

УДК 51.76

DOI: 10.18799/29495407/2023/4/38

Компьютерная визуализация в анализе кривых дыхания

О.Г. Берестнева✉, Г.Е. Шевелев, И.А. Лызин

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉ Lyzin@tpu.ru

Аннотация. Применение методов компьютерной визуализации в исследовательских работах не только увеличивает скорость передачи информации и 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 человеку, не анализируя большого количества информации, сделать определенные выводы. Отдельное направление в медицинских исследованиях – когнитивная графика. Визуализация текущего состояния пациента позволяет обеспечить непрерывный контроль за его здоровьем. В статье рассматривается использование компьютерной визуализации для исследования особенностей такого распространенного заболевания, как бронхиальная астма. Цель исследования – анализ спирограмм у различных групп пациентов с этим заболеванием, разделенных по степени влияния психосоциальных факторов на возникновение, развитие и течение бронхиальной астмы.

Ключевые слова: Бронхиальная астма, визуализация данных, представление информации, анализ данных.

Благодарности. Исследование выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках выполнения научных проектов № 19-37-90005, № 18-07-00543.

Для цитирования: Берестнева О.Г., Шевелев Г.Е., Лызин И.А. Компьютерная визуализация в анализе кривых дыхания // Известия Томского политехнического университета. Промышленная кибернетика. – 2023. – Т. 1. – № 4. – С. 7–20. DOI: 10.18799/29495407/2023/4/38

UDC 51.76

DOI: 10.18799/29495407/2023/4/38

Computer visualization in curve breathing analysis

O.G. Berestneva✉, G.E. Shevelev, I.A. Lyzin

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ ogb6@yandex.ru

Abstract. The use of computer visualization methods in research not only increases the speed of information transfer and the level of its understanding, but also contributes to the development of qualities that are important for a specialist in any field, such as intuition, professional “feeling,” and imaginative thinking. Thus, the impact of interactive computer graphics has led to the emergence of a new direction in the field of artificial intelligence, called cognitive (knowledge-enhancing) computer graphics. The use of cognitive graphics allows a person to draw certain conclusions without analyzing a large amount of information. A separate direction – cognitive graphics – forms in medical research. Visualization of the patient’s current condition allows for continuous monitoring of his health. The article discusses the use of computer imaging to study the characteristics of such a common disease as bronchial asthma. The purpose of the study is to analyze spirometry in different groups of patients with this disease, divided by the degree of influence of psychosocial factors on the occurrence, development and course of bronchial asthma.

Keywords: Bronchial asthma, data visualization, representation of information, data analysis

Acknowledgements: The research was partially financially supported by the RFBR within the scientific projects no. 19-37-90005, № 18-07-00543.

For citation: Berestneva O.G., Shevelev G.E., Lyzin I.A. Computer visualization in curve breathing analysis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Industrial Cybernetics*, 2023, vol. 1, no. 4, pp. 7–20. DOI: 10.18799/29495407/2023/4/38

Введение

Бронхиальная астма (БА) (от греческого *asthma* – тяжелое дыхание, удушье) – это хроническое заболевание лёгких, поражающее людей всех возрастных групп. Оно может протекать в виде единичных, эпизодических приступов либо иметь тяжёлое течение с астматическим статусом и летальным исходом. По данным медицинской статистики, за последние годы заболеваемость бронхиальной астмой в большинстве стран значительно возросла. Увеличение распространенности заболевания среди лиц молодого возраста указывает на сохраняющуюся тенденцию роста частоты этого заболевания. Печальным фактом является то, что, 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 психосоциальных, эмоциональных факторов в развитии бронхиальной астмы оценивается различными специалистами противоречиво, и механизмы остаются неясными. Вероятно, это связано с тем, что все больные БА 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 здоровой и больной астмы. То есть многообразие психологических воздействий вызывает многообразие психологических и соматических изменений в различных группах больных БА. Поэтому необходимо изучение психологических (психических) и социальных факторов в тесной взаимосвязи с клиническими. Исходя из этого, Е.В. Немеровым было предложено классифицировать бронхиальную астму с учетом психологических и социальных факторов. Предложена следующая классификация [1]: *Bronchial asthma non-psychogenic (BANP)* – Бронхиальная астма не психогенная; *Bronchial asthmasomato-psychogenic (BASP)* – Бронхиальная астма соматопсихогенная; *Bronchial asthma psychogenically induced (BAPI)* – Бронхиальная астма психогенно-индуцированная.

Существует множество подходов и методов, применяемых к анализу кривых дыхания. Так, например, авторами [2] для анализа кривых дыха-

ния было предложено использовать вейвлет-анализ. Вейвлет-анализ широко используется для анализа сигналов. Вейвлет-спектрограммы являются важнейшим продуктом вейвлет анализа и дополнением к обычным спектрограммам на основе оконного преобразования Фурье.

Применительно к изучению кривых дыхания используется спектральный анализ. Спектральный анализ – это метод, позволяющий выделить из сложного колебания составляющие его исходные, более простые колебания, и установить, каковы их частоты и интенсивности. [3]

В зарубежных источниках [4, 5] описываются исследования, в которых используется подход: выделение паттерна ненормального дыхания путем разделения всей записи на дыхательные полуволны и анализ этих полувольт (наклон и амплитуда). 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 [6].

Стивен Пинкус предлагает использовать методы нелинейного анализа [6]. Его подход основан на применении показателей приближенной энтропии (ApEn). Суть этого метода заключается в качественно новых возможностях исследования процессов жизнедеятельности, что обеспечивает использование методов нелинейной динамики, в том числе «теории хаоса».

Также следует отметить один из эффективных современных способов обработки данных посредством трансформирования их в сети. Концепцию преобразования таких данных в комплексные сети впервые была предложена в [7]. Этот подход к анализу данных используется во многих сферах, в том числе и медицине. К данному моменту предлагаются такие алгоритмы конвертирования данных в сети, как: алгоритм прямой видимости, алгоритм горизонтальной видимости, параметрический алгоритм [8].

В настоящее время особое внимание сконцентрировано на методах машинного обучения и нейронных сетях. Так, например, в работе [9] предложена схема выделения признаков на основе спектральных поддиапазонов, которая работает с классификаторами искусственных нейронных сетей Artificial neural network (ANN) и опорных векторов Support Vector Machines (SVM) для многоканального

сигнала. Спектральная плотность мощности Power Spectral Density (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.

На основе проведенного обзора можно сделать вывод об актуальности темы и подчеркнуть тот факт, что для изучения кривой дыхания нет единого подхода или метода. Ученые предлагают массу вариантов ее исследования и изучения, основываясь на том или ином факте.

Сотрудниками Сибирского государственного медицинского университета и Томского политехнического университета на протяжении нескольких лет проводились исследования по обнаружению достоверных различий между группами пациентов (по физиологическим и психологическим 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 данных, 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, наличие апноэ, продолжительности цикла вдох–выдох и т. д. несет в себе большую значимость [12, 20–23].

