



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-21-27>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 616-71

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РАННЕГО ВЫЯВЛЕНИЯ БОЛЕЗНЕЙ ОРГАНОВ ДЫХАНИЯ, ОТЯГОЩЕННЫХ ДЫХАТЕЛЬНОЙ НЕДОСТАТОЧНОСТЬЮ И СИНДРОМОМ АПНОЭ-ГИПОПНОЭ

О. Б. ЗЕЛЬМАНСКИЙ, В. А. БОГУШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2025
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2025

Аннотация. Поскольку утрата трудоспособности и инвалидность, связанные с болезнями органов дыхания, в 2/3 случаев обусловлены бронхиальной астмой и хронической обструктивной болезнью лёгких, существует необходимость в техническом обеспечении раннего выявления данных заболеваний. В основу разработанного диагностического комплекса положена эволюционная математическая модель дыхательной системы человека, описывающая процессы газообмена между атмосферой и лёгкими и между лёгкими и кровью. Комплекс позволяет анализировать такие параметры дыхательной системы, как сатурация гемоглобина артериальной крови кислородом, частота сердечных сокращений и частота дыхания. Комплекс подходит для разовых (скрининговых) измерений, а также длительного (ночного/суточного) мониторинга. Разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее анализировать индекс десатураций, индекс апноэ-гипопноэ, фотоплетизмограмму, визуализировать процесс дыхания. В комплексе реализован стандартизированный нагрузочный тест шестиминутной ходьбы. Это позволяет выявить дыхательную недостаточность, оценить ее выраженность и условия возникновения. В ходе апробации на базе санаторно-курортного учреждения удалось диагностировать синдром обструктивного апноэ-гипопноэ на ранней стадии у людей, не подозревающих о наличии у них данного заболевания. Выбор именно санаторно-курортного учреждения обусловлен комфортными условиями проведения ночного мониторинга, наличием времени и желанием людей заняться своим здоровьем, пройти диагностику.

Ключевые слова: дыхательная недостаточность, синдром апноэ-гипопноэ, остановка дыхания, болезни органов дыхания, хроническая обструктивная болезнь лёгких, бронхиальная астма, ранняя диагностика, сатурация, частота дыхания, COVID-19.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Зельманский, О. Б. Аппаратно-программный комплекс для раннего выявления болезней органов дыхания, отягощенных дыхательной недостаточностью и синдромом апноэ-гипопноэ / О. Б. Зельманский, В. А. Богуш // Доклады БГУИР. 2025. Т. 23, № 1. С. 21–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-21-27>.

APPARATUS FOR EARLY DETECTION OF RESPIRATORY DISEASES AGGRAVATED BY RESPIRATORY FAILURE AND APNEA-HYPOPNEA SYNDROME

OLEG B. ZELMANSKI, VADIM A. BOGUSH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Since loss of working capacity and disability associated with respiratory diseases are caused by bronchial asthma and chronic obstructive pulmonary disease in 2/3 of cases, there is a need for technical support for early detection of these diseases. The developed diagnostic complex is based on an evolutionary mathematical model of the human respiratory system, describing the processes of gas exchange between the atmosphere and the lungs and between the lungs and blood. The complex allows analyzing such respiratory system parameters as arterial blood hemoglobin oxygen saturation, heart rate and respiratory rate. The complex is suitable for one-time (screening) measurements, as well as long-term (night/daily) monitoring. The corresponding software has been developed that allows analyzing the desaturation index, apnea-hypopnea index, photoplethysmogram, and visualizing the breathing process. The complex implements a standardized six-minute walk load test. This allows identifying respiratory failure, assessing its severity and conditions of occurrence. During the testing at a health resort, it was possible to diagnose obstructive apnea-hypopnea syndrome at an early stage in people who were unaware of the disease. The choice of a health resort was due to the comfortable conditions for conducting night monitoring, the availability of time and the desire of people to take care of their health and undergo diagnostics.

Keywords: respiratory failure, apnea-hypopnea syndrome, sleep apnea, respiratory diseases, chronic obstructive pulmonary disease, bronchial asthma, early diagnosis, saturation, respiratory rate, COVID-19.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Zelmanski O. B., Bogush V. A. (2025) Apparatus for Early Detection of Respiratory Diseases Aggravated by Respiratory Failure and Apnea-Hypopnea Syndrome. *Doklady BGUIR*. 23 (1), 21–27. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-23-1-21-27> (in Russian).

