

УДК: 616.24-071.6:004

## «НЕЙРОННАЯ СЕТЬ» В РЕСПИРАТОРНОЙ МЕДИЦИНЕ

Е.А. ЛАПТЕВА<sup>1</sup>, О.Н. ХАРЕВИЧ<sup>1</sup>, Е.И. КАТИБНИКОВА<sup>1</sup>, А.Н. ЛАПТЕВ<sup>1</sup>, И.В. КОВАЛЕНКО<sup>1</sup>, А.С. ПОЗДНЯКОВА<sup>1</sup>, В.С. КОРОВКИН<sup>1</sup>, А.И. МУШОВЕЦ<sup>1</sup>, И.В. БЕЗРУЧКО<sup>2</sup>, О.Л. ГОРЕНЮК<sup>3</sup>, М.С. ЭЛЬЖБУР<sup>3</sup>, О.П. ЕРМОЛЕНКО<sup>3</sup>, Н.А. ВОРОНОВА<sup>3</sup>, О.И. БУРАКЕВИЧ<sup>3</sup>, А.Н. МАРТЫНЮК<sup>3</sup>, Т.Ф. ЧАБАН<sup>3</sup>, В.В. ХОТЬКО<sup>4</sup>, Е.Н. ЛОБАН<sup>4</sup>, С.М. ТУМАШИК<sup>4</sup>, М.И. ЖУРОВИЧ<sup>5</sup>, И.П. ДУЛУП<sup>5</sup>, А.А. КАРАНКЕВИЧ<sup>6</sup>, М.Н. ЗЯБКО<sup>6</sup>, Е.А. БИНЕЦКАЯ<sup>6</sup>, Ю.Ю. НАРУШЕВИЧ<sup>6</sup>, В.В. ДУБИНЕЦКИЙ<sup>6</sup>, С.И. АЛЕШКЕВИЧ<sup>6</sup>

<sup>1</sup>ГУО «Белорусская медицинская академия последипломного образования», Минск, Беларусь

<sup>2</sup>УЗ «Минская областная детская клиническая больница», п. Боровляны, Минская область, Беларусь

<sup>3</sup>УЗ «Минский областной противотуберкулезный диспансер», д. Лесковка, Минская область, Беларусь

<sup>4</sup>УЗ «Минский городской клинический центр фтизиопульмонологии», Минск, Беларусь

<sup>5</sup>УЗ «6-я городская клиническая больница», Минск, Беларусь

<sup>6</sup>Общество с ограниченной ответственностью «Хэлси Нетворкс», Минск, Беларусь

**Аннотация.** Внедрение электронной аускультации в практику пульмонолога и фтизиатра представляется перспективным и целесообразным, так как обуславливает объективность трактовки респираторных феноменов, возможность ревизии и экспертной оценки при непосредственном и отдаленном анализе. В Республике Беларусь данное направление практически не разрабатывалось. Цель. Изучить эффективность использования нейронных сетей при осуществлении диагностических мероприятий у пациентов с заболеваниями органов дыхания. Материал и методы. Использовался программно-аппаратный комплекс Lung Pass на основе алгоритма машинного обучения для классификации типа аускультативного феномена. Результаты. Автоматическая система анализа звуковых феноменов обладает высокой чувствительностью (80,81-93,33%) и специфичностью (83,33-98,99%), позволяет объективизировать аускультативные данные. Выводы. Использование метода автоматической классификации аускультативных феноменов на базе машинного обучения позволит повысить эффективность ранней диагностики и мониторинга респираторной патологии.

**Ключевые слова:** нейронные сети, аускультация, болезни органов дыхания.

## NEURAL NETWORKS IN RESPIRATORY MEDICINE

<sup>1</sup>E.A. LAPTEVA, <sup>1</sup>O.N. KHAREVICH, <sup>1</sup>E.I. KATIBNIKOVA, <sup>1</sup>A.N. LAPTEV, <sup>1</sup>I.V. KOVALENKO, <sup>1</sup>A.S. POZDNYAKOVA, <sup>1</sup>A.I. MUSHOVETS, <sup>2</sup>I.V. BEZRUCHKO, <sup>3</sup>O.L. GORENJUK, <sup>3</sup>M.S. ELSBUR, <sup>3</sup>O.P. ERMOLENKO, <sup>3</sup>N.A. VORONOVA, <sup>3</sup>A.I. BURAKEVICH, <sup>3</sup>A.N. MARTYNIUK, <sup>3</sup>T.F. CHABAN, <sup>4</sup>V.V. KHOTSKO, <sup>4</sup>E.N. LOBAN, <sup>4</sup>S.M. TUMASHIK, <sup>5</sup>M.I. ZHUROVICH, <sup>5</sup>I.P. DULUP, <sup>6</sup>A.A. KARANKEVICH, <sup>6</sup>M.N. ZABKO, <sup>6</sup>E.A. BINETSKAYA, <sup>6</sup>Y.V. NARUSHEVICH, <sup>6</sup>V.V. DUBINETSKY, <sup>6</sup>S.I. ALESHKEVICH