Материалы 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 значе-

ния 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 часов 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) $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ постоянны и в нашем случае равны

$$\frac{1000 \cdot i \cdot \tilde{n}}{6}.$$

Предварительно исходные сигналы были отфильтрованы по частотам. Для фильтрации использовался треугольный фильтр, реализованный в среде MatLab [14]. 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 имеет вид:

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

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

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

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

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

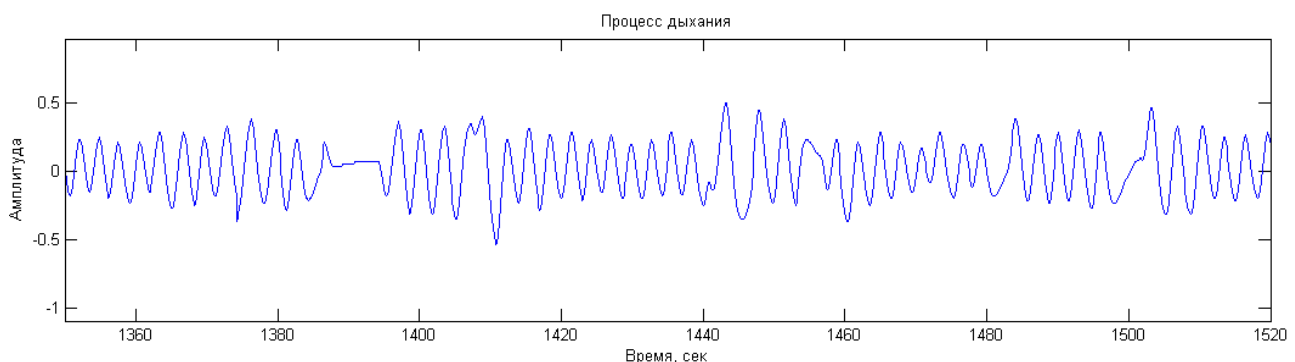


Рис. 1. Пример кривой дыхания

Fig. 1. Example of a breathing curve

Фильтр имеет два нуля и два полюса. Условия устойчивости фильтра записываются в виде системы неравенств для коэффициентов характеристического полинома $A(z)=z_2+a_1z+a_0$:

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

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

$$1+a_0 > 0.$$

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. Полученные результаты представлены на рис. 2–5.

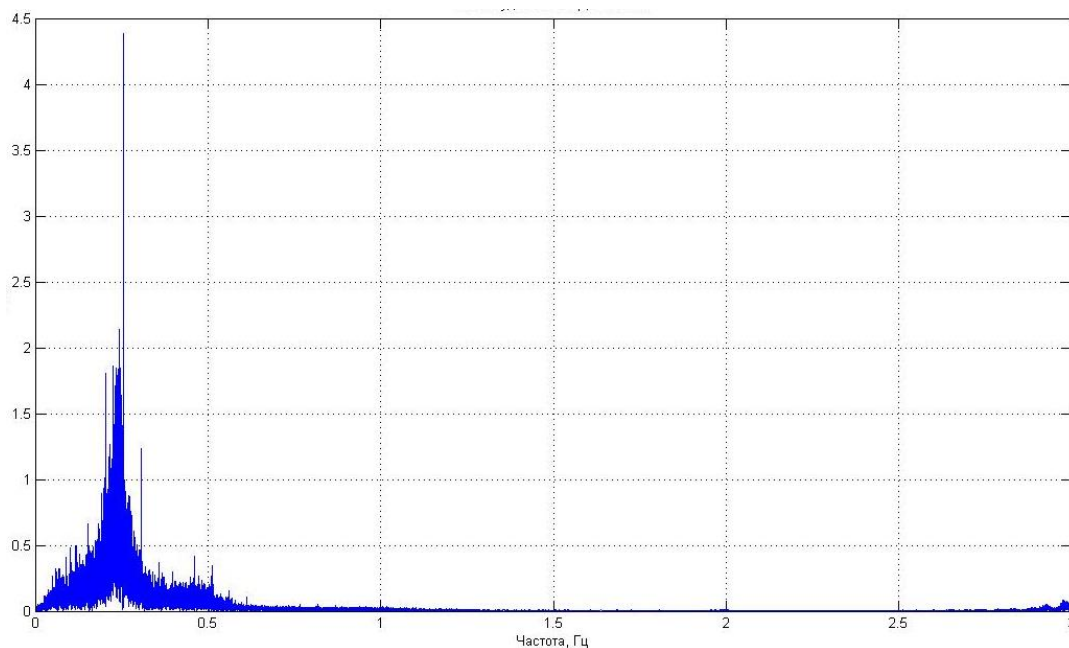


Рис. 2. Частотный спектр кривой дыхания здорового человека

Fig. 2. Frequency spectrum of the breathing curve of a healthy person

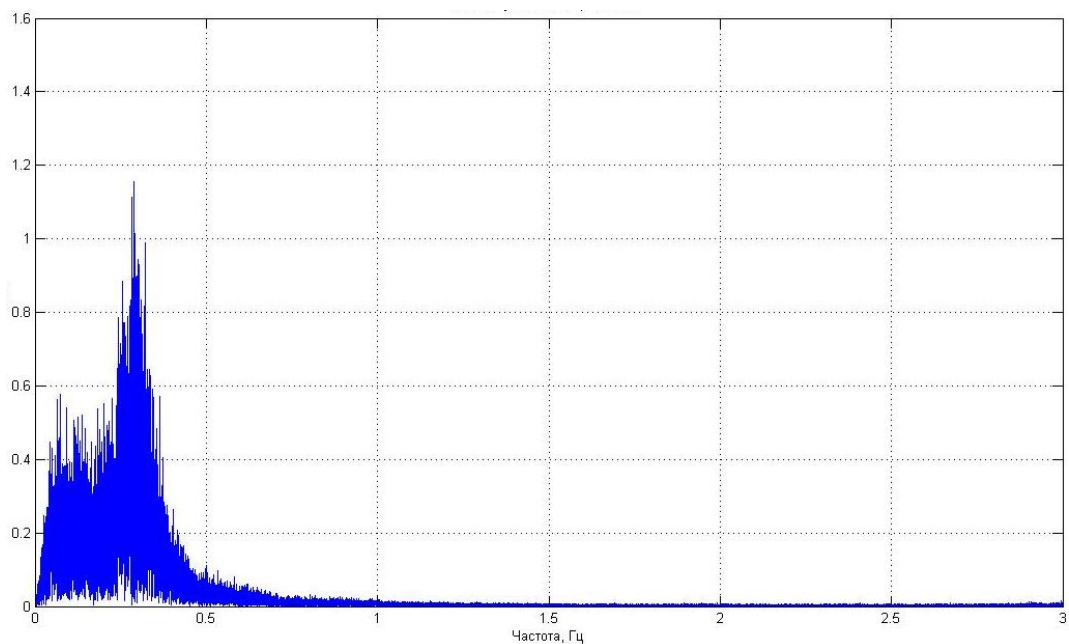


Рис. 3. Частотный спектр кривой дыхания пациента с диагнозом BANP

Fig. 3. Frequency spectrum of the breathing curve of a patient diagnosed with BANP