Введение

По данным Национального статистического комитета [1], в Республике Беларусь наиболее распространенными являются болезни органов дыхания, которые составляют более 50 % от общего количества зарегистрированных случаев. В 2022 г. в стране всего было зарегистрировано 9395 болезней, из которых 4886 – болезни органов дыхания (рис. 1).

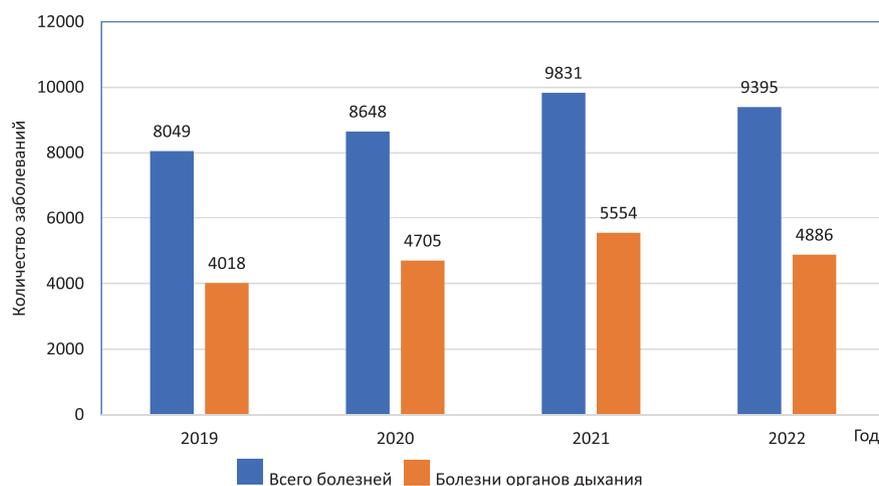


Рис. 1. Диаграмма количества зарегистрированных случаев болезней в Республике Беларусь за 2019–2022 гг.

Fig. 1. Diagram of the number of registered cases of diseases in the Republic of Belarus for 2019–2022

Существенное влияние на рост показателя заболеваемости болезнями органов дыхания оказала пандемия коронавирусной инфекции COVID-19 [2]. В то же время в Беларуси, как и во всем мире, отмечается рост бронхообструктивной патологии. Прежде всего, увеличивается заболевае-

мость бронхиальной астмой, хронической обструктивной болезнью лёгких (ХОБЛ) и синдромом обструктивного апноэ-гипопноэ во сне (СОАГ). Известно, что бронхиальной астмой страдает от 5 до 10 % населения, а распространенность ХОБЛ в два раза больше. При этом учитываются только те пациенты, которые обратились к врачу, но огромная часть людей с заболеванием остается неучтенной. ХОБЛ является третьей по значимости причиной смерти во всем мире. В Республике Беларусь, по данным официальной статистики, насчитывается порядка 152 000 больных хроническим обструктивным бронхитом, ежегодно диагностируется 8000 новых случаев. Бронхиальная астма и ХОБЛ обуславливают около 2/3 случаев стойкой утраты трудоспособности и инвалидности, связанной с заболеваниями органов дыхания. Таким образом, очевидна необходимость в техническом обеспечении раннего выявления данных заболеваний, особенно в условиях последствий пандемии COVID-19, вызванной коронавирусом SARS-CoV-2.

Теоретический анализ

Бронхиальная астма провоцирует нарушение дыхания, ХОБЛ вызывает ограничение потока воздуха в дыхательных путях и тоже затрудняет дыхание, а СОАГ проявляется резким уменьшением или полной остановкой дыхания во время сна. Таким образом, эти заболевания объединяет нарушение нормального газового состава артериальной крови. Поскольку артериальная кровь является связующим звеном двух ключевых физиологических процессов дыхания (внутреннего (тканевого) и внешнего), а ее газовый состав отражает эффективность внешнего дыхания и позволяет косвенно предположить риск развития тканевой гипоксии [3], в основу разработанного комплекса положен анализ таких параметров функции внешнего дыхания человека, как насыщение гемоглобина артериальной крови кислородом SaO_2 (сатурация), частота сердечных сокращений и частота дыхания.

