

<https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-4-57-64>
УДК 616.2-07:004.92

Использование компьютерной визуализации в анализе кривых дыхания

О.Г. Берестнева, И.А. Осадчая, И.А. Лызин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Российская Федерация, Томск, пр. Ленина, 30

Аннотация

Цель исследования: изучить особенности дыхательного процесса на основе анализа кривых дыхания у больных с различными формами бронхиальной астмы с помощью методов компьютерной визуализации.

Материал и методы. Экспериментальные данные представляли собой кривые дыхания у пациентов с различными типами бронхиальной астмы и у группы условно здоровых людей, зарегистрированных с помощью прибора MONITOR. На этапе цифровой обработки для выявления характерных особенностей кривых дыхания в каждой группе был использован оригинальный алгоритм спектрально-временного анализа.

Результаты. Проанализированы кривые дыхания и получены типичные графические образы для группы условно здоровых лиц и четырех групп пациентов с различными видами бронхиальной астмы (в соответствии с классификацией Е.В. Немерова).

Заключение. После проведения спектрально-временного анализа удалось получить характерные «единичные» графические образы кривой дыхания пациентов с различными формами бронхиальной астмы. Полученные графические образы могут быть использованы в качестве дополнительного диагностического критерия. Предложенный авторами алгоритм может быть также применен при анализе любых других биосигналов.

Ключевые слова:	бронхиальная астма, визуализация данных, представление информации, анализ данных.
Конфликт интересов:	авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Прозрачность финансовой деятельности:	исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения научных проектов № 19-37-90005, № 18-07-00543.
Для цитирования:	Берестнева О.Г., Осадчая И.А., Лызин И.А. Использование компьютерной визуализации в анализе кривых дыхания. <i>Сибирский журнал клинической и экспериментальной медицины</i> . 2020;35(4):57–64. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-4-57-64 .

Computer visualization in breathing curve analysis

Olga G. Berestneva, Irina A. Osadchaya, Ivan A. Lyzin

National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin ave., Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

The aim. To study the features of the breathing process based on the breathing curve analysis in patients with various forms of bronchial asthma using computer visualization methods.

Material and Methods. The experimental data comprised breathing curves registered with the MONITOR device in patients with various bronchial asthma types and a group of apparently healthy people. The original algorithm of spectral-time analysis was used to identify the characteristic features of the breathing curves in each group at the stage of digital processing.

Results. Breathing curves were analyzed and typical images were obtained for the group of apparently healthy individuals and four groups of patients with various types of bronchial asthma (following the classification of E.V. Nemerov).

Conclusion. A spectral-time analysis allowed us to obtain characteristic “single” graphical images of the breath curve in patients with various forms of bronchial asthma. The resulting images can be used as an additional diagnostic criterion. The algorithm proposed by the authors can also be used in the analysis of any other biosignals.

Keywords:	bronchial asthma, data visualization, reporting, data analysis.
Conflict of interest:	the authors do not declare a conflict of interest.
Financial disclosure:	the study was carried out with the partial financial support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) as part of research projects No. 19-37-90005 and No. 18-07-00543.
For citation:	Berestneva O.G., Osadchaya I.A., Lyzin I.A. Computer visualization in breathing curve analysis. <i>The Siberian Journal of Clinical and Experimental Medicine</i> . 2020;35(4):57–64. https://doi.org/10.29001/2073-8552-2020-35-4-57-64 .

Введение

Применение методов компьютерной визуализации в исследовательских работах не только увеличивает скорость передачи информации, повышает уровень ее понимания, но и способствует развитию таких важных для специалиста любой отрасли качеств, как интуиция, профессиональное «чутье», образное мышление. Так, воздействие интерактивной компьютерной графики привело к возникновению нового направления в проблематике искусственного интеллекта, названного когнитивной (способствующей познанию) компьютерной графикой. Использование когнитивной графики дает возможность пользователю сделать определенные выводы, не анализируя большое количество информации. Отдельное направление когнитивная графика образует в медицинских исследованиях. Визуализация текущего состояния пациента позволяет обеспечить непрерывный контроль за его состоянием. В статье рассматривается использование компьютерной визуализации для исследования особенностей такого распространенного заболевания, как бронхиальная астма.

Цель настоящего исследования: анализ кривых дыхания у различных групп пациентов с этим заболеванием, разделенных по степени влияния психосоциальных факторов на возникновение, развитие и течение бронхиальной астмы.

Бронхиальная астма (от греческого *asthma* – тяжелое дыхание, удушье) – это хроническое воспалительное заболевание дыхательных путей, которое вызывает периодические приступы кашля, хрипы, одышки и стеснения в груди, которому подвержены все возрастные группы людей. Оно может протекать в виде единичных, эпизодических приступов либо иметь тяжелое течение с астматическим статусом и летальным исходом. За последние годы заболеваемость бронхиальной астмой в большинстве стран значительно возросла, чему свидетельствуют данные медицинской статистики. Увеличение распространенности заболевания среди лиц молодого возраста указывает на сохраняющуюся тенденцию роста частоты этого заболевания. Несмотря на научные достижения в области этиологии и наличие новых лекарственных средств, заболеваемость и смертность от бронхиальной астмы постоянно возрастают. Это характерно для большинства стран мира.