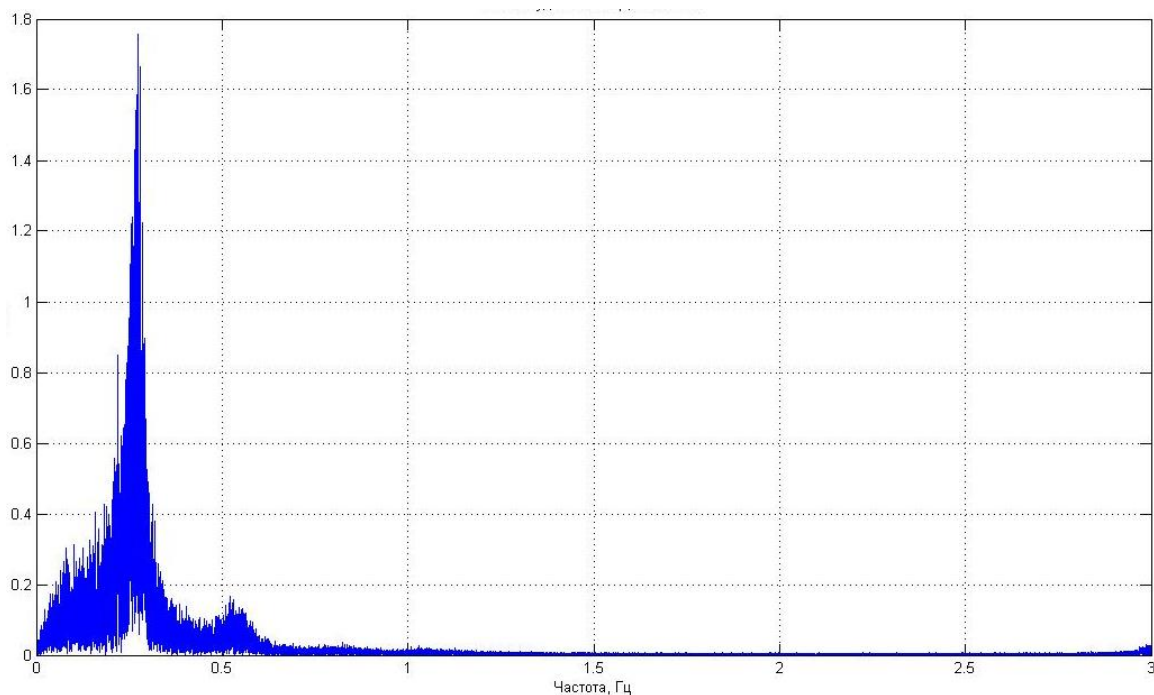


Рис. 4. Частотный спектр кривой дыхания пациента с диагнозом BAPI
Fig. 4. Frequency spectrum of the breathing curve of a patient diagnosed with BAPI

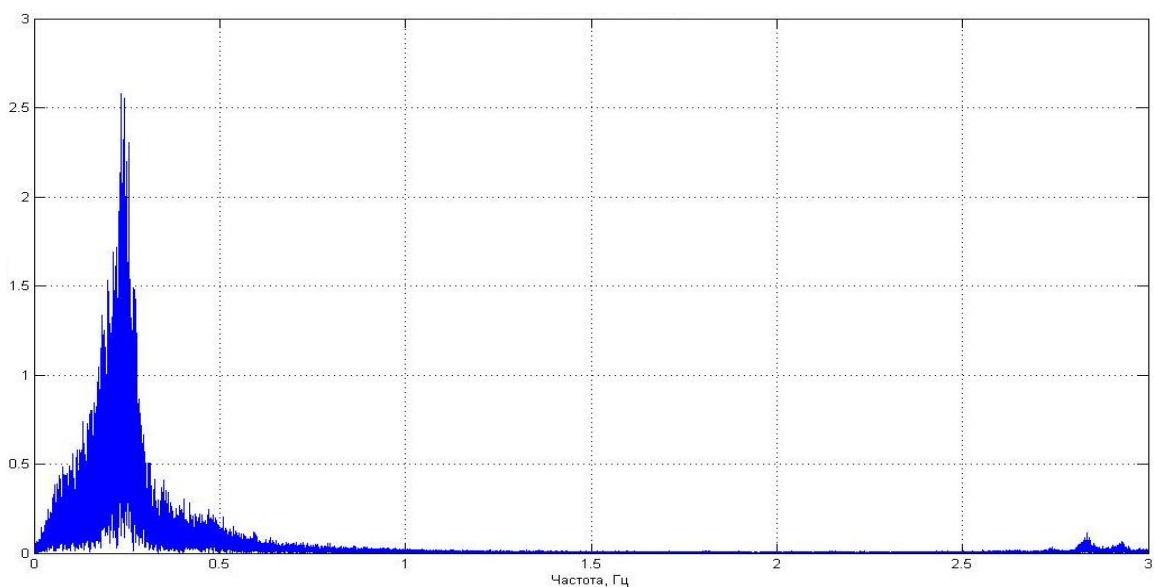


Рис. 5. Частотный спектр кривой дыхания пациента с диагнозом BASP
Fig. 5. Frequency spectrum of the breathing curve of a patient diagnosed with BASP

Как видно из рис. 2–5, 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 (рис. 6–9), построенных в плоскости время–частота (при этом уровень частотных составляющих сигнала задается цветом).

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 рис. 10 изображена блок-схема алгоритма метода.

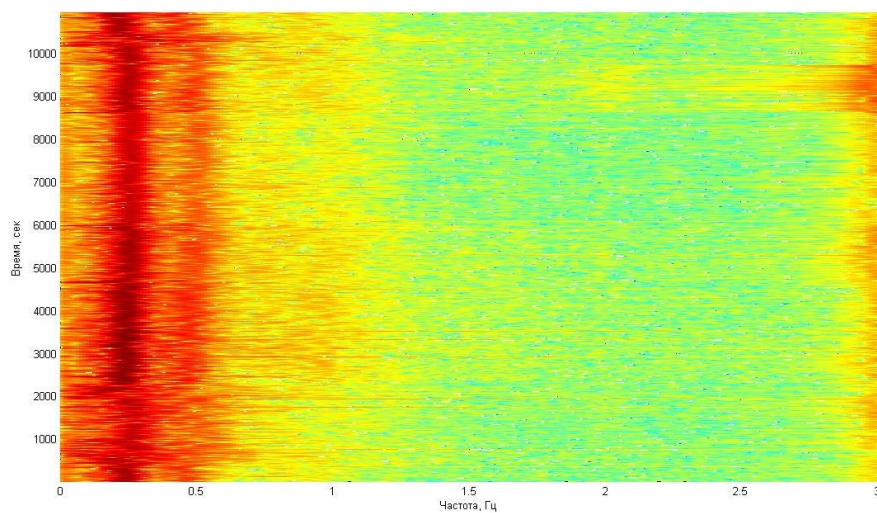


Рис. 6. *Спектрограмма кривой дыхания здорового человека*
Fig. 6. *Spectrogram of the breathing curve of a healthy person*

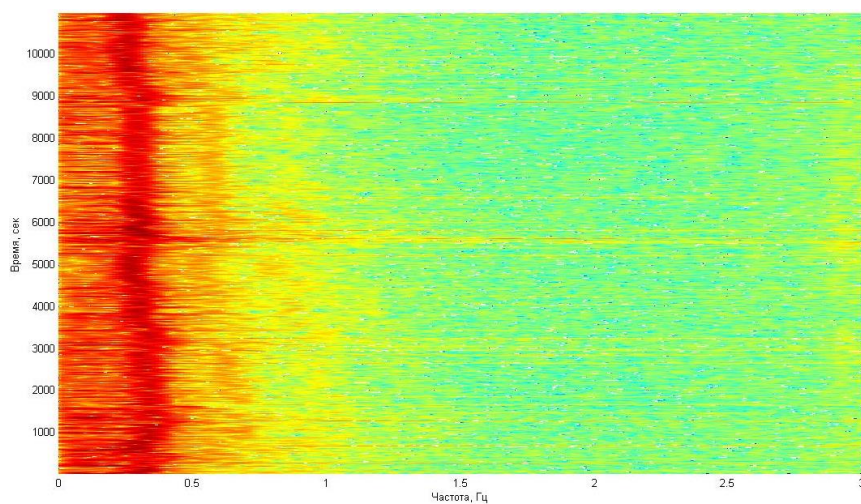


Рис. 7. *Спектрограмма кривой дыхания пациента с диагнозом BANP*
Fig. 7. *Spectrogram of the breathing curve of a patient diagnosed with BANP*