Одним из подходов к прогнозированию развития и течения заболевания является построение математической модели эволюции функциональных нарушений человеческого организма, состоящей из множества подмоделей, каждая из которых описывает отдельную систему человека. Однако дыхательная система отличается сложностью, поэтому описывается отдельной моделью. В рамках разработки предлагаемого комплекса была использована эволюционная математическая модель дыхательной системы, описывающая ее взаимодействие с кровеносной системой человеческого организма [4]. Внешнее дыхание включает процессы газообмена между атмосферой и лёгкими через верхние (носоглотка) и нижние (гортань, трахея, вне- и внутрилёгочные бронхи) дыхательные пути и между лёгкими и кровью через респираторный отдел лёгких (альвеолы). Соответственно движение воздуха по крупным воздухоносным путям может быть описано системой уравнений Эйлера [5]:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla(\rho_i v_i) = 0, \quad r \in \bar{\Omega}, \quad t \in [0; T]; \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_i v_i)}{\partial t} + \nabla(\rho_i v_i v_i) + \nabla p_i = 0, \quad r \in \Omega, \quad t \in [0; T]; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho_i E}{\partial t} + \nabla(\rho_i E v_i) + \nabla(p_i v_i) = 0, \quad r \in \bar{\Omega}, \quad t \in [0; T]; \quad (3)$$

$$p_i = \rho_i R \theta, \quad r \in \bar{\Omega}, \quad t \in [0; T], \quad (4)$$

где ρ_i , v_i , p_i – плотность, скорость и давление i -й компоненты смеси газов воздуха соответственно; t – время; E – полная удельная энергия смеси газов воздуха; R – универсальная газовая постоянная; θ – температура смеси; T – верхняя граница переменной времени; r – радиус-вектор; Ω – внутренность области $\bar{\Omega} = \Omega \cup \Gamma$ (замкнутая область); Γ – граница области Ω .

Уравнение, описывающее диффузию газов воздуха через альвеолярно-капиллярный барьер, основывается на первом законе Фика [4]. Функциональное состояние альвеолярно-капиллярной мембраны F определяет диффузионную способность лёгких и принимает значения в интервале $[0; 1]$. Уравнение диффузии имеет вид

$$\tilde{Q}_i = K_i F (\tilde{C}_{i1} - C_{i2}), \quad r \in \bar{\Omega}', \quad t \in [0; T], \quad (5)$$

где \tilde{Q}_i – локальный поток i -й компоненты из воздуха в кровь; K_i – коэффициент проницаемости мембраны для i -й компоненты; \tilde{C}_{i1} , C_{i2} – локальная концентрация i -й компоненты в лёгких и крови соответственно.

Примерный газовый состав вдыхаемого и выдыхаемого человеком воздуха приведен в табл. 1.

Таблица 1. Газовый состав вдыхаемого и выдыхаемого человеком воздуха
Table 1. Gaseous composition of air inhaled and exhaled by humans

Концентрация вещества, %	Вещество				
	Азот	Кислород	Аргон	Углекислый газ	Водяной пар
Во вдыхаемом воздухе	78,00	21,00	0,90	0,04	Переменная
В выдыхаемом воздухе	78,00	16,00	0,90	4,00	

Практическая реализация комплекса

В процессе газообмена между лёгкими и кровью молекула кислорода преодолевает слой сурфактанта, выстилающий альвеолу, альвеолярный эпителий, базальные мембраны и интерстициальное пространство между эпителием и эндотелием, эндотелий капилляра, слой плазмы крови между эндотелием и эритроцитом, мембрану эритроцита, слой цитоплазмы в эритроците и связывается с гемоглином. Измерение насыщения гемоглибина артериальной крови кислородом осуществляется путем просвечивания соответствующего участка ткани пациента двумя световыми лучами с длинами волн, соответствующими красному (R, 660 нм) и инфракрасному (IR, 940 нм) диапазонам спектра, с последующими оцифровкой пульсовой волны (разбиением по времени) и контролем качества сигнала. Это обусловлено способностью гемоглибина в зависимости от его оксигенации в разной степени поглощать свет определенной длины волны: гемоглибин, не содержащий кислород, поглощает свет красного диапазона, а оксигенированный гемоглибин – инфракрасного (рис. 2).