<sup>1</sup>Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Minsk Regional Children's Clinical Hospital, Lesnoy, Minsk region, Belarus

<sup>3</sup>Minsk Regional TB Dispensary, Leskovka, Minsk region, Belarus

<sup>4</sup>Minsk City Clinical Center of Phthisiopulmonology, Minsk, Belarus

<sup>5</sup>6th City Clinical Hospital, Minsk, Belarus

<sup>6</sup>LLC "Healthy Networks", Minsk, Belarus

**Abstract.** The implementation of electronic auscultation into the pulmonology and phthiisology practice seems perspective and expedient, since it provides objective interpretation of respiratory phenomena, the possibility of their revision and expert evaluation in on-site and remote analysis. In the Republic of Belarus this field of research has not been previously developed. Aim. To study the efficacy of neural networks application in the diagnostic of the respiratory diseases. Material and methods. Hardware-software complex Lung Pass based on machine learning algorithm was used for classification of lung sound type. Results. The automatic system of lung sound analysis has high sensitivity (80,81-93,33%) and specificity (83,33-98,99%) and allows to objectivize auscultatory data. Conclusions. The use of automatic classification of lung sounds based on machine learning will improve the efficiency of early diagnosis and monitoring of respiratory pathology.

**Keywords:** neural networks, auscultation, respiratory diseases.

## Введение

Внедрение электронной аускультации легких для практической медицины Беларуси представляется перспективным и целесообразным направлением, так как болезни органов дыхания (БОД) в нашей стране лидируют в структуре заболеваемости, занимают по показателю временной нетрудоспособности первое место и влекут значительные экономические затраты. Большинство острых и хронических БОД диагностируются и мониторируются на амбулаторном этапе медицинской помощи, что не подразумевает использования высокотехнологичных и дорогостоящих методов. Один из основных способов диагностики – аускультация. При исследовании органов дыхания этот метод особенно ценен, так как структура бронхов и лёгких создает условия для появления звуковых феноменов, изменяющихся в больших диапазонах при возникновении какой-либо патологии. Объективизация и мониторинг акустических феноменов, сопоставление их с другими клиническими и функциональными симптомами и анамнезом заболевания представляются важной составляющей в работе пульмонолога, фтизиатра, врача общей практики. На важность исследований звуковых феноменов в пульмонологии с применением электронной аускультации лёгких указывает Международная ассоциация лёгочных звуков [1-8]. В Республике Беларусь данное направление практически не разрабатывалось. Целью данного исследования явилась разработка автоматической системы (АС) оценки состояния органов дыхания.

## Материал и методы

Исследование проводилось с помощью электронного стетоскопа «Ланг Пасс» - беспроводного устройства для опосредованной аускультации легких, которое позволяет записывать аускультативные феномены и передавать их в цифровом виде на другое электронное устройство с помощью технологии Bluetooth с последующей их обработкой (предварительная обработка и представление временных частот в виде спектрограммы) и классификацией.

Используемые технологии и способ действия заключались в следующем: мобильное приложение, представляющее собой клиент, который обеспечивает доступ к функциям сервера (рис.1).

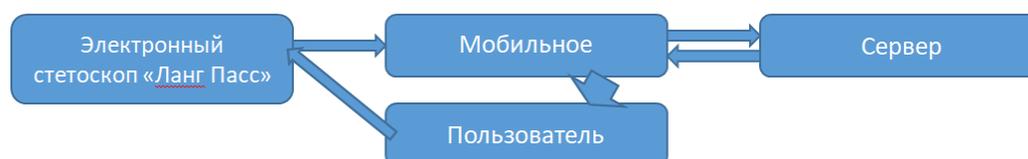


Рис. 1. Основные компоненты приложения

Электронный стетоскоп «Ланг Пасс» осуществляет сбор данных аускультации и их беспроводную передачу в мобильное приложение, которое обеспечивает: управление профилем (возраст, вес, пол, хронические заболевания); аускультацию и классификация звуков; заполнение диагностических анкет; предоставление истории болезни и статистики (собранные данные: результаты анкетирования, результаты аускультации и некоторая агрегированная информация предоставляются в виде визуализированных графиков); обмен данными с

сервером (сбор всех данных, отправка собранных данных на сервер, получение обработанных данных с сервера и представление информации пользователю).