Роль эмоциональных и психосоциальных факторов в развитии бронхиальной астмы оценивается различными специалистами противоречиво, и механизмы остаются неясными. Вероятно, это связано с тем, что все больные

бронхиальной астмой расцениваются ими как однородная популяция людей в плане соматического статуса, но с разными психологическими состояниями. Кроме того, клиницисты (пульмонологи, терапевты) не всегда придают значение тому факту, что разные эмоциональные состояния и психические расстройства влекут за собой различные физиологические реакции у здоровых и больных. То есть многообразие психологических воздействий вызывает многообразие психологических и соматических изменений в различных группах больных бронхиальной астмой, что диктует необходимость изучения психологических (психических) и социальных факторов в тесной взаимосвязи с клиническими.

Е.В. Немеров предложил классификацию бронхиальной астмы с учетом социальных и психологических факторов [1]: BANP – бронхиальная астма непсихогенная; BASP – бронхиальная астма сомато-психогенная; BAPI – бронхиальная астма психогенно-индуцированная.

Существует множество подходов и методов, применяемых к анализу кривых дыхания. Так, например, О.Н. Величко и соавт. для анализа кривых дыхания предложили использовать вейвлет-спектрограммы, которые являются важнейшим продуктом вейвлет-анализа и дополнением к обычному оконному преобразованию Фурье [2].

Достаточно часто применяется спектральный анализ, позволяющий выделить из сложного колебания составляющие его исходные, более простые колебания и установить, каковы их частоты и интенсивность [3].

В зарубежных источниках [4, 5] описываются исследования, в которых выделение паттерна ненормального дыхания происходит путем разделения всей записи на дыхательные полуволны, проводится анализ этих полуволн (наклон, амплитуда). Кроме того, упоминаются такие методы, как анализ вариации (во временной области, частотное распределение, спектральная мощность), локальный фрактальный анализ и т. д. для определения и исследования характеристик кривой дыхания.

С. Пинкус предложил использовать подход, основанный на применении показателей приближенной энтропии (ApEn). Суть данного подхода заключается в качественно новых возможностях исследования процессов жизнедеятельности, что предполагает использование методов нелинейной динамики, в том числе «теории хаоса» [6].

Также следует отметить еще один из перспективных способов обработки и анализа данных – посредством трансформирования их в сети. Концепцию впервые предложили в 2006 г. М. Смол (Michael Small), Ц. Чжан (Jie Zhang) и С. Сюй (Xiaoke Xu) [7]. В настоящее время этот

подход к анализу данных успешно используется во многих сферах, в том числе и в медицине, для анализа биосигналов [8].

Особый интерес представляет подход, основанный на методах машинного обучения и нейронных сетях. Так, например, в [9] предложена схема выделения признаков на основе спектральных поддиапазонов, которая работает с классификаторами искусственных нейронных сетей (ANN) и опорных векторов (SVM) для многоканального сигнала. Спектральная плотность мощности (PSD) оценивается по извлеченному циклу звука легкого с использованием метода Уэлча, который затем разлагается на однородные поддиапазоны. Набор статистических характеристик вычисляется из каждого поддиапазона и применяется к классификаторам ANN и SVM для определения нормальных и астматических субъектов.

Сотрудники Сибирского государственного медицинского университета и Национального исследовательского Томского политехнического университета на протяжении нескольких лет проводили исследование по обнаружению достоверных различий между группами пациентов (по психологическим и физиологическим показателям) с заболеванием бронхиальной астмой, разделенных по степени влияния психосоциальных факторов на возникновение, развитие и течение болезни [1, 10–14]. Для выявления скрытых закономерностей в экспериментальных

данных были использованы методы структурного анализа, в том числе методы научной визуализации [15–20].

Предметом данного исследования является процесс дыхания пациентов с различными формами бронхиальной астмы. Как известно, бронхиальная астма – это прежде всего заболевание дыхательных путей, поэтому исследование ритма дыхания пациента, формы кривой дыхания, наличия апноэ, продолжительности цикла «вдох – выдох» и т. д. несет в себе большую значимость [12, 20–23].

Материал и методы

Экспериментальные данные представляли собой кривые дыхания у пациентов с различными типами бронхиальной астмы и у группы условно здоровых людей, зарегистрированных с помощью прибора MONITOR. Данный прибор фиксировал значения кривой дыхания с частотой дискретизации 6 Гц (рис. 1). Показатели снимались как у пациентов с бронхиальной астмой, так и у здоровых людей на протяжении 3 ч в ночное время суток.