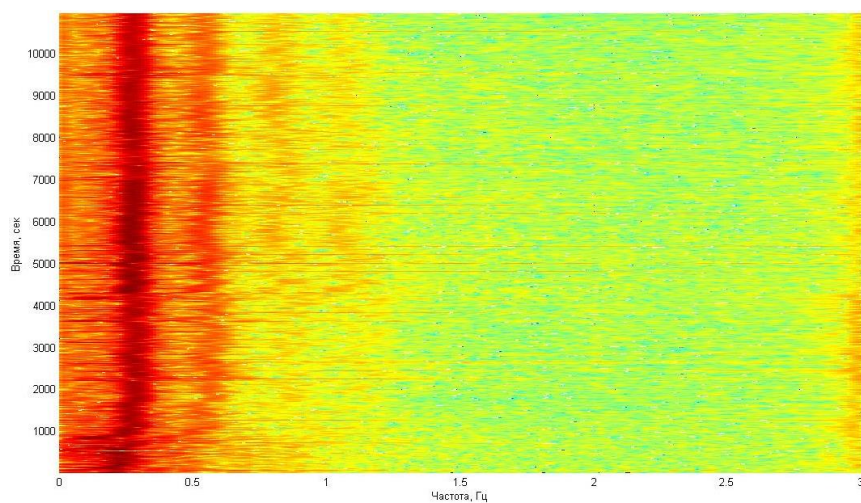


Рис. 8. *Спектрограмма кривой дыхания пациента с диагнозом BAPI*
Fig. 8. *Spectrogram of the breathing curve of a patient diagnosed with BAPI*

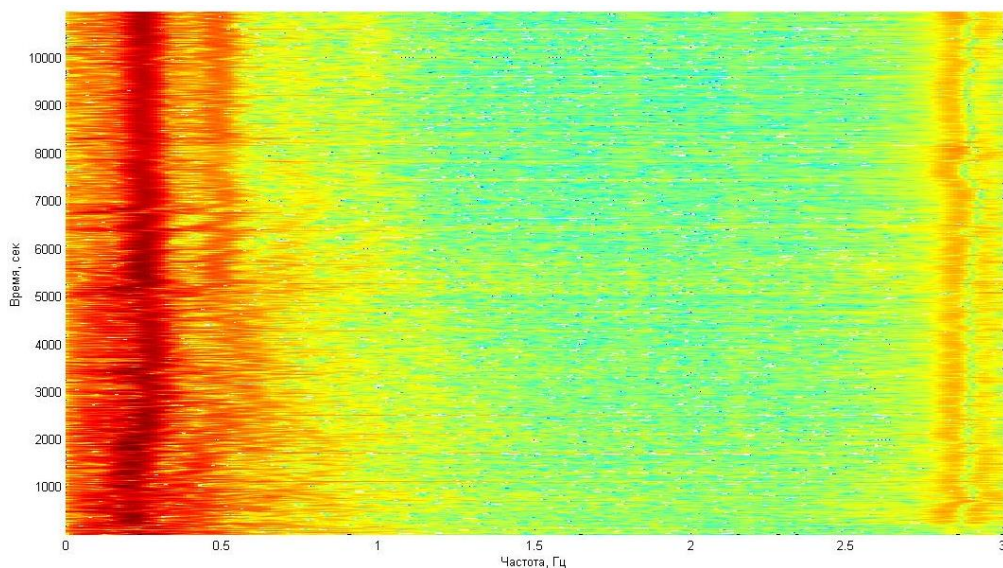


Рис. 9. Спектрограмма кривой дыхания пациента с диагнозом BASP

Fig. 9. Spectrogram of the breathing curve of a patient diagnosed with BASP

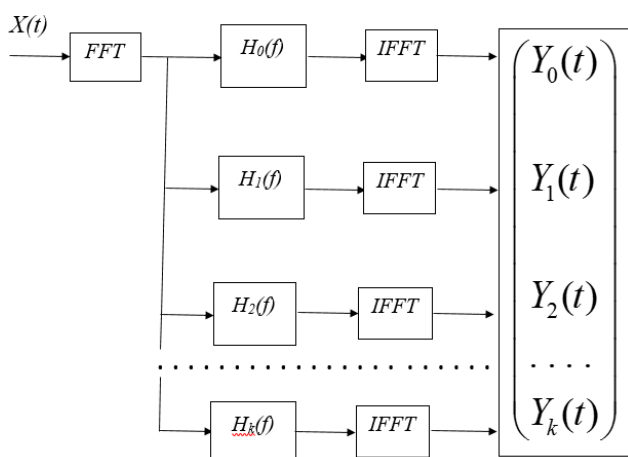


Рис. 10. Блок-схема алгоритма метода спектрально-временного анализа кривых дыхания: $H_k(f)$ – передаточная функция фильтра; FFT – быстрое преобразование Фурье; IFFT – обратное быстрое преобразование Фурье

Fig. 10. Block diagram of the algorithm for the method of spectral-temporal analysis of breathing curves: $H_k(f)$ – transfer function of the filter; FFT – fast Fourier transform; IFFT – inverse fast Fourier transform

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

где f – частота сигнала; f_k^i – частоты фильтра ($i=1, \dots, k$).

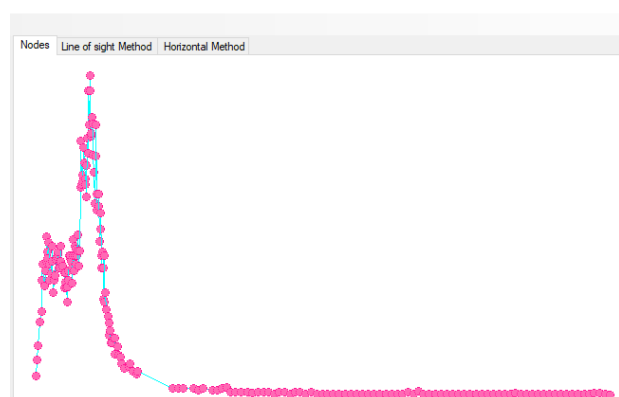


Рис. 11. Пример оцифрованной кривой объем–время

Fig. 11. Example of a digitized volume–time curve

В дополнение к методу спектрально-временного анализа кривых дыхания нами был использован другой подход, заключающийся в преобразовании таких данных в формате временных рядов в комплексные сети [7]. Для этого кривые дыхания были подвергнуты оцифровке с помощью инструмента Engauge Digitizer 4.1, принимающего файлы изображений и восстанавливающего точки данных с графиков (рис. 11).

Для конвертирования полученного временного ряда в сеть необходимо установить связи между элементами сети. Для построения связей используется несколько алгоритмов: алгоритмы прямой видимости directed visibility graph (NVG) и горизонтальной видимости horizontal visibility graph (HVG). Алгоритмы видимости – это семейство правил для отображения временных рядов реальных значений на сети. Во всех этих алгоритмах каждому значению временного ряда ставится в соответствие узел,

но критерий соединения узлов различается связью в алгоритмах. Например, для *NVG* два узла – i и j – связаны, если выполняется их геометрическое условие согласования. Алгоритм *HVG* схож с алгоритмом *NVG*, однако для построения связей между точками строится прямая строго параллельная оси OX .

Для того чтобы построить связи между узлами, было разработано приложение на языке *C#* – *TS complex – network converting*. Алгоритм работы

программы заключается в том, чтобы на основе файла с точками получить файл с узлами и связями. Программная реализация была выполнена для *NVG*.

Ниже приведены результаты работы программы, иллюстрирующие метод прямой видимости для данных о здоровье человека с заболеванием бронхиальной астмой (рис. 12, 13) и без заболеваний (рис. 14, 15).

