

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-401-409

УДК 681.784.8

Система визуального отображения изменения физиологического состояния пациентов с хроническим нарушением сознания

Светлана Андреевна Вострикова¹✉, Кира Олеговна Погорелова²,
 Даниил Сергеевич Ширияев³, Иван Сергеевич Полухин⁴,
 Юрий Сергеевич Андреев⁵, Ирина Геннадьевна Смирнова⁶,
 Екатерина Анатольевна Кондратьева⁷, Владислав Евгеньевич Бугров⁸

^{1,2,3,4,5,6,8} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

⁷ Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт имени профессора А.Л. Поленова, филиал ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова», Санкт-Петербург, 191014, Российская Федерация

⁷ Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация

⁷ Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии, Москва, 107031, Российская Федерация

¹ svetlanadegtiareva@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9539-8418>

² pogorelovakira@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4455-1117>

³ dshiryaev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>

⁴ ispolukhin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>

⁵ yura.andreev.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7806-8652>

⁶ igsmirnova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8357-3987>

⁷ eak2003@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4715-7585>

⁸ vladislav.bougrov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1365-9184>

Аннотация

Предмет исследования. В медицине критических состояний остро стоит вопрос восстановления состояния пациентов с хроническим нарушением сознания — вегетативное состояние и состояние минимального сознания. Подобные состояния развиваются у пациентов после комы и характеризуются наличием бодрствования при полном или практически полном отсутствии признаков целенаправленного поведения. Регистрация мелких рефлексов и сигналов организма позволяет персоналу наблюдать за изменением физиологического состояния пациента, эффективностью курса лечения и требует непрерывного процесса контроля состояния, что не всегда возможно ввиду высокой загруженности персонала. В связи с этим наиболее эффективно применение системы отображения состояния пациента с возможностью передачи данных в режиме реального времени. Устройство отображения должно быть безопасным, мобильным, не ограничивать движение пациента и не оказывать на пациента негативное воздействие. Метод отображения интуитивно должен быть понятным и наглядным для более оперативного принятия решений. **Метод.** Основными элементами системы визуализации являются датчики на теле пациента и модули: управления, визуального отображения и передачи данных. В качестве элементов отображения применены RGB светодиодные ленты Arlight 5060 с пиксельной адресацией, закрепленные на тканевой хлопковой подложке. Объект визуального отображения представляет собой четыре слоя: пододеяльник с нижней и верхней сторонами, шерстяное одеяло и хлопковую подложку со светодиодными лентами. Выполнена оценка нагрева предлагаемой системы визуального отображения состояния пациентов и проведено сравнение полученных результатов с максимально допустимым нагревом кожи человека. **Основные результаты.** Оценка теплового режима выполнена путем моделирования в программном пакете COMSOL Multiphysics методом конечных элементов. Результаты моделирования сопоставлены с экспериментальным исследованием с помощью контактного измерителя температуры Centre 304 и инфракрасной камеры Optiris PI 640i. Подтверждена безопасность системы. Предложены сценарии свечения индикаторов для снижения теплового воздействия. **Практическая значимость.** Предложенная система мониторинга может быть актуальна при наблюдении за физиологическим состоянием пациентов, находящихся в отделениях реанимации и интенсивной терапии. Внедрение системы поможет наблюдать за изменением физиологического состояния и повышать шансы пациента по выходу из хронического состояния.

© Вострикова С.А., Погорелова К.О., Ширияев Д.С., Полухин И.С., Андреев Ю.С., Смирнова И.Г., Кондратьева Е.А., Бугров В.Е., 2022

Ключевые слова

система мониторинга, состояние минимального сознания, хроническое нарушение сознания

Благодарности

Экспериментальное исследование выполнено в рамках гранта РФФИ 19-29-01066/2020. Авторы выражают благодарность Российскому научно-исследовательскому нейрохирургическому институту им. А.Л. Поленова (филиалу НМИЦ им. В.А. Алмазова) за помощь и участие в формировании технического облика объекта визуального отображения.