Кривые дыхания можно представить как последовательность значений, взятых в дискретные моменты времени t_i (где i – индекс). Промежутки времени между последовательными отсчетами (интервалы дискретизации)

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} \text{ постоянны и в нашем случае равны } \frac{1000 \cdot i \cdot \bar{n}}{6}.$$

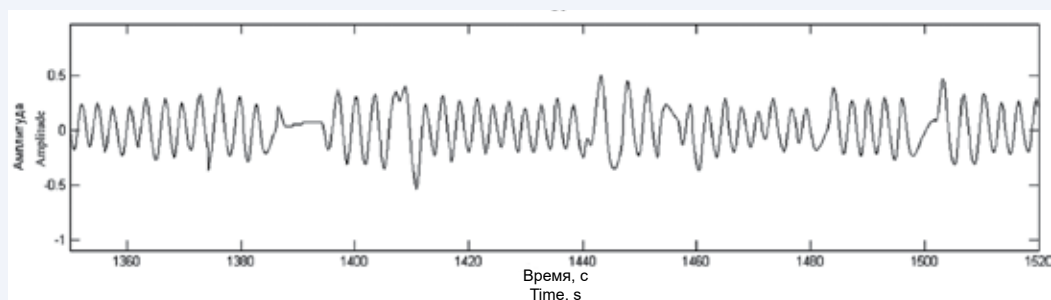


Рис. 1. Пример кривой дыхания
Fig. 1. Example of a breath curve

Предварительно исходные сигналы были отфильтрованы по частотам. Для фильтрации использовался треугольный фильтр. Треугольный фильтр относится к рекурсивным цифровым фильтрам второго порядка, который описывается разностным уравнением:

$$y(n) = -a_1 y(n-1) + a_0 y(n-2) + b_2 x(n) + b_1 x(n-1) + b_0 x(n-2).$$

Передаточная функция фильтра:

$$H(z) = \frac{b_2 + b_1 z^{-1} + b_0 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_0 z^{-2}}.$$

После подстановки $z = e^{j\omega}$, где $\omega = \omega T$, T – нормированная частота, получим частотную передаточную функцию:

$$H(e^{j\omega}) = \frac{b_2 + b_1 e^{-j\omega} + b_0 e^{-j2\omega}}{1 + a_1 e^{-j\omega} + a_0 e^{-j2\omega}}.$$

Граничные значения амплитудно-частотной характеристики, соответствующие значениям частоты $\omega = 0$ и $\omega = \pi$, определяются выражениями:

$$H(1) = \frac{b_2 + b_1 + b_0}{1 + a_1 + a_0}; H(2) = \frac{b_2 - b_1 - b_0}{1 - a_1 - a_0}.$$

Фильтр имеет два полюса и два нуля. В виде системы неравенств для коэффициентов характеристического полинома записывается условие устойчивости фильтра

$$A(z) = z^2 + a_1 z + a_0$$

$$1 + a_1 + a_0 > 0;$$

$$1 - a_1 + a_0 > 0;$$

$$1 + a_0 > 0.$$

Далее был использован метод спектрально-временного анализа для получения спектрального образа кривой дыхания пациентов с целью дальнейшего поиска и выделения фрагментов характерных графических образов у имеющих групп пациентов.

На первом этапе оценивался частотный спектр кривой дыхания каждого пациента (рис. 2).

Как видно из рисунка 2, основной спектр частот у пациентов с различными формами заболевания бронхиальной астмой сосредоточен в интервале от 0 до 0,6 Гц.

Полученные результаты подтверждает также и анализ спектрограмм, построенных в плоскости «время – частота» (цветом задается уровень частотных составляющих сигнала), рисунок 3.