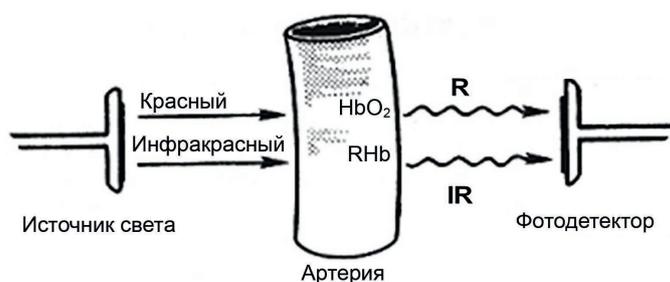


Рис. 2. Принцип работы пульсоксиметрического датчика
Fig. 2. Operating principle of the pulse oximeter sensor

Частота сердечных сокращений определяется в процессе анализа фотоплетизмограммы, которая представляет собой кривую колебаний кровенаполнения исследуемого участка ткани, обусловленных пульсацией артерий и артериол в соответствии с выбросами левым желудочком в аорту определенных объемов крови – пульсовых волн. Фотоплетизмограмма, кроме того, позволяет оценить качество периферического кровотока и тонус сосудов. Следует отметить, что в процессе измерения световые лучи проходят через несколько различных слоев: ткань (кожа, ноготь, кость); капиллярную и венозную кровь; кровь, остающуюся в артериолах в конце каждой пульсации; артериальную кровь, поступающую в артериолы во время систолы сердца (рис. 3).

Таким образом, в периоды времени, предшествующие сердечным сокращениям, световые лучи поглощаются только первыми тремя слоями (рис. 3), и фиксируемый оптический сигнал классифицируется как фоновый. Увеличение объема крови в артериях во время прохождения пульсовой волны ведет к изменению поглощения световых лучей, достигающего максимума по отношению к фоновому в момент пика пульсовой волны, и позволяет выделить часть интенсивности световых лучей, которые поглощаются гемоглином непосредственно артериальной крови. При этом степень насыщения гемоглибина артериальной крови кислородом, измеренная методом пульсоксиметрии, обозначается как SpO₂. Предлагаемый комплекс оснащается пульсоксиметрическими датчиками различных конфигураций: взрослые и детские датчики – для размещения на мочке уха, пальце руки или ноги, детские и неонатальные датчики – для размещения на запястье или ноге (рис. 4).

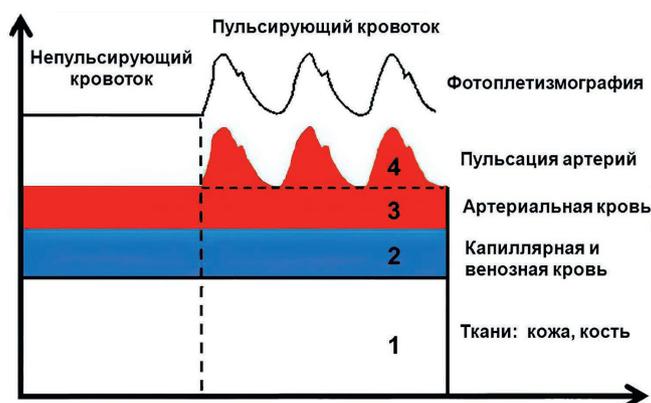


Рис. 3. Структура слоев прохождения световых лучей
Fig. 3. Structure of light ray transmission layers



Рис. 4. Разновидности пульсоксиметрических датчиков, которыми оснащается предлагаемый комплекс
Fig. 4. Types of pulse oximetry sensors with which the proposed complex is equipped

В то же время значения центральной ($ScvO_2$) и смешанной (SvO_2) венозной сатурации также являются важными клиническими параметрами для мониторинга состояния пациента, характеризующими сердечный выброс, доставку и потребление кислорода организмом [6]. В связи с чем с целью генерации колебаний в вене, которые позволят решить проблему низкого отношения интенсивности поглощения световых лучей гемоглобином венозной крови к фоновому поглощению, предлагается использовать внешнюю стимуляцию, например, с помощью надувной воздушной манжеты в форме кольца, надеваемой на палец [7].

Режим записи дыхания включает в себя фиксацию отклонения воздушного давления по отношению к давлению окружающего воздуха вблизи носа и рта в процессе дыхания посредством назальной канюли с ротовым лепестком, что позволяет фиксировать такие нарушения дыхания, как апноэ, гипопноэ, ограничение потока (flow limit), возбуждение, связанное с возрастанием дыхательных усилий (RERA), а также рассчитывать индекс апноэ-гипопноэ.

Для обработки данных используется цифровой метод вычисления сатурации и на ее основе – индекса десатураций, позволяющий снизить количество артефактов в условиях повышенной двигательной активности пациента, излишней пульсации тканей и при очень слабых сигналах. Имеется защита от интенсивного освещения, тканевого рассеяния светового потока, сетевых помех и помех дефибриллятора. Таким образом, комплекс позволяет оперативно и неинвазивно оценить кислородный статус артериальной крови, визуализировать процесс дыхания с возможностью записи фотоплетизмограммы как при однократных измерениях, так и во время продолжительного (ночного/суточного) мониторинга. Не имеет абсолютных противопоказаний, побочные действия не выявлены.

