, не выявлено. Разброс значений может объясняться различиями в индивидуальных характеристиках респираторной системы.

Литература / References

1. Коренбаум ВИ, Почекутова ИА. Акустико-биомеханические взаимосвязи в формировании шумов форсированного выдоха человека. Владивосток: Дальнаука; 2006.
Korenbaum VI, Pochekutova IA. *Acoustical-biomechanical interdependences in human forced expiratory production*. Vladivostok: Dal'nauka; 2006 (In Russ.).
EDN: [VEJDKR](https://doi.org/10.3390/s19040908)
2. Massaroni C, Nicolò A, Lo Presti D, Sacchetti M, Silvestri S, Schena E. Contact-Based Methods for Measuring Respiratory Rate. *Sensors*. 2019;19(4):908.
<https://doi.org/10.3390/s19040908>
3. Rao A, Huynh E, Royston T, Kornblith A, Roy S. Acoustic Methods for Pulmonary Diagnosis. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2019;12:221–39.
<https://doi.org/10.1109/RBME.2018.2874353>
4. Arts L, Lim EHT, van de Ven PM, Heunks L, Tuinman PR. The diagnostic accuracy of lung auscultation in adult patients with acute pulmonary pathologies: a meta-analysis. *Scientific Reports*. 2020;10:7347.
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-64405-6>
5. Landry V, Matschek J, Pang R, Muniapalle M, Tan K, Boruff J, et al. Audio-based digital biomarkers in diagnosing and managing respiratory diseases: a systematic review and bibliometric analysis. *European Respiratory Review*. 2025;34(176):240246.
<https://doi.org/10.1183/16000617.0246-2024>
6. Баранов ВМ. Газоэнергообмен человека в космическом полете и модельных исследованиях. М.: Наука; 1993.
Baranov VM. *Human gas and energy exchange in space flight and model research*. Moscow: Nauka; 1993 (In Russ.).
7. Prisk GK. Microgravity and the respiratory system. *European Respiratory Journal*. 2014;43(5):1459–71.
<https://doi.org/10.1183/09031936.00001414>
8. Smith MB, Chen H, Oliver BGG. The Lungs in Space: A Review of Current Knowledge and Methodologies. *Cells*. 2024;13:1154.
<https://doi.org/10.3390/cells13131154>
9. Фомина ЕВ, Усков КВ. Эффективность тренировок разной направленности для поддержания физической работоспособности в условиях сниженного уровня двигательной активности. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2016;50(5):47–55.
Fomina EV, Uskov KV. Effectiveness of different training programs for physical performance maintenance in the condition of low motor activity. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2016;50(5):47–55 (In Russ.).
EDN: [WTNLFJ](https://doi.org/10.1121/10.0002705)
10. Korenbaum VI, Pochekutova IA, Kostiv AE, Malaeva VV, Safronova MA, Kabantsova OI, et al. Human forced expiratory noise. Origin, apparatus and possible diagnostic applications. *Journal of the Acoustical Society of America*. 2020;148(6):3385–91.
<https://doi.org/10.1121/10.0002705>
11. Астафьева СН, Зарипов РН, Михайловская АН, Дьяченко АИ. Исследование вентиляционной функции легких человека методами респираторной акустики в условиях 5-суточной женской «сухой» иммерсии. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2024;58(5):32–8.
Astafyeva SN, Zaripov RN, Mikhailovskaya AN, Dyachenko AI. Study of the ventilation function of the human lungs with the methods of respiratory acoustics during 5-day female

ВЫВОДЫ

1. Установлена статистически значимая умеренная положительная корреляционная взаимосвязь между величиной легочной вентиляции и средней мощностью дыхательных шумов ($r_s = 0,58$; $p < 0,001$).

2. При значениях легочной вентиляции до 60 л/мин характер зависимости средней мощности трахеальных шумов от легочной вентиляции является линейным. Однако при превышении этого значения, вероятно, начинают действовать дополнительные нелинейные процессы, которые изменяют характер зависимости. Одним из таких нелинейных процессов может быть переход от ламинарного течения воздуха в воздухоносных путях к турбулентному течению с увеличением величины потока.