Ссылка для цитирования: Вострикова С.А., Погорелова К.О., Ширяев Д.С., Полухин И.С., Андреев Ю.С., Смирнова И.Г., Кондратьева Е.А., Бугров В.Е. Система визуального отображения изменения физиологического состояния пациентов с хроническим нарушением сознания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 2. С. 401–409. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-401-409

Visual display system of changes in physiological state for patients with chronic disorders

Svetlana A. Vostrikova¹✉, Kira O. Pogorelova², Daniil S. Shiryayev³, Ivan S. Polukhin⁴, Yurii S. Andreev⁵, Irina G. Smirnova⁶, Ekaterina A. Kondratieva⁷, Vladislav E. Bougrov⁸

^{1,2,3,4,5,6,8} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

⁷ Polenov Neurosurgical Institute (Branch of Almazov National Medical Research Centre), Saint Petersburg, 191014, Russian Federation

⁷ Military Medical Academy named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation

⁷ Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitology, Moscow, 107031, Russian Federation

¹ svetlanadegtiareva@itmo.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9539-8418>

² pogorelovakira@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4455-1117>

³ dshiryayev@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>

⁴ ispolukhin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>

⁵ yura.andreev.98@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7806-8652>

⁶ igsmirnova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8357-3987>

⁷ eak2003@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4715-7585>

⁸ vladislav.bougrov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1365-9184>

Abstract

There is an acute issue of patients recovering with chronic disorders in medicine of critical conditions — they are a vegetative and minimally consciousness state. Such states develop in patients after coma and are characterized by the presence of wakefulness with complete or almost complete absence of signs of purposeful behavior. Capturing small reflexes and body signs allows observing changes in the physiological state of the patient, the effectiveness of the treatment course and requires a continuous process, which is not always possible considering to the high workload of medical staff. In this regard, visual display and data transmission systems for patients are more efficient. The display device should be safe, mobile and not restrict the patient's movement, should not have a negative impact on the patient. The display method should be intuitively understandable and clear for prompt decision-making. The main parts of the visual system are sensors of physiological signs on the patient's body, a control module, a visual display object, and a data transmission module. RGB Arlight 5060 LED strips with pixel addressing on a textile substrate are used as display elements. The object of the visual display consists of three layers: a duvet cover on the underside, a wool blanket, a cotton backing with LED strips. The paper presents an assessment of the heating of the proposed visual display system for patients with chronic disorders and a comparison of the results with the maximum permissible heating of human skin. The heating estimation was performed by COMSOL Multiphysics cross-platform finite element analysis, solver, and multiphysics simulation. The simulation results are compared with an experimental study using a contact temperature meter Centre 304 and an infrared camera Optiris PI 640i. The security of the system has been confirmed. Scenarios for the indicators to reduce the thermal impact are proposed. The proposed visual display system may be relevant when monitoring the physiological state of patients in Intensive Care Units. The implementation of the system will help to see changes in the physiological state and increase the chances of getting out of a chronic condition in the future.

Keywords

health monitoring system, coma patients, chronic disorders

Acknowledgements

The experiment study was carried out under the RFBR grant 19-29-01066/2020. The authors express their gratitude to Polenov Neurosurgical Institute for participation in the formation of the technical appearance for the visual display object.

For citation: Vostrikova S.A., Pogorelova K.O., Shiryayev D.S., Polukhin I.S., Andreev Y.S., Smirnova I.G., Kondratieva E.A., Bougrov V.E. Visual display system of changes in physiological state for patients with chronic disorders. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 401–409 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-2-401-409

Введение

В отделениях интенсивной терапии широко применяются диагностические методы оценки нарушений уровня сознания. Они включают в себя тесты на внимание, память и зрительно-пространственные навыки. В 1974 году Г. Тиздейл и Б. Джанетт предложили шкалу комы Глазго (Glasgow Coma Scale, GCS) для надежного и объективного способа регистрации сознания человека [1]. В предложенном методе сознательное состояние определяется по результатам тестов: реакция открывания глаз, двигательная и речевая реакции. В 1975 году М.Ф. Фолштейн предложил шкалу оценки когнитивных функций, включающую такие критерии, как ориентация во времени, пространстве и концентрации внимания [2]. Представленные традиционные нейропсихологические тесты высокоэффективны для оценки когнитивного состояния, но недостаточны для ежедневного инструмента мониторинга, так как требуют постоянного наблюдения со стороны медицинского персонала.