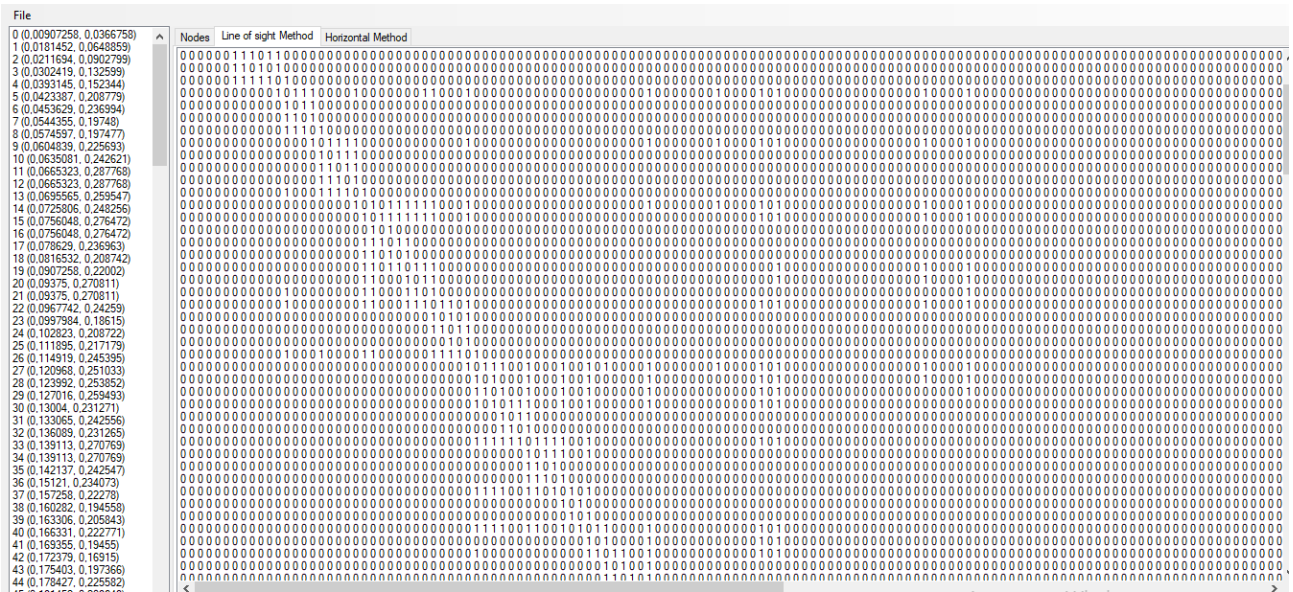


Рис. 12. Метод прямой видимости (бинарный вид)

Fig. 12. Line of sight method (binary view)

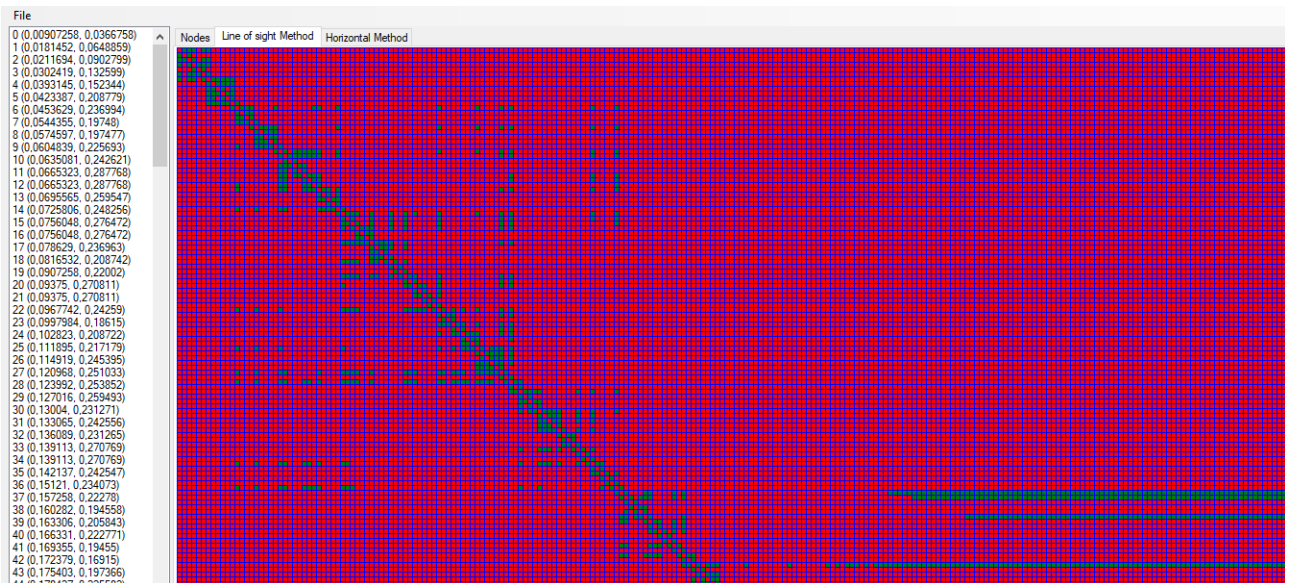


Рис. 13. Метод прямой видимости (изображение)

Fig. 13. Line of sight method (image)

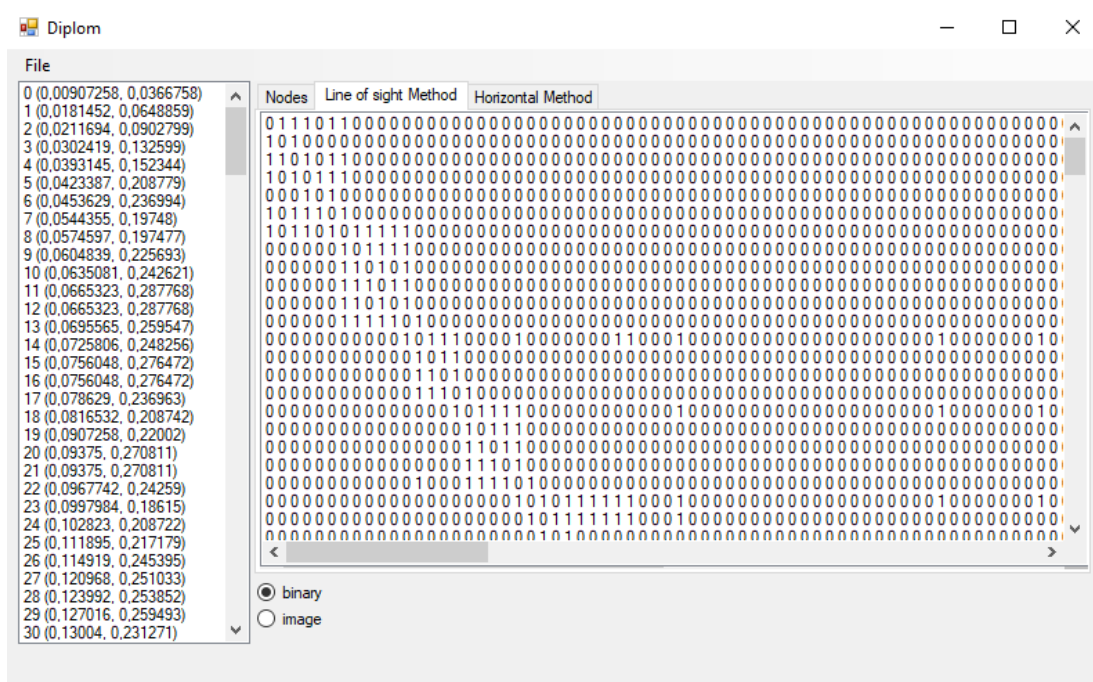


Рис. 14. Метод прямой видимости в бинарном представлении
Fig. 14. Line of sight method in binary representation