Ядро обработки дыхательных шумов включало: определение типа дыхательного шума и фазы дыхания, визуальную разметку амплитудно-временного отображения сигнала по фазам дыхания и зафиксированные хрипы, цифровую обработку сигналов (шумоподавление, нормализация и частотная фильтрация). Использовались: язык программирования – Python, технология – Tensorflow, Keras.; проектируемые характеристики: время на классификацию записи звука лёгких – до 0,6 с; точность классификации – 93%.

Структура ядра выглядит следующим образом:

- I. Модуль цифровой обработки сигнала.
- II. Модуль автоматического распознавания.
- III. Модуль визуальной разметки и определения фаз дыхания.
- IV. Модуль экспертной системы.

Статистическая обработка данных проведена с использованием методов непараметрической статистики (стандартный пакет программ SPSS 17.0).

Анализ результатов аускультации проводился в два этапа.

1. Определены наиболее значимые симптомы: кашель, дискомфорт в груди, одышка, температура, боль в горле, насморк, слабость. Для формирования выборки определены наиболее распространенные БОД: астма, ХОБЛ, ОРИ, острый и хронический бронхиты, пневмонии. На основе согласованного списка симптомов были созданы иерархические опросники с уточнением характера основных симптомов и включением дополнительных вопросов по анамнезу и факторам риска.

2. Экспертная оценка. Ответ на каждый вопрос взвешивался и варьировался от 0 до 10, чтобы показать его относительную важность для конкретного заболевания. Симптомы оценивались в 10 баллов, причем 10 баллов присваивалось самому важному симптому для конкретного заболевания. Ноль указывал на отсутствие важности. Рабочая группа оценивала каждый симптом в ходе открытого обсуждения, а затем оценивала относительную важность симптома в рамках каждого заболевания и между заболеваниями отдельно для взрослых и детей. Как во время подсчета баллов, так и после того, как все симптомы были оценены по заболеваниям, эксперты проверяли относительность оценок, чтобы выяснить, нет ли явных расхождений. В результате этого метода были получены весовые коэффициенты для всех симптомов по всем выбранным заболеваниям. В результате был создан специальный компьютерный алгоритм (модуль экспертной системы) для оценки результатов анкетирования на основе весовых коэффициентов, который способен оценивать в комплексе и анкетные, и аускультативные данные и объединять их с анамнестическими данными из профиля. Алгоритм модуля экспертной системы был разработан на основе системы взвешенных баллов. Поскольку разработанная анкета имеет древовидную структуру, где дочерние вопросы обычно являются уточняющими для родительского, веса, определяемые экспертами, не суммируются линейно. Вес дочернего ответа умножается на вес родительского ответа, а затем делится на 10, таким образом, вес родительских ответов обычно более ценен, чем вес ответов на уточняющие вопросы. Полученное значение анкеты для каждого заболевания делится на максимально возможный балл для этого заболевания, умноженный на процентный вклад анкеты.

В случае, когда оценивается полная информация с учетом как данных аускультации, так и анкетирования с профильными данными, каждый из этих компонентов имеет свой вклад в конечный результат алгоритма в зависимости от заболевания. Этот вклад определялся в ходе открытого обсуждения в рабочей группе и основывался на мнении экспертов, текущей клинической практике и международных рекомендаций. На основе всех критериев вклада Экспертная система показывает наиболее вероятную причину состояния пользователя и дает рекомендацию, подходящую для этого состояния (выход модуля Экспертной системы).

Валидность разработанного алгоритма и лежащей в его основе балльной системы была внутренне проверена на наборе данных клинических случаев с заранее установленным диагнозом, предоставленным экспертами. Причины ошибок алгоритма были проанализированы инженерами-программистами и представлены на рассмотрение экспертам, после чего некоторые изменения в балльной оценке весов были проведены экспертами в ходе совместной оценки. После этого опросник был передан клиницистам для проверки, которая показала

удовлетворительный результат. Все программное обеспечение было разработано в соответствии со стандартом IEC 62304:2006/A1:2015 и относится к классу В.