Последние прикладные разработки позволяют лучше описать механизмы нарушения сознания пациентов и его когнитивные функции. Ученые из Швейцарии и Италии рассматривают систему MindBEAGLE в виде шапки для электроэнцефалограммы в качестве оценки и способа общения с пациентами [3]. Множество исследований посвящено методам прогнозирования выхода из хронического состояния и методам нейровизуализации [4–9]. Создаются медицинские инструменты для реабилитации. Медицинский центр Дальневосточного федерального университета предложил костюм TeslaSuit для реабилитации пациентов после комы, в котором реализована система электростимуляции и захвата движений¹.

Несмотря на то, что представленные разработки важны для больных как средство терапевтической помощи и реабилитации, они не позволяют следить за изменением физиологического состояния в ходе реабилитации и направлены либо на восстановление мышечной активности, либо на удаленный мониторинг. Традиционный метод отображения по графикам, числовым значениям и символам на прикроватном мониторе влияет на скорость принятия решений медицинским персоналом из-за времени на необходимый анализ данных с экрана. Непрерывное наблюдение у монитора не представляется возможным, так как медицинский персонал наблюдает за большим количеством пациентов, участвует в операциях и рабочих совещаниях. В отделении реабилитации, куда переводят пациентов из отделения интенсивной терапии, данные системы отсутствуют, но необходимость мониторинга остается.

Предлагаемая в работе система универсальна и помогает получать жизненно важные физиологические параметры, отображать их изменения в реальном времени, указывать на ухудшение или улучшение состояния интуитивным и наглядным способом. Внедрение беспроводной передачи позволит избавиться от элек-

тромагнитных помех, что особенно важно в отделениях интенсивной терапии.

Постановка задачи

Цель работы — разработка системы визуального отображения изменения физиологического состояния пациентов с хроническим нарушением сознания и передачи данных по технологии беспроводной оптической связи (Optical Wireless Communication, OWC). Для решения поставленной цели определены следующие задачи:

- 1) выполнить моделирование распределения температуры на тканевой подложке с установленными светодиодами. На основе результатов моделирования сделать выводы о безопасности объекта визуального отображения по отношению к пациенту;
- 2) разработать и установить цветовые сценарии изменения цветности излучения светодиодов для визуализации изменения значений физиологических параметров пациентов, регистрируемых с датчиков.

Используемые методы исследования

Хронические нарушения сознания развиваются у пациентов, переживших кому, и характеризуются восстановлением бодрствования при полном или практически полном отсутствии признаков осознанного поведения [10, 11]. Клиническое обследование пациента с хроническим нарушением сознания должно быть быстрым, точным, и выполняться одновременно с оказанием неотложной помощи. В связи с этим в реабилитационный период необходимо обеспечить непрерывный дистанционный мониторинг основных показателей жизнедеятельности организма [12]. Основными элементами системы визуального отображения и передачи данных являются датчики, установленные на теле пациента и три модуля: управления, визуального отображения и передачи данных.

Система визуального отображения и передачи данных предназначена для сбора значений физиологических параметров пациентов с датчиков, обработки полученных данных и визуализации физиологических параметров пациентов по заданным сценариям в реальном времени. Модули передачи данных и приема данных выполняют модуляцию сигнала и передачу данных на сервер или персональный компьютер (ПК) по технологии OWC в инфракрасном диапазоне излучения. Осуществляют прием и демодуляцию сигнала на сервере или ПК, отображение значений физиологических параметров на ПК пользователя. Кроме того, система модулей дополняет процесс контроля состояний пациентов с хроническим нарушением сознания, таких как: вегетативное состояние (сохранены такие витальные функции как сердечная деятельность, дыхание), состояние минимального сознания (отчетливые признаки целенаправленного поведения: болевого раздражителя, слежение глазами за окружающими), синдром безответного бодрствования (сохранены когнитивные функции). В соответствии с признаками данных видов угнетения сознания в качестве измеряемых сигналов

¹ TeslaSuit [Электронный ресурс]. URL: <https://teslasuit.io/> (дата обращения 24.03.2022).