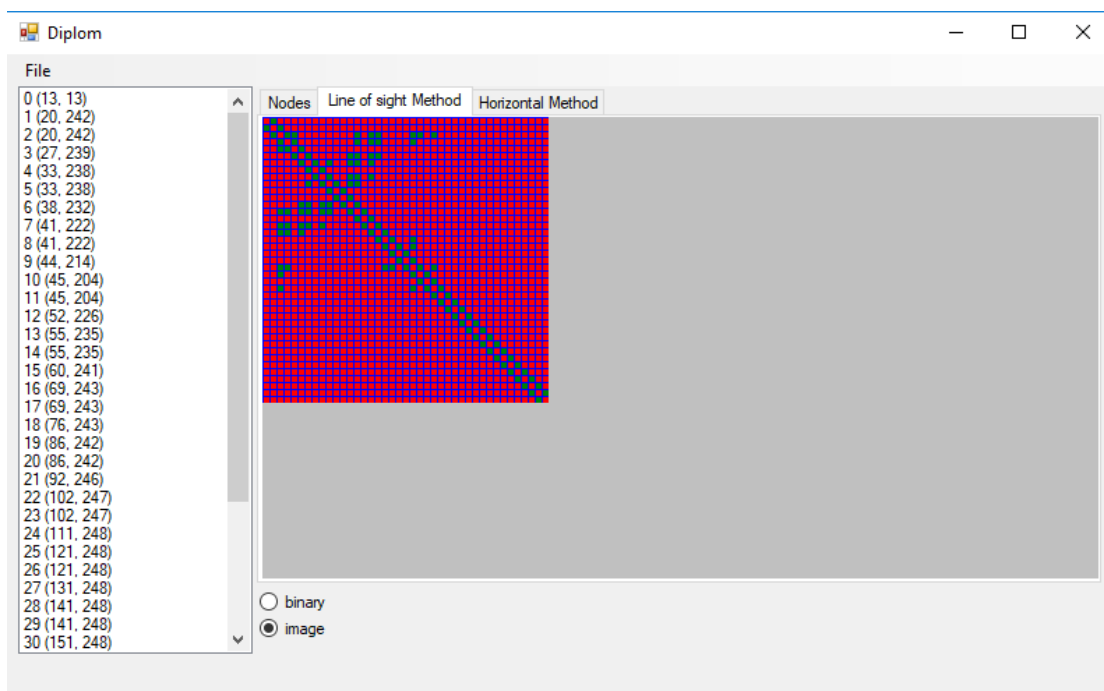


Рис. 15. Метод прямой видимости в виде изображения
Fig. 15. Line of sight image method

Результаты

После фильтрации сигнала на определенной частоте меняется частота фильтрации и 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 значения элементов матрицы определяют цвет текущей палитры. Алгоритм реализован в среде MatLab. На рис. 16–19 представлены результаты работы алгоритма.

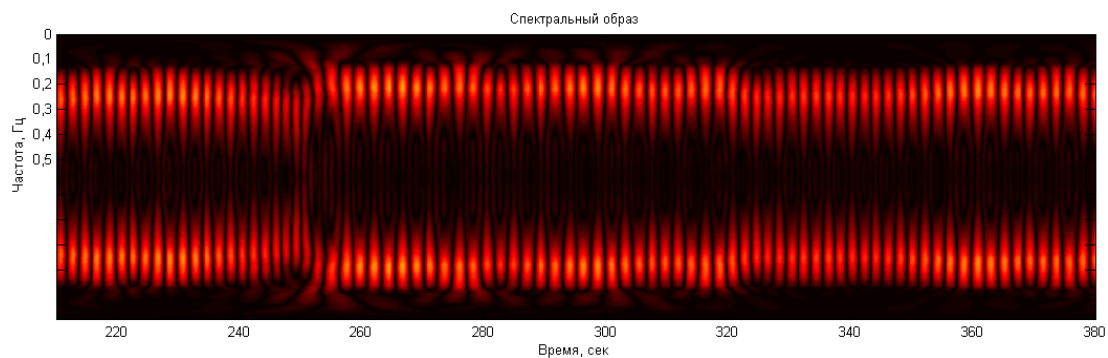


Рис. 16. Спектральный образ процесса дыхания здорового человека

Fig. 16. Spectral image of a healthy person breathing

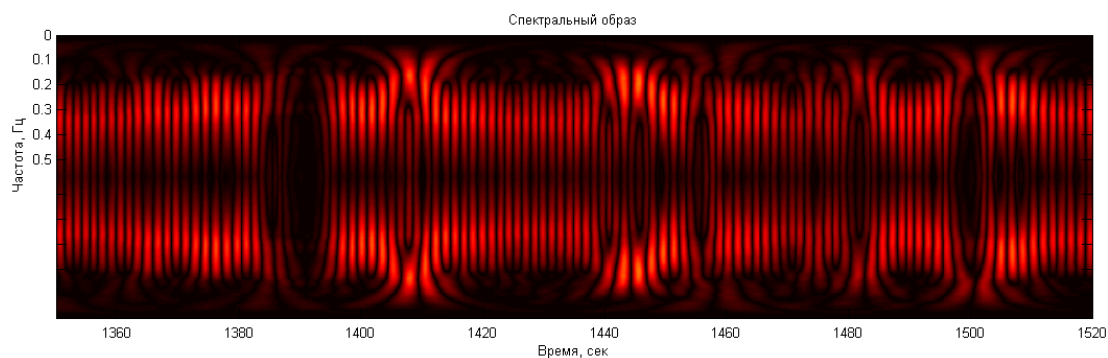


Рис. 17. Спектральный образ процесса дыхания пациента с диагнозом BANP

Fig. 17. Spectral image of breathing of a patient diagnosed with BANP

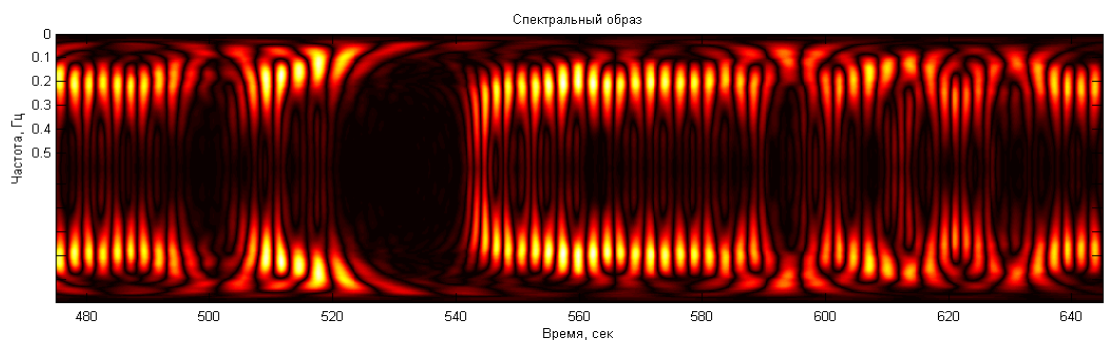


Рис. 18. Спектральный образ процесса дыхания пациента с диагнозом BAPI

Fig. 18. Spectral image of breathing of a patient diagnosed with BAPI

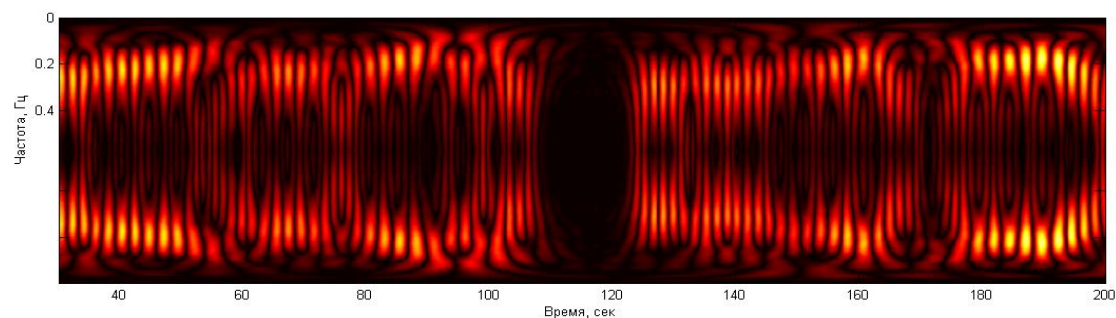


Рис. 19. Спектральный образ процесса дыхания пациента с диагнозом BASP

Fig. 19. Spectral image of breathing of a patient diagnosed with BASP

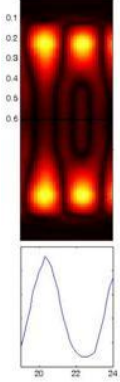
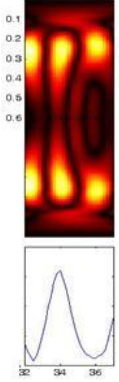
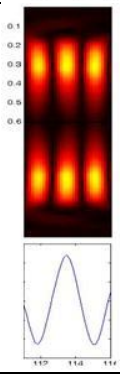
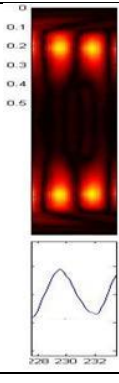
После тщательного изучения спектральных образов кривых дыхания пациентов различных групп удалось выделить несколько характерных «единичных» графических образов (соответствующих одному дыхательному циклу) для пациентов с различными формами бронхиальной астмы и условно здоровых людей. Полученные результаты представлены в таблице.