Результаты исследований и их обсуждение

Апробация разработанного комплекса проводилась на базе санаторно-курортного учреждения Республики Беларусь. Это обусловлено, с одной стороны, возможностью проведения диагностики во время сна в комфортных условиях учреждения и в атмосфере, располагающей к внимательному отношению к собственному здоровью, а с другой – достаточным количеством испытуемых, располагающих временем, которые ранее не задумывались о диагностике болезней органов дыхания. В испытаниях по диагностике СОАГ согласились принять участие в составе трех групп 50 человек из 120, прибывших на оздоровление. Возрастной состав был обусловлен осенним временем года и превышал 50 лет, мужчин и женщин – равное количество. Предварительно испытуемые заполнили опросник сонливости Эпворта [8], Берлинский опросник [9] и опросник STOP-BANG [10]. Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты испытаний разработанного комплекса по выявлению синдрома обструктивного апноэ-гипопноэ
Table 2. Results of testing the developed complex for detection of obstructive apnea-hypopnea syndrome

Показатель	Число испытуемых, чел., в группе		
	1	2	3
Количество в группе	87	24	9
Визуально склонны к апноэ	35	16	4
Согласились пройти опрос	32	14	4
Прошли опрос	29	10	3
Результат опроса положительный	18	7	2
Согласились пройти диагностику	12	7	2
Результат диагностики положительный	9	6	2

Таким образом, в ходе апробации удалось осуществить раннее выявление СОАГ у людей, которые не задумывались о прохождении диагностики, но уже имели определенные симптомы. СОАГ был подтвержден в 81 % случаев.

Заключение

1. Предложен диагностический комплекс для неинвазивного измерения SpO_2 , частоты сердечных сокращений и частоты дыхания, который позволяет выявлять болезни органов дыхания, отягощенные дыхательной недостаточностью и синдромом апноэ-гипопноэ. Данный комплекс может использоваться как для разовых измерений при скрининговых обследованиях, так и для проведения длительного суточного или ночного мониторинга с возможностью анализа максимальных и минимальных значений показателей за выбранный период, длительности и частоты таких респираторных событий, как апноэ и гипопноэ, длительности нахождения пациента в различных зонах сатурации, частоты сердечных сокращений и частоты дыхания.

2. Реализация стандартизированного нагрузочного теста шестиминутной ходьбы позволяет оценить резервные возможности организма, эффективность проводимой терапии, а также воздействие велоэргометрической нагрузки, процедур в барокамере, «горный воздух» и других с возможностью выявления дыхательной недостаточности, ее выраженности и условий возникновения.

Список литературы

1. Статистический ежегодник Республики Беларусь: офиц. стат. сб. за 2023 г. Минск: Белстат, 2023.
2. Зельманский, О. Б. Респираторная поддержка: аспекты применения для терапии и реабилитации / Е. И. Давидовская, О. Б. Зельманский // Медэлектроника–2022. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии: сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-техн. конф., г. Минск, 8–9 дек. 2022 г. Минск: Белор. гос. ун-т информ. и радиоэлек., 2022. С. 46–50.
3. Диагностические возможности неинвазивного мониторинга насыщения гемоглобина артериальной крови кислородом в клинике внутренних болезней / Д. В. Лапицкий [и др.]. Минск: Белор. гос. мед. ун-т, 2017.
4. Трусов, П. В. Моделирование процесса дыхания человека: концептуальная и математическая постановки / П. В. Трусов, Н. В. Зайцева, М. Ю. Цинкер // Математическая биология и биоинформатика. 2016. Т. 11, № 1. С. 64–80. DOI: 10.17537/2016.11.64.
5. Бояршинов, М. Г. Решение системы уравнений Эйлера для установившегося течения идеального газа из точечного источника / М. Г. Бояршинов // Вестник Челябинского государственного университета. Физика. 2010. Вып. 8, № 24. С. 5–8.
6. Squara, P. Central Venous Oxygenation: When Physiology Explains Apparent Discrepancies / P. Squara // Critical Care. 2014. Vol. 579. <https://doi.org/10.1186/s13054-014-0579-9>.
7. A New Method for Noninvasive Venous Blood Oxygen Detection / Xu Zhang [et al.] // BioMedical Engineering OnLine. 2016. Vol. 15, No 84. <https://doi.org/10.1186/s12938-016-0208-8>.
8. Johns, M. W. A New Method for Measuring Daytime Sleepiness: The Epworth Sleepiness Scale / M. W. Johns // Sleep. 1991. Vol. 14, No 6. P. 540–545.
9. Using the Berlin Questionnaire to Identify Patients at Risk for the Sleep Apnea Syndrome / N. C. Netzer [et al.] // Ann Intern Med. 1999. Vol. 131, No 7. P. 485–491.
10. Chung, F. STOP Questionnaire: A Tool to Screen Patients for Obstructive Sleep Apnea / F. Chung, B. Yegneswaran, P. Liao // Anesthesiology. 2008. Vol. 108, No 5. P. 812–821.