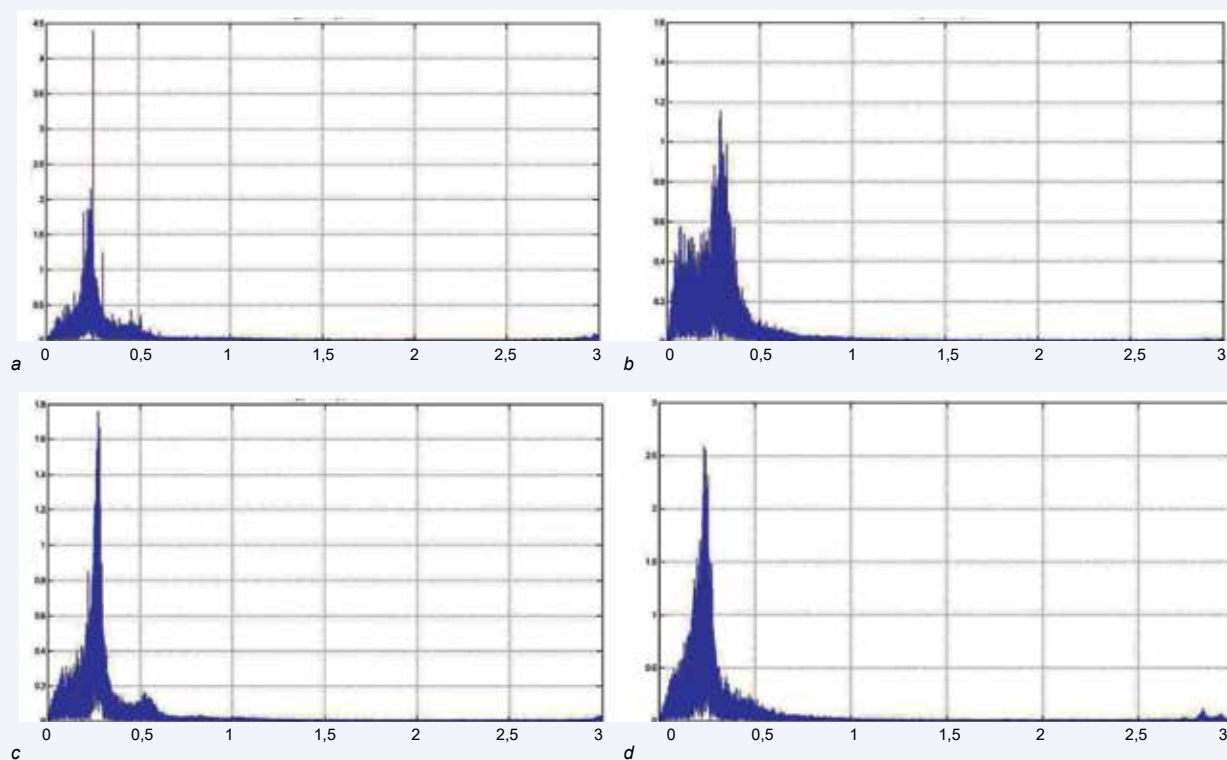


Рис. 2. Частотный спектр кривой дыхания (Гц): *a* – здорового человека, *b* – BANP, *c* – BAPI, *d* – BASP
Fig. 2. The frequency spectrum of breathing curve (Hertz): *a* – healthy person; *b* – BANP; *c* – BAPI; *d* – BASP

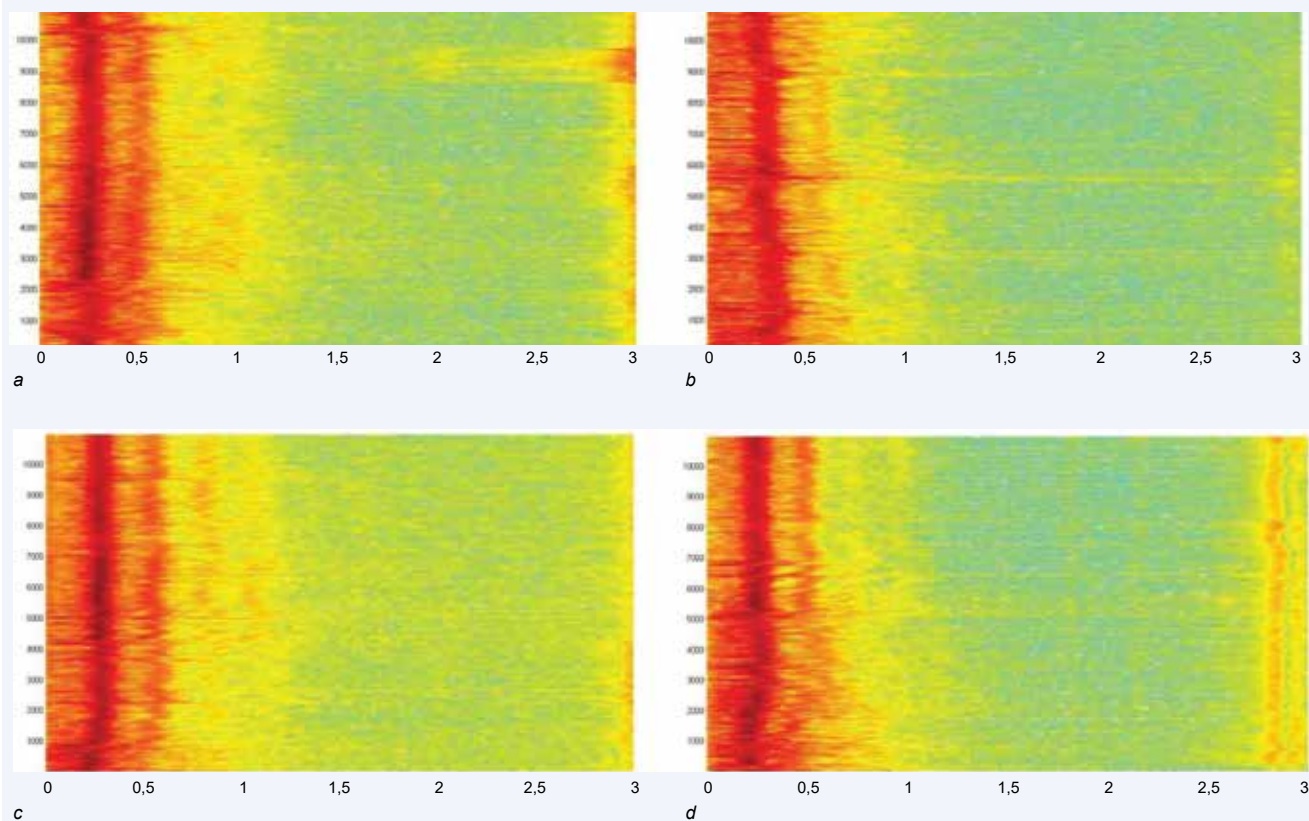


Рис. 3. Спектрограмма кривой дыхания (Гц): *a* – здорового человека, *b* – BANP, *c* – BAPI, *d* – BASP
Fig. 3. The spectrogram curve of the breath (Hertz): *a* – healthy person; *b* – BANP; *c* – BAPI; *d* – BASP

Анализ спектрограмм показал, что наиболее высокий уровень частотных составляющих сигнала располагается в диапазоне от 0,15 до 0,40 Гц. Суть предложенного метода состоит в том, чтобы отфильтровать сигнал множеством треугольных фильтров на определенных частотах с дальнейшим представлением результата в виде спектрального образа. На рисунке 4 изображена блок-схема алгоритма метода. Полностью разработанный авторами алгоритм, реализованный в среде MatLab, представлен в [11].