Алгоритм был обучен на основе записей, собранных в ходе пилотного многоцентрового перекрестного обсервационного клинического исследования в Республике Беларусь в период с 2017 по 2019 годы в тесном взаимодействии с Белорусской медицинской академией последипломного образования, кафедрой пульмонологии и фтизиатрии в качестве ведущего исследовательского сайта (Ref No 20181692).

### Результаты и обсуждение

Было собрано более 18 000 записей (1565 пациентов), которые были помечены и классифицированы как: нормальное дыхание, сухие хрипы («свистящие» и «басовые»), влажные хрипы (крупно-, средне-, мелкопузырчатые, крепитирующие) и шумы окружающей среды. Данные аускультации, симптомы, анамнез фиксировались в электронном дневнике с последующим сохранением с целью формирования обучающей выборки для алгоритма машинного обучения. По результатам рассчитывали чувствительность (Se) и специфичность (Sp) метода:

$Se = N(ИП)/(N(ИП)+N(ЛО))$  – чувствительность (доля исследований с правильной трактовкой наличия и характера хрипов);

$Sp = N(ИО)/(N(ИО)+N(ЛП))$  – специфичность (доля исследований с правильным заключением об отсутствии хрипов), где ИП – истинно положительный результат, ЛО – ложноотрицательный, ИО – истинно отрицательный, ЛП – ложноположительный.

У пациентов с БА при выявлении и интерпретации сухих «свистящих» хрипов Se метода ЭА составила 97,24%, Sp – 98,83%. У пациентов с ХОБЛ, а также с хроническими и острыми бронхитами, сопровождавшимися появлением сухих хрипов разного тембра, Se составила 80,81%, Sp – 98,99%. При пневмониях, обострении ХОБЛ и бронхоэктатических поражениях иной этиологии, сопровождающихся влажными разнокалиберными хрипами, Se и Sp составили, соответственно: для крупно- и средне-пузырчатых хрипов – 93,33% и 83,33%. Выявление крепитирующих хрипов у 182 пациентов с пневмониями обусловило Se 86,67%, Sp – 98,33%. При ЭА здоровых лиц Se и Sp составили 86,67% и 96,67%.

Прослушивание и анализ аускультативных феноменов, выявленных при ЭА, был предложен 32 врачам (терапевты, пульмонологи, фтизиатры, педиатры) с последующим сопоставлением результатов с данными АС. В результате отмечено, что наибольшую настороженность в отношении выявления возможной патологии продемонстрировали педиатры (71,23% верных интерпретаций). Врачи всех специальностей продемонстрировали наибольшую достоверность при распознавании сухих и крупнокалиберных влажных хрипов. Крепитирующие хрипы, как и единичные сухие, всеми специалистами выявлялись реже – в 40,8% случаев. Наименьшее число правильных ответов при аускультации (28,2%) наблюдалось при наличии у одного пациента сухих «басовых» и «свистящих» хрипов, последние из которых нивелировались более звучными низкочастотными «басовыми» хрипами. С учетом полученных результатов, свидетельствующих о неоднозначной трактовке аускультативных феноменов врачами, разработана визуализация звукового сигнала с возможностью воспроизведения. При анализе и сопоставлении звука и изображения выявлены характерные визуальные особенности каждого аускультативного феномена (рис. 1-5).

Логарифмическая шкала частоты звуковых колебаний Гц, 40-8000/

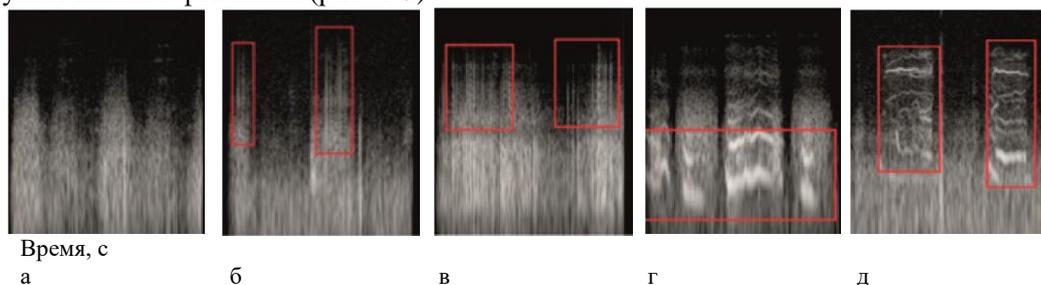


Рис. 1. Частотно-временное представление звукового сигнала при аускультации лёгких у здорового человека (а), крепитирующих хрипов (б), влажных мелкопузырчатых хрипов (в), сухих «басовых» хрипов (г), сухих «свистящих» хрипов (д)

Частотные характеристики большинства дыхательных шумов у здоровых субъектов подразделялись на 3 вида и находились в пределах: низкие частоты – до 100-200 Гц, средние – 200-600 Гц и высокие частоты – более 600 Гц (рис. 1а).