3. Сопоставление акустических оценок состояния системы дыхания со значениями, сделанными на основании данных прямой флоуметрии дыхательного потока, показало удовлетворительное соответствие, следовательно, акустический метод можно рассматривать как альтернативу методу прямой флоуметрии в случаях, когда традиционный способ не применим.

4. Возможным направлением будущих исследований является поиск индивидуальных регрессионных взаимосвязей и/или зависимостей между амплитудной характеристикой регистрируемого сигнала дыхательных шумов и величиной легочной вентиляции для более однородных групп испытуемых.

- dry immersion. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2024;58(5):32–8 (In Russ.).
<https://doi.org/10.21687/0233-528X-2024-58-5-32-38>
12. Костив АЕ, Коренбаум ВИ. Новые возможности контроля состояния водолазов в процессе подводного погружения с использованием шумов, связанных с естественным дыханием. *Ульяновский медико-биологический журнал*. 2019;3:89–97.
 Kostiv AE, Korenbaum VI. New possibilities for diver's monitoring during underwater diving using noises associated with natural respiration. *Ulyanovsk Medico-Biological Journal*. 2019;3:89–97 (In Russ.).
<https://doi.org/10.34014/2227-1848-2019-3-89-97>
 13. Nekoutabar R, Ghaheer FS, Jalilvand H. The Effect of Root-Mean-Square and Loudness-Based Calibration Approach on the Acceptable Noise Level. *Auditory and Vestibular Research*. 2024;33(4):361–70.
<https://doi.org/10.18502/avr.v33i4.16654>
 14. Khoshouei M, Bagherpour R, Jalalian M, Yari M. Investigating the acoustic signs of different rock types based on the values of acoustic signal RMS. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2020;35(3):29–38.
<https://doi.org/10.17794/rgn.2020.3.3>
 15. Hubert P, Killick R, Chung A, Padovese LR. A Bayesian binary algorithm for root mean squared-based acoustic signal segmentation. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2019;146:1799–807.
<https://doi.org/10.1121/1.5126522>
 16. Носовский АМ, Попова ОВ, Смирнов ЮИ. Современные технологии статистического анализа медицинских данных и способы их графического представления. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2023;57(5):149–54.
 Nosovsky AM, Popova OV, Smirnov Yul. State-of-the art technologies of medical data statistical analysis and methods of graphic presentation. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2023;57(5):149–54 (In Russ.).
<https://doi.org/10.21687/0233-528X-2023-57-5-149-154>
 17. Xie W, Hu Q, Zhang J, Zhang Q. EarSpiro: Earphone-based Spirometry for Lung Function Assessment. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*. 2023;6(4):1–27.
<https://doi.org/10.1145/3569480>
 18. Banaszak EF, Kory RC, Snider GL. Phonopneumography. *American Review of Respiratory Disease*. 1973;107(3):449–55.
 19. Shykoff BE, Ploysongsang Y, Chang HK. Airflow and normal lung sounds. *American Review of Respiratory Disease*. 1988;137(4):872–6.
<https://doi.org/10.1164/ajrccm/137.4.872>
 20. Gavriely N, Cugell DW. Airflow effects on amplitude and spectral content of normal breath sounds. *Journal of Applied Physiology*. 1996;80(1):5–13.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1996.80.1.5>
 21. Gavriely N, Palti Y, Alroy G. Spectral characteristics of normal breath sounds. *Journal of Applied Physiology*. 1981;50(2):307–14.
<https://doi.org/10.1152/jappl.1981.50.2.307>

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: С.Н. Астафьева — разработка концепции, сбор акустических данных, анализ и интерпретация данных, подготовка черновика рукописи; А.И. Дьяченко — научное руководство, рецензирование и редактирование рукописи; И.А. Ружичко — проведение исследования (велозергометрия); А.Е. Костив — предоставление ресурсов, утверждение финального текста.

ОБ АВТОРАХ

Астафьева Светлана Николаевна
<https://orcid.org/0009-0004-7376-1713>
a10351@ya.ru

Дьяченко Александр Иванович, д-р техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-5272-222X>
alexander-dyachenko@yandex.ru

Ружичко Ирина Анатольевна
<https://orcid.org/0000-0003-3046-4757>
irina.ruzhichko@gmail.com

Костив Анатолий Евгеньевич, канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-7485-6499>
kostiv@poi.dvo.ru