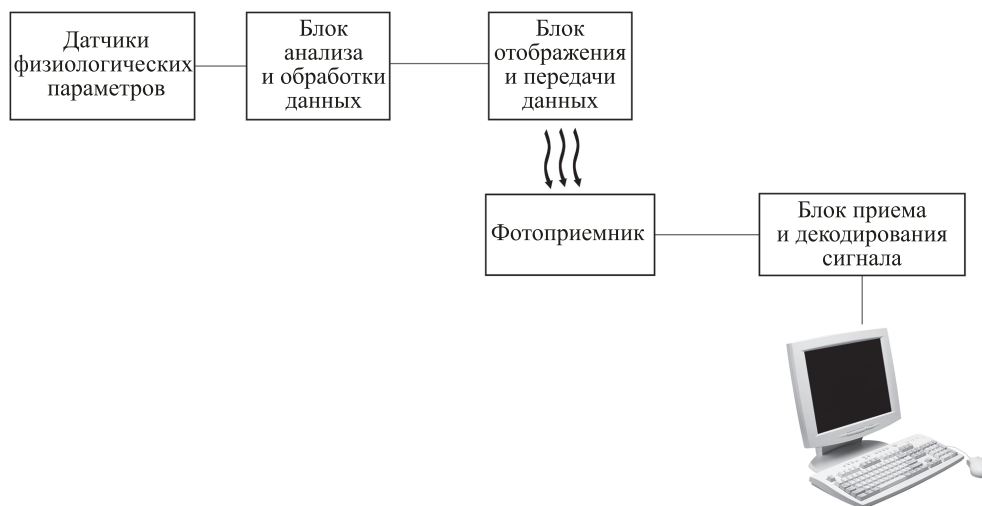


Рис. 1. Блок-схема системы визуального отображения и передачи данных

Fig. 1. Diagram of the visual display and data transmission system

выбраны наиболее важные показатели физиологического состояния пациентов: частота сердечных сокращений (нормальный диапазон значений 60–90 ударов в минуту); насыщение артериальной крови кислородом (нормальный диапазон значений 96–99 %); температура тела (нормальный диапазон значений 36–37 °C).

Для считывания данных сигналов в системе (рис. 1) находятся датчики физиологических параметров, закрепленные на теле пациента: пульсоксиметр (определяет насыщение артериальной крови кислородом и частоту сердечных сокращений); датчик температуры (определяет разницу температур).

Данные передаются на блок управления с медицинских датчиков, закрепленных на теле пациента. Полученные сигналы оцифровываются и обрабатываются. Блок управления содержит модуль управления цветностью, который задает цветность светодиодных лент на объекте визуального отображения в зависимости от значений считываемых параметров: стабильного состояния и отклонений от нормы. Объект визуального отображения предназначен для отображения и визуализации изменения физиологических параметров. В случае отклонения значения от нормы группа лент загорается красным светом, и сигнал тревоги передается на блок приема данных с помощью инфракрасных светодиодов. Пороговый уровень для передачи экстренного сообщения может быть задан таким образом, чтобы своевременно оповещать об изменениях физиологических показателей.

На рис. 2 представлены слои внутри объекта визуального отображения.

Светодиодные ленты расположены на хлопковой подложке для интуитивно понятной визуализации физиологических параметров пациентов по цветности излучения светодиодов: для значений в норме, ниже или выше нормальных значений. Предложенная схема расположения лент является доработанной конфигурацией, представленной в работе [13], где светодиодные ленты были расположены по группам для каждого типа параметра, и объект визуального отображения подклю-

чался к конкретному прикроватному монитору. Такое подключение ограничивало систему отображения и затрудняло считывание данных персоналом.