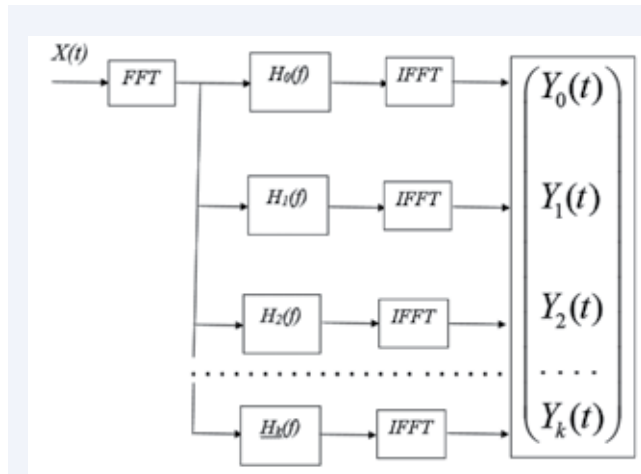


Рис. 4. Блок-схема алгоритма метода спектрально-временного анализа кривых дыхания
Fig. 4. Block diagram of the algorithm for spectral-time analysis of breathing curves

$H_k(f)$ – передаточная функция фильтра.

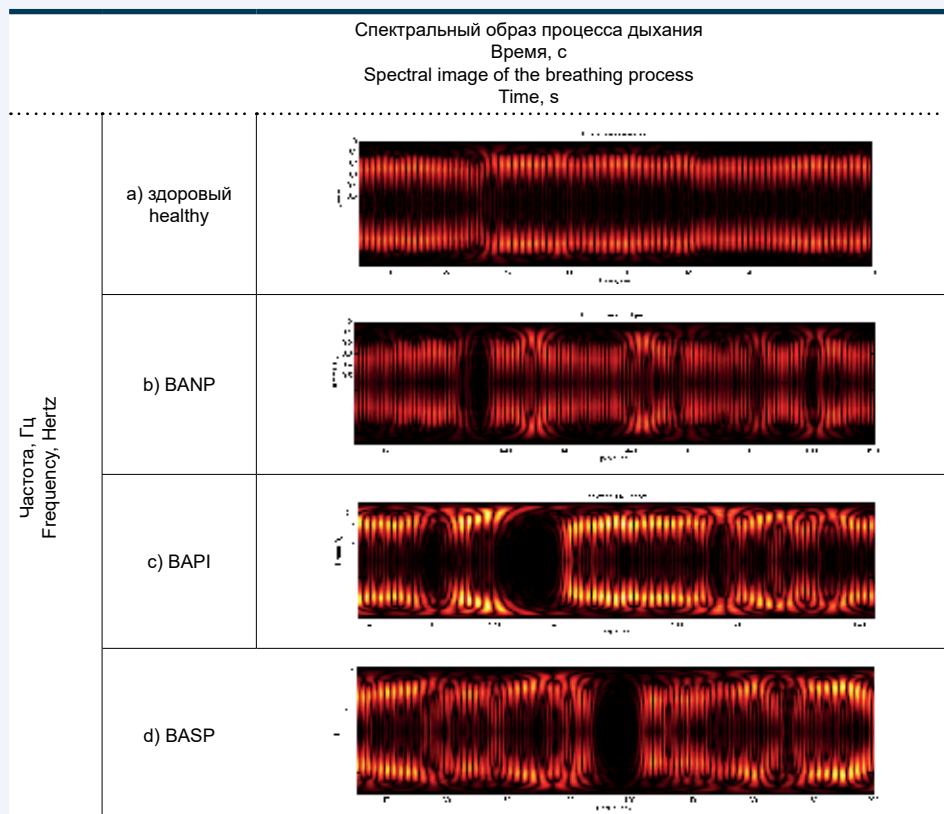
$$H_k(f) = \begin{cases} 0, & f_k^3 < f < f_k^1 \\ \frac{f - f_k^1}{f_k^2 - f_k^1}, & f_k^1 \leq f \leq f_k^2 \\ \frac{f - f_k^3}{f_k^2 - f_k^3}, & f_k^2 \leq f \leq f_k^3, \end{cases}$$

где f – частота сигнала, f_k^i – частоты фильтра ($i = 1, \dots, k$). FFT – быстрое преобразование Фурье. $IFFT$ – обратное быстрое преобразование Фурье.

Результаты

После фильтрации сигнала на определенной частоте меняется частота фильтрации, процедура повторяется. Результатом работы алгоритма является матрица значений, на основе которой формируются спектральные образы кривых дыхания. Результат представляется в виде изображения, где каждый элемент матрицы соответствует прямоугольной области на изображении, а значение элементов матрицы определяет цвет текущей палитры. Алгоритм реализован в среде MatLab. В таблице 1 представлены результаты работы алгоритма.