На рис. 20 представлены значения метрик здорового человека и людей с заболеванием бронхиальной астмой различных видов, таких как *BANP* и *BASP*. Метрики получены путём обработки данных *NVG*. Далее данные отражены в табличной форме.

На рис. 21 приведены значения метрик для детей в возрасте от 10 до 16 лет, здоровых и с заболеванием «Бронхиальная астма». Значения получены обработкой алгоритмом *NVG*.

Таблица. «Единичные» графические образы для различных групп испытуемых

Table. “Single” graphic images for different groups of subjects

Диагноз Diagnosis	Характерный графический образ для одного дыхательного цикла Characteristic graphic image for a respiratory cycle	Диагноз Diagnosis	Характерный графический образ для одного дыхательного цикла Characteristic graphic image for a respiratory cycle
Практически здоров Almost healthy		<i>BASP</i>	
<i>BANP</i>		<i>BAP1</i>	

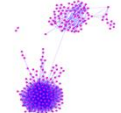
Статистика	Здоровый	Больной <i>BANP</i>	Больной <i>BAP1</i>	Больной <i>BASP</i>
Алгоритм	<i>NVG</i>			
				
Количество узлов	43	234	69	76
Количество рёбер	68	2149	159	133
Средняя степень	3.163	18.368	4.609	3.5
Средняя взвешенная степень	3.163	18.368	4.609	3.5
Диаметр графа	20	11	34	44
Плотность графа	0.075	0.079	0.068	0.047
Модулярность	0.552	0.277	0.594	0.579
Связные компоненты	2	2	2	2
Ср. Коэффициент кластеризации	0.134	0.56	0.347	0.222
Средняя длина пути	7.099	3.664	11.786	17.152

Рис. 20. Значения метрик

Fig. 20. Metric values

Статистика алгоритм	А астма	Б астма	В здоровый	Г здоровый
	NVG			
Количество узлов	49	46	54	51
Количество рёбер	95	54	93	79
Средняя степень	3,878	2,348	3,444	3,098
Средняя взвешенная степень	3,878	2,348	3,444	3,098
Диаметр графа	17	34	18	26
Плотность графа	0,081	0,052	0,065	0,062
Модулярность	0,676	0,718	0,731	0,739
Связные компоненты	2	2	2	2
Ср. Коэффициент кластеризации	0,619	0,294	0,621	0,514
Средняя длина пути	5,713	11,988	6,457	8,711

Рис. 21. Значения метрик для детей

Fig. 21. Metric values for children

Заключение

После проведения спектрально-временного анализа удалось получить характерные «единичные» графические образы кривой дыхания пациентов с различными формами бронхиальной астмы. Как видно из таблицы, спектральный образ кривой дыхания здорового человека заметно отличается практически от всех образов, характерных для пациентов с различными формами заболевания БА. 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*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ темпоральных событий у больных бронхиальной астмой / Е.В. Немеров, К.Г. Языков, О.Г. Берестнева, О.С. Жаркова // Информационные и математические технологии в науке и управлении: труды XX Байкальской Всероссийской конференции и Школы-семинара научной молодежи. – Иркутск, 30 Июня – 7 Июля 2015. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2015. – Т. 3. – С. 241–246.
2. Метод обработки реограммы легкого с использованием вейвлет-технологии / О.Н. Величко, С.А. Карпенко, А.А. Пащенко, А.В. Попов // Вестник НТУ ХПИ. – 2008. – № 24. – С. 11–18.
3. Контроль дыхания как фактор модуляции колебаний микроциркуляторного кровотока кожи человека / Г.В. Красников, Д.Ю. Ефимова, М.И. Тюрина, Т.Н. Коняева, И.В. Красникова, Г.М. Пискунова // Известия ТулГУ. Естественные науки. – 2016. – № 1. – С. 115–124.
4. Jubran A., Brydon J. B.G., Martin J.T. Effect of hyperoxic hypercapnia on variational activity of breathing // American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine. – 1997. – Vol. 156. – Iss. 4. – P. 1129–1139. DOI: <https://doi.org/10.1164/ajrccm.156.4.97-01080>
5. Seely A.J.E., Macklem P.T. Complex systems and the technology of variability analysis // Critical Care. – 2004. – № 8. – Article number: R367. DOI: <https://doi.org/10.1186/cc2948>
6. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 1991. – № 88 (6). – P. 2297–2301. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2297>
7. Zhang J., Small M. Complex network from pseudoperiodic time series: topology versus dynamics // Physical Review Letters. – 2006. – Vol. 96. – Iss. 23. – P. 238701. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.238701>
8. From time series to complex networks: the visibility graph / L. Lacasa, B. Luque, F. Ballesteros, J. Luque, J.C. Nuño // Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2008. – № 105 (13). – P. 4972–4975. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0709247105>
9. Multichannel lung sound analysis for asthma detection / Md. Ariful Islam, I. Bandyopadhyaya, P. Bhattacharyya, G. Saha // Computer Methods and Programs in Biomedicine. – 2018. – Vol. 159. – P. 111–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.03.002>