Крепитирующие хрипы характеризовались частотой звуковой волны от 100 до 8000 Гц с доминантной частотой 650 Гц, отдельный феномен имел продолжительность 90-250 мс, кратность повторения хрипов при каждом последующем вдохе не имела сходства с предыдущим (рис. 1б).

Частота крупно-, средне- и мелкопузырчатых хрипов равномерно распределилась в диапазоне 80-6000 Гц с доминантной частотой 350 Гц, продолжительность звучания каждого феномена – до 100 мс, повторяемость была практически идентична (рис. 1в).

Сухие «басовые» хрипы характеризовались частотой до 200 Гц, однако большинство волн находились в диапазоне 80-150 Гц, длительность звучания соответствовала всему акту дыхания, но наибольшая интенсивность звука наблюдалась при вдохе (рис. 1г).

Особенностью сухих «свистящих» хрипов стали частотные характеристики в широком диапазоне – от 200 до 8000 Гц, чаще наблюдались звуковые волны в диапазонах 250-400 Гц и 2500 Гц, выявление хрипов происходило в основном на выдохе, длительность варьировала в широких пределах – от 1 до 5 с (рис. 1д).

### Заключение

1. Метод автоматической классификации аускультативных феноменов на базе машинного обучения имеет высокие показатели чувствительности и специфичности; применим для раннего обнаружения и мониторинга (в том числе дистанционного) бронхолегочных заболеваний.

2. Визуализация звуковой волны позволяет объективизировать результаты аускультации, при традиционном обследовании во многом зависящие от субъективных факторов.

3. Физические характеристики аускультативных феноменов являются дифференциально-диагностическими признаками разных патологических процессов, АС способна самостоятельно анализировать полученные аускультативные данные и строить алгоритм дальнейшей оценки состояния пациента, особенно при нежелательном проведении рентгенологического обследования (беременные, дети и др.).

4. Возможность ревизии результатов исследования упростит проведение экспертной оценки процесса обследования пациента.

### Список литературы

1. Almeida, A. B. Crackling sound generation during the formation of liquid bridges: A lattice gas model / A. B. Almeida, S. V. Buldyrev, A. M. Alencar // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. – 2013. – Vol. 392, iss. 16. – P. 3409-3416. – doi: 10.1016/j.physa.2013.03.038
2. Auscultation of the respiratory system / M. Sarkar [et al.] // *Ann. Thorac. Med.* – 2015. – Vol. 10, iss. 3. – P. 158-168. – doi: 10.4103/1817-1737.160831.
3. Ida, J. B. Pediatric stridor / J. B. Ida, D. M. Thompson // *Otolaryngol. Clin. N. Am.* – 2014. – Vol. 47, iss. 5. – P. 795819. – doi: 10.1016/j.otc.2014.06.005.
4. Аускультация легких – современная номенклатура дыхательных шумов / А. В. Катилов [и др.] // *Дитячий лікар*. – 2016. – № 5. – С. 5-13.
5. A case of Hamman's Sign: Value of auscultation / A. Patel [et al.] // *Cardio Vasc. Syst.* – 2014. – Vol. 2. – P. 4. – doi: 10.7243/2052-4358-2-4.
6. Интрапульмональная электронная аускультация у пациентов с хронической обструктивной болезнью легких и бронхиальной астмой: первые результаты и перспективы / Ю. В. Петров [и др.] // *МедиАль*. – 2017. – № 1 (19). – С. 37.
7. Analysis of respiratory sounds: State of the art / S. Reichert [et al.] // *Clin. Med. Circ. Respirat. Pulm. Med.* – 2008. – Vol. 2. – P. 45-58. – doi: 10.4137/ccrpm.s530.
8. Anterior crackles: A neglected sign? / M. Sud [et al.] // *Can. J. Cardiol.* – 2013. – Vol. 29, iss. 9. – P. 1138.e1-1138.e2. – doi: 10.1016/j.cjca.2012.11.014.