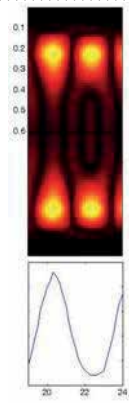
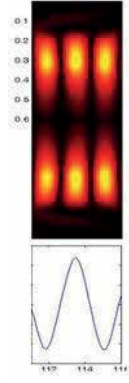
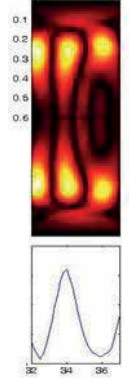
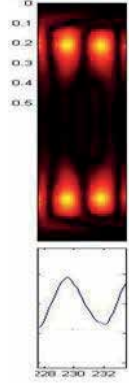
Таблица 1. Спектральные образы процесса дыхания с диагнозом
Table 1. Spectral image of the breathing process with a diagnosis



После тщательного изучения спектральных образов кривых дыхания пациентов различных групп удалось выделить несколько характерных «единичных» графических образов (соответствующих одному дыхательному

циклу) для пациентов с различными формами бронхиальной астмы и условно здоровых людей (табл. 2).

Таблица 2. «Единичные» графические образы для различных групп испытуемых
Table 2. «Single» graphic images for different groups of subjects

Диагноз Diagnosis	Характерный графический образ для одного дыхательного цикла Typical graphic image for a single respiratory cycle
Практически здоров Practically healthy	
Бронхиальная астма непсихогенная (BANP) Bronchial asthma, non-psy- chogenic (BANP)	
Бронхиальная астма сомато-психогенная (BASP) Bronchial asthma, somatic psychogenic (BASP)	
Бронхиальная астма психогенно-индуцированная (BAPI) Bronchial asthma, psycho- genically induced (BAPI)	

Закключение

После проведения спектрально-временного анализа удалось получить характерные «единичные» графические образы кривой дыхания пациентов с различными формами бронхиальной астмы. Как видно из таблицы 1, спектральный образ кривой дыхания здорового человека заметно отличается практически от всех образов, характерных для пациентов с различными формами бронхиальной астмы. Вместе с тем спектральные образы кривых дыхания у пациентов из группы с диагнозом BASP

больше всего похожи на спектральный образ, характерный для группы условно здоровых; имеется некоторое сходство со спектральными образами пациентов с диагнозом BAPI. Заметно отличается от остальных характерный спектральный образ кривой дыхания пациентов с диагнозом BANP.

Полученные результаты подтверждают сделанные ранее выводы [11, 13, 14, 18, 19, 22] о наличии характерных физиологических и психофизиологических особенностей у пациентов с диагнозами BASP, BAPI и BANP.