10. Проблемы формирования базы знаний психогенных форм бронхиальной астмы / О.Г. Берестнева, Е.В. Немеров, К.Г. Языков, В.А. Фокин, П.В. Карпенко, А.Л. Бурцева // Конгресс по интеллектуальным системам и информационным технологиям (IS-IT'14): труды конгресса. – Дивногорское, 2–9 Сентября 2014. – М.: Физматлит, 2014. – Т. 2. – С. 250–252.
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. – С. 211–220.
12. Математические методы и информационные технологии в задачах оценки состояния биосистем: монография / О.Г. Берестнева, К.А. Шаропин, Н.Г. Абдулкина, Н.П. Степаненко, А.Л. Юмашева, О.С. Жаркова. – Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – 200 с.
13. Осадчая И.А., Берестнева О.Г., Немеров Е.В. Анализ многомерных медицинских данных с помощью пиктографиков «лица чернова» // Бюллетень сибирской медицины. – 2014. – Т. 13. – Вып. 4. – С. 89–93.
14. Берестнева О.Г., Осадчая И.А., Немеров Е.В. Методы исследования структуры медицинских данных // Вестник науки Сибири. – 2012. – № 1 (2). – С. 333–338. URL: <https://jwtsu.ru/journal/article/view/199/200> (дата обращения: 18.08.2023).
15. Multidimensional Data Visualization Methods Based on Generalized Graphic Images / I.A. Osadchaya, O.G. Berestneva, V.A. Volovodenko, O.V. Marukhina // Communications in Computer and Information Science. – 2014. – Vol. 466. – P. 568–576.
16. Осадчая И.А., Прокопьев Р.О. Технологии визуализации в задачах оценки функционального состояния // Инженерный вестник Дона. – 2014. – № 4-2. URL: <http://pdfwww.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2656> (дата обращения: 21.09.2023).
17. Берестнева О.Г., Осадчая И.А., Бурцева А.Л. Методы анализа и визуализации многомерных данных. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 98 с.
18. Применение методов визуализации при исследовании структуры экспериментальных многомерных данных / В.А. Воловоденко, О.Г. Берестнева, Е.В. Немеров, И.В. // Осадчая Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 320. – № 5. – С. 125–130.
19. Network vulnerability in two-phase evolution / N.A. Kinash, A.I. Trufanov, A.A. Tikhomirov, O.G. Berestneva, O.N. Fisochenko // 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) – M., 2016. – P. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491785.
20. Devjtykh D., Gergel O., Berestneva O.G. Sleep apnea detection based on dynamic neural networks // Knowledge-Based Software Engineering. JCKBSE 2014. Communications in Computer and Information Science / Eds. A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, T. Iijima. – Cham: Springer, 2014. – Vol. 466. – P. 556–567. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11854-3_48
21. Вилунас Ю. Рыдающее дыхание излечивает бронхиальную астму и другие заболевания органов дыхания. – СПб.: Питер, 2013. – 224 с.
22. Карпенко П.В., Немеров Е.В. Исследование ритма дыхания у больных бронхиальной астмой во время ночного сна // Студенческий научный форум: Материалы VI Международной студенческой электронной научной конференции. URL: <http://www.scienceforum.ru/2014/482/2949> (дата обращения: 21.09.2023).
23. Зулкарев Р.Х. Кардиореспираторная вариабельность при заболеваниях органов дыхания: дис. ... д-ра мед. наук. – М., 2007. URL: <http://www.dslib.net/pulmonologia/kardiorespiratornaja-variabelnost-pri-zabolevaniyah-organov-dyhanija.html?ysclid=lqdz9jtcnk489989615> (дата обращения: 21.09.2023).

Информация об авторах

Ольга Григорьевна Берестнева, доктор технических наук, профессор отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ogb6@yandex.ru; orcid.org/0000-0002-4243-0637

Геннадий Ефимович Шевелев, кандидат физико-математических наук, доцент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. gshvelyov@gmail.com; orcid.org/0000-0002-4548-2133

Иван Александрович Лызин, ассистент отделения информационных технологий Инженерной школы информационных технологий и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: Lyzin@tpu.ru; orcid.org/0000-0003-2827-441X

Поступила в редакцию: 15.10.2023

Поступила после рецензирования: 19.12.2023

Принята к публикации: 29.12.2023

REFERENCES

24. 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, ISEM SB RAS Publ., 2015. Vol. 3, pp. 241–246. (In Russ.)
25. 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 KHP*, 2008, no. 24, pp. 11–18. (In Russ.)

26. 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. *News of Tula State University. Natural Sciences*, 2016, no. 1, pp. 115–124. (In Russ.)
27. Jubran A., Brydon J.B.G., Martin J.T. Effect of hyperoxic hypercapnia on variational activity of breathing. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1997, vol. 156, Iss. 4, pp. 1129–1139. DOI: <https://doi.org/10.1164/ajrccm.156.4.97-01080>
28. Seely A.J.E., Macklem P.T. Complex systems and the technology of variability analysis. *Critical Care*, 2004, no. 8. Article number: R367. DOI: <https://doi.org/10.1186/cc2948>
29. Pincus S.M. Approximate entropy as a measure of system complexity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1991, no. 88 (6), pp. 2297–2301. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.88.6.2297>
30. Zhang J., Small M. Complex network from pseudoperiodic time series: topology versus dynamics. *Physical Review Letters*, 2006, vol. 96, Iss. 23, p. 238701. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.96.238701>
31. Lacasa L., Luque B., Ballesteros F., Luque J., Nuño J.C. From time series to complex networks: the visibility graph. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, no. 105 (13), pp. 4972–4975. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.0709247105>
32. Islam Md.A., Bandyopadhyaya I., Bhattacharyya P., Saha G. Multichannel lung sound analysis for asthma detection. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2018, vol. 159, pp. 111–123. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2018.03.002>
33. Berestneva O.G., Nemerov E.V., Yazykov K.G., Fokin V.A., Karpenko P.V., Burtseva A.L. Problems of forming a knowledge base of psychogenic forms of bronchial asthma. *Congress on Intelligent Systems and information technologies (IS-IT'14): proceedings of the congress*. Divnomorskoe, September 2–9, 2014. Moscow, Fizmatlit Publ., 2014. Vol. 2, pp. 250–252. (In Russ.)
34. Karpenko P.V., Berestneva O.G., Stepanov D.Yu. Computer analysis of spermiogram 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 Publ. house, 2014. pp. 211–220. (In Russ.)
35. Berestneva O.G., Sharopin K.A., Abdulkina N.G., Stepanenko N.P., Yumasheva A.L., Zharkova O.S. *Mathematical methods and information technologies in problems of assessing the state of Biosystems*. Tomsk, TPU publ. house, 2015. 200 p. (In Russ.)
36. Osadchaya I.A., Berestneva O.G., Nemerov E.V. Analysis of multidimensional medical data using pictographs "faces of Chernov". *Bulletin of Siberian medicine*, 2014, vol. 13, Iss. 4, pp. 89–93. (In Russ.)
37. Berestneva O.G., Osadchaya I.A., Nemerov E.V. Methods of research of the structure of medical data. *Siberian scientific journal*, 2012, no. 1 (2), pp. 333–338. (In Russ.) Available at: <https://jwtsu.ru/journal/article/view/199/200> (accessed: 18.08.2023).
38. 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, vol. 466, pp. 568–576.
39. Osadchaya I.A., Prokopenko R.O. Visualization technologies in functional state assessment problems. *Engineering Bulletin of the Don*, 2014, no. 4-2. (In Russ.) Available at: <http://pdfwww.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4p2y2014/2656> (accessed: 21.09.2023).
40. Berestneva O.G., Osadchaya N.A., Burtseva A.L. Methods of analysis and visualization of multidimensional data. Tomsk, TPU Publ. house, 2014. 98 p. (In Russ.)
41. 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. *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*, 2012, vol. 320, no. 5, pp. 125–130. (In Russ.)
42. Kinash N.A., Trufanov A.I., Tikhomirov A.A., Berestneva O.G., Fisoichenko O.N. Network vulnerability in two-phase evolution. *2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON)*. Moscow, 2016. pp. 1–4. DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491785.
43. Devtykh D., Gerget O., Berestneva O.G. Sleep apnea detection based on dynamic neural networks. *Knowledge-Based Software Engineering. JCKBSE 2014. Communications in Computer and Information Science*. Eds. A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, T. Iijima. Cham, Springer, 2014. Vol. 466, pp. 556–567. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-11854-3_48
44. Vilunas Yu. *Sobbing breath cures bronchial asthma and other respiratory diseases*. St. Petersburg, Piter Publ., 2013. 224 p. (In Russ.)
45. 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.) Available at: <http://www.scienceforum.ru/2014/482/2949> (accessed: 21.09.2023).
46. Zulkarneev R.H. *Cardiorespiratory variability in respiratory diseases*. Dr. Diss. Moscow, 2007. (In Russ.) Available at: <http://www.disscat.com/content/kardiorespiratornaya-variabelnost-prizabolevaniyakh-organov-dykhaniya> (accessed: 21.09.2023).

Information about the authors

Olga G. Berestneva, Dr. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ogb6@yandex.ru; orcid.org/0000-0002-4243-0637

Gennady E. Shevelev, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. gshevelyov@gmail.com; orcid.org/0000-0002-4548-2133

Ivan A. Lyzin, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. lyzin@tpu.ru; orcid.org/0000-0003-2827-441X

Received: 15.10.2023

Revised: 19.12.2023

Accepted: 29.12.2023