References

1. Statistical Yearbook of the Republic of Belarus. *Official Stat. Collection for 2023*. Minsk, Belstat Publ., 2023 (in Russian).
2. Zelmanski O. B., Davidovskaya E. I. (2022) Respiratory Support: Aspects of Application for Therapy and Rehabilitation. *Medelectronics–2022. Medical Electronics and New Medical Technologies, Collection of Scientific Articles from the XIII International Scientific and Technical Conference, Minsk, Dec. 8–9*. Minsk, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. 46–50 (in Russian).
3. Lapitsky D. V., Ermolkevich R. F., Metelsky S. M., Ryapolov A. N., Mitkovskaya N. P., Manichev I. A., et al. (2017) *Diagnostic Capabilities of Non-Invasive Monitoring of Arterial Blood Hemoglobin Oxygen Saturation in the Clinic of Internal Diseases*. Minsk, Belarusian State Medical University (in Russian).
4. Trusov P. V., Zaitseva N. V., Tsinker M. Yu. (2016) Modeling the Human Breathing Process: Conceptual and Mathematical Formulations. *Mathematical Biology and Bioinformatics*. 11 (1), 64–80. DOI: 10.17537/2016.11.64 (in Russian).
5. Boyarshinov M. G. (2010) Solution of the System of Euler Equations for the Steady Flow of an Ideal Gas from a Point Source. *Bulletin of the Chelyabinsk State University. Physics*. 8 (24), 5–8 (in Russian).
6. Squara P. (2014) Central Venous Oxygenation: When Physiology Explains Apparent Discrepancies. *Critical Care*. 579. <https://doi.org/10.1186/s13054-014-0579-9>.
7. Xu Zhang, Meimei Zhang, Shengkun Zheng, Liqi Wang, Jilun Ye (2016) A New Method for Noninvasive Venous Blood Oxygen Detection. *BioMedical Engineering OnLine*. 15 (84). <https://doi.org/10.1186/s12938-016-0208-8>.
8. Johns M. W. (1991) A New Method for Measuring Daytime Sleepiness: The Epworth Sleepiness Scale. *Sleep*. 14 (6), 540–545.
9. Netzer N. C., Stoohs R. A., Netzer C. M., Clark K., Strohl K. P. (1999) Using the Berlin Questionnaire to Identify Patients at Risk for the Sleep Apnea Syndrome. *Ann Intern Med*. 131 (7), 485–491.
10. Chung F., Yegneswaran B., Liao P. (2008) STOP Questionnaire: A Tool to Screen Patients for Obstructive Sleep Apnea. *Anesthesiology*. 108 (5), 812–821.

Вклад авторов

Зельманский О. Б. выполнил исследования, апробацию и внедрение диагностического комплекса, подготовил рукопись статьи.

Богуш В. А. осуществил постановку задачи для проведения исследования, выполнил редактирование рукописи статьи.

Authors' contribution

Zelmanski O. B. carried out research, testing and implementation of the diagnostic complex, prepared the manuscript of the article.

Bogush V. A. formulated the task for the study, edited the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Зельманский О. Б., канд. техн. наук, доц., доц. каф. защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники

Богуш В. А., д-р физ.-мат. наук, проф., ректор Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-85-58
E-mail: 7650772@rambler.ru
Зельманский Олег Борисович

Information about the authors

Zelmanski O. B., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Information Security Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Bogush V. A., Dr. of Sci. (Phys. and Math.), Professor, Rector of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-85-58
E-mail: 7650772@rambler.ru
Zelmanski Oleg Borisovich