Литература

1. Немеров Е.В., Языков К.Г., Берестнева О.Г., Жаркова О.С. Анализ темпоральных событий у больных бронхиальной астмой. Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XX Байкальской Всероссийской конференции и Школы-семинара научной молодежи, Иркутск, 30.06–7.07.2015. Иркутск: ИСЭМ СО РАН; 2015:241–246.
2. Величко О.Н., Карпенко С.А., Пашенко А.А., Попов А.В. Метод обработки реограммы легкого с использованием вейвлет-технологии. Вестник НТУ «ХПИ». Серия «Информатика и моделирование». 2008;(24):11–18.
3. Красников Г.В., Ефимова Д.Ю., Тюрина М.И., Коняева Т.Н., Красникова И.В., Пискунова Г.М. Контроль дыхания как фактор модуляции колебаний микроциркуляторного кровотока кожи человека. Известия ТулГУ. Естественные науки. 2016;(1):115–123.
4. Jubran A., Grant B.J.B., Tobin M.J. Effect of hyperoxic hypercapnia on variational activity of breathing. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 1997;156(4):1129–1139. DOI: 10.1164/ajrccm.156.4.97-01080.
5. Seely A.J.E., Macklem P.T. Complex systems and the technology of variability analysis. *Crit. Care.* 2004;8(6):R367–R384. DOI: 10.1186/cc2948.
6. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *PNAS.* 1991;88(6):2297–2301. DOI: 10.1073/pnas.88.6.2297.
7. Zhang J., Small M. Complex network from pseudoperiodic time series: Topology versus dynamics. *Phys. Rev. Lett.* 2006;96(32):238701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.238701.
8. Lacasa L., Luque B., Ballesteros F., Luque J., Nuno J.C. From time series to complex networks: The visibility graph. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2008;105(13):4972–4975.
9. Islam M.A., Bandyopadhyaya I., Bhattacharyya P., Saha G. Multi-channel lung sound analysis for asthma detection. *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* 2018;159:111–123. DOI: 10.1016/j.cmpb.2018.03.002.
10. Берестнева О.Г., Жаркова О.С., Немеров Е.В., Языков К.Г., Фокин В.А. Система поддержки научных исследования психогенных форм бронхиальной астмы. Труды Байкальской Всероссийской конференции «Информационные и математические технологии в науке и управлении». Ч. III. Иркутск: ИСЭМ СО РАН; 2014.
11. Карпенко П.В., Берестнева О.Г., Степанов Д.Ю. Компьютерный анализ спирограммы у больных бронхиальной астмой. Информационные технологии в науке, управлении, социальной сфере и медицине: Сборник научных трудов Международной конференции. Ч. I. Томск: Изд-во ТПУ; 2014:211–220.
12. Берестнева О.Г., Шаропин К.А., Абдуллина Н.Г., Степаненко Н.П., Юмашева А.Л., Жаркова О.С. и др. Математические методы и информационные технологии в задачах оценки состояния биосистем. Томск: Изд-во ТПУ; 2015:200.
13. Осадчая И.А., Берестнева О.Г., Немеров Е.В. Анализ многомерных медицинских данных с помощью пиктограмм «лица Чернова». *Бюллетень сибирской медицины.* 2014;13(4):89–93. DOI: 10.20538/1682-0363-2014-4-89-93.
14. Берестнева О.Г., Осадчая И.А., Немеров Е.В. Методы исследования структуры медицинских данных. Вестник науки Сибири. Серия 10. Медицинские технологии. 2012;1(2):333–338.
15. Osadchaya I.A., Berestneva O.G., Volovodenco V.A., Marukhina O.V. Multidimensional data visualization methods based on generalized graphic images. *Communications in Computer and Information Science.* 2014;466:568–575.
16. Осадчая И.А., Прокопьев Р.О. Технологии визуализации в задачах оценки функционального состояния. *Электронный научный журнал «Инженерный вестник Дона».* 2014;4(2).
17. Берестнева О.Г., Осадчая И.А., Бурцева А.Л. Методы анализа и визуализации многомерных данных. Томск: Изд-во Томского политехнического университета; 2014:98.
18. Воловоденко В.А., Берестнева О.Г., Немеров Е.В., Осадчая И.В. Применение методов визуализации при исследовании структуры экспериментальных многомерных данных. *Известия Томского политехнического университета.* 2012;320(5):125–130.
19. Kinash N.A., Trufanov A.I., Tikhomirov A.A., Berestneva O.G., Fisoichenko O.N. Network vulner ability in two-phase evolution. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2016.
20. Devjtykh D., Gerget O., Berestneva O.G. Sleep apnea detection on dynamic neural networks. *Communications in Computer and Information Science.* Volgograd: Springer Verlag; 2014:556–567.
21. Вилунас Ю. Рыдающее дыхание излечивает бронхиальную астму и другие заболевания органов дыхания. СПб.: Питер; 2013:224.
22. Карпенко П.В., Немеров Е.В. Исследование ритма дыхания у больных бронхиальной астмой во время ночного сна. Материалы VI Международной студенческой электронной научной конференции «Студенческий научный форум». URL: <http://www.scienceforum.ru/2014/482/2949>.
23. Зулкарнеев Р.Х. Кардиореспираторная вариабельность при заболеваниях органов дыхания: дис. ... д-ра мед. наук. М.; 2007:312.
4. Jubran A., Grant B.J.B., Tobin M.J. Effect of hyperoxic hypercapnia on variational activity of breathing. *Am. J. Respir. Crit. Care Med.* 1997;156(4):1129–1139. DOI: 10.1164/ajrccm.156.4.97-01080.
5. Seely A.J.E., Macklem P.T. Complex systems and the technology of variability analysis. *Crit. Care.* 2004;8(6):R367–R384. DOI: 10.1186/cc2948.
6. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *PNAS.* 1991;88(6):2297–2301. DOI: 10.1073/pnas.88.6.2297.
7. Zhang J., Small M. Complex network from pseudoperiodic time series: Topology versus dynamics. *Phys. Rev. Lett.* 2006;96(32):238701. DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.238701.
8. Lacasa L., Luque B., Ballesteros F., Luque J., Nuno J.C. From time series to complex networks: The visibility graph. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 2008;105(13):4972–4975.
9. Islam M.A., Bandyopadhyaya I., Bhattacharyya P., Saha G. Multi-channel lung sound analysis for asthma detection. *Computer Methods and Programs in Biomedicine.* 2018;159:111–123. DOI: 10.1016/j.cmpb.2018.03.002.

References

1. Nemerov E.V., Yazykov K.G., Berestneva O.G., Zharkova O.S. Analysis of temporal events in patients with bronchial asthma. Information and mathematical technologies in science and management: proceedings of the XX Baikal all-Russian conference and School-seminar of scientific youth, Irkutsk, June 30–July 7, 2015. Irkutsk: ISEM SB RAS; 2015:241–246 (In Russ.).
2. Velichko O.N., Karpenko S.A., Paschenko A.A., Popov A.V. Method for processing lung rheogram using wavelet technology. *Bulletin of National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute". Series "Computer Science and Modeling".* 2008;(24):11–18 (In Russ.).
3. Krasnikov G.V., Efimova D.Yu., Tyurina M.Y., Konyaeva T.N., Krasnikova I.V., Piskunova G.M. Breath control as a factor of modulation of fluctuations of microcirculatory blood flow of human skin. *Proceedings of the Tula State University. Natural Science.* 2016;(1):115–123 (In Russ.).

10. Berestneva O.G., Zharkova O.S., Nemerov E.V., Yazykov K.G., Fokin V.A. Support system for scientific research of psychogenic forms of bronchial asthma. Proceedings of the Baikal all-Russian conference "Information and mathematical technologies in science and management". P. III. Irkutsk: ISEM SB RAS, 2014 (In Russ.).
11. Karpenko P.V., Berestneva O.G., Stepanov D.Yu. Computer analysis of spiogram in patients with bronchial asthma. Information technologies in science, management, social sphere and medicine: Collection of scientific papers of the International conference. P. I. Tomsk: TPU Publishing House; 2014:211–220 (In Russ.).
12. Berestneva O.G., Sharopin K.A., Abdulkina N.G., Stepanenko N.P., Yumasheva A.L., Zharkova O.S. et al. Mathematical methods and information technologies in problems of assessing the state of biosystems. Tomsk: TPU Publishing House; 2015:200 (In Russ.).
13. Osadchaya I.A., Berestneva O.G., Nemerov E.V. Analysis of multidimensional medical data using pictographs "Chernoff faces". *Bulletin of Siberian Medicine*. 2014;13(4):89–93 (In Russ.). DOI: 10.20538/1682-0363-2014-4-89-93.
14. Berestneva O.G., Osadchaya I.A., Nemerov E.V. Methods of research of the structure of medical data. *Bulletin of Siberian Science. Series 10. Medical Technology*. 2012;1(2):333–338 (In Russ.).
15. Osadchaya I.A., Berestneva O.G., Volovodenco V.A., Marukhina O.V. Multidimensional data visualization methods based on generalized graphic images. *Communications in Computer and Information Science*. 2014;466:568–575.
16. Osadchaya I.A., Prokopenko R.O. Visualization technologies in functional state assessment problems. *Electronic Scientific Journal "Engineering Bulletin of the Don"*. 2014;4(2) (In Russ.).
17. Berestneva O.G., Osadchaya N.A., Burtseva A.L. Methods of analysis and visualization of multidimensional data. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House; 2014:98 (In Russ.).
18. Volovodenco V.A., Berestneva O.G., Nemerov E.V., Osadchaya I.V. Application of visualization methods in the study of the structure of experimental multidimensional data. *Proceedings of Tomsk Polytechnic University*. 2012;320(5):125–130 (In Russ.).
19. Kinash N.A., Trufanov A.I., Tikhomirov A.A., Berestneva O.G., Fisoichenko O.N. Network vulner ability in two-phase evolution. 2016 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2016 – Proceedings. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.; 2016.
20. Devjtykh D., Gerget O., Berestneva O.G. Sleep apnea detection on dynamic neural networks. *Communications in Computer and Information Science*. Volgograd: Springer Verlag; 2014:556–567.
21. Vilunas Yu. Sobbing breath cures bronchial asthma and other respiratory diseases. St.-Petersburg: Piter; 2013:224 (In Russ.).
22. Karpenko P.V., Nemerov E.V. Study of the respiratory rhythm in patients with bronchial asthma during night sleep. Materials of the VI International student electronic scientific conference "Student Scientific Forum" (In Russ.). URL: <http://www.scienceforum.ru/2014/482/2949>.
23. Zulkarneev R.H. Cardiorespiratory variability in respiratory diseases: Dis. ... Dr. (Med.) Sci. Moscow; 2007:312 (In Russ.).

Информация о вкладе авторов

Берестнева О.Г. – постановка целей и задач исследования, анализ результатов, формулировка выводов.

Осадчая И.А. – анализ и интерпретация данных, написание первой версии рукописи.

Лызин И.А. – анализ и интерпретация данных, доработка и редактирование рукописи.

Information on author contributions

Berestneva O.G. – setting research goals and objectives, analyzing results, and drawing conclusions.

Osadchaya I.A. – analysis and interpretation of data and writing the first version of the manuscript.

Lyzin I.A. – analysis and interpretation of data, revision and editing of the manuscript.

Сведения об авторах

Берестнева Ольга Григорьевна, д-р техн. наук, профессор, отделение информационных технологий, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. ORCID 0000-0002-4243-0637.

E-mail: ogb6@yandex.ru.

Осадчая Ирина Анатольевна, аспирант, отделение информационных технологий, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. ORCID 0000-0002-6694-7745.

E-mail: irishka_tomsk@mail.ru.

Лызин Иван Александрович, аспирант, отделение информационных технологий, Инженерная школа информационных технологий и робототехники, Национальный исследовательский Томский политехнический университет. ORCID 0000-0003-2827-441X.

E-mail: Lyzin@tpu.ru.

Information about the authors

Olga G. Berestneva, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Information Technologies, School of Computer Science & Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University. ORCID 0000-0002-4243-0637.

E-mail: ogb6@yandex.ru.

Irina A. Osadchaya, Postgraduate Student, Department of Information Technologies, School of Computer Science & Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University. ORCID 0000-0002-6694-7745.

E-mail: irishka_tomsk@mail.ru.

Ivan A. Lyzin, Postgraduate Student, Department of Information Technologies, School of Computer Science & Robotics, National Research Tomsk Polytechnic University. ORCID 0000-0003-2827-441X.

E-mail: Lyzin@tpu.ru.

 **Olga G. Berestneva**, e-mail: ogb6@yandex.ru.

Received October 01, 2020

 **Берестнева Ольга Григорьевна**, e-mail: ogb6@yandex.ru.

Поступила 01.10.2020