При выходе значений за пределы нижней границы цветности светодиоды излучают в диапазоне холодных цветов, за пределы верхней границы — теплых цветов (рис. 3).

При этом считывание отклоняемого параметра происходит по сценарию излучения, с помощью которого

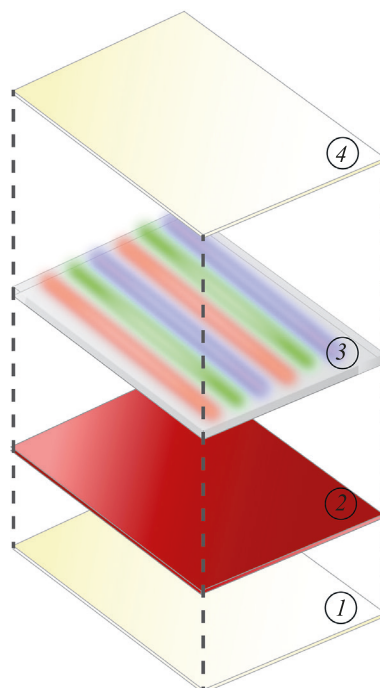


Рис. 2. Состав объекта визуального отображения:

1 — нижняя часть пододеяльника; 2 — одеяло; 3 — подложка со светодиодными лентами; 4 — верхняя часть пододеяльника

Fig. 2. The composition of the visual display object: 1 — the lower part of the blanket slip, 2 — a blanket, 3 — a textile substrate with LED strips, 4 — the top of the blanket slip

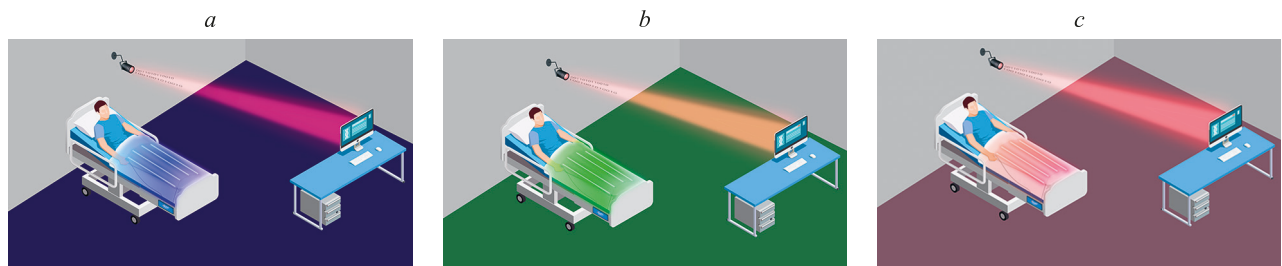


Рис. 3. Примеры сценария изменения цветности излучения светодиодов на объекте визуального отображения данных для параметров: за пределами нижней границы значений (а); в норме (b); за пределами верхней границы значений (с)

Fig. 3. Scenarios of light-emitting diodes on the visual display object: the values are below the normal range (a), the values are in the normal range (b), the values are above normal range (c)

имитируется физиологическая реакция организма, интуитивно понятная каждому пользователю. Приведем расшифровку сценариев изменения цветности для измеряемых параметров: частота пульса — колебание стенок артерий или пульсация (пульсирующий цвет светодиодных лент); температура тела — терморегуляция (увеличение интенсивности свечения светодиодных лент); SpO_2 — насыщение крови кислородом (плавное изменение цветности излучения светодиодов от одного края ленты к другому).

В цветовом пространстве на рис. 4 показаны области координат цветности (RGB), которые можно задать светодиодным лентам в блоке управления.

Гамма цветов ограничивается треугольником на цветовом пространстве с вершинами в следующих координатах: $x_r = 0,71, y_r = 0,29$; $x_g = 0,18, y_g = 0,72$; $x_b = 0,16, y_b = 0,03$. Излучение светодиодов соответствует следующим координатам на данном пространстве: $x_r = 0,44, y_r = 0,43$; $x_g = 0,27, y_g = 0,64$; $x_b = 0,2, y_b = 0,19$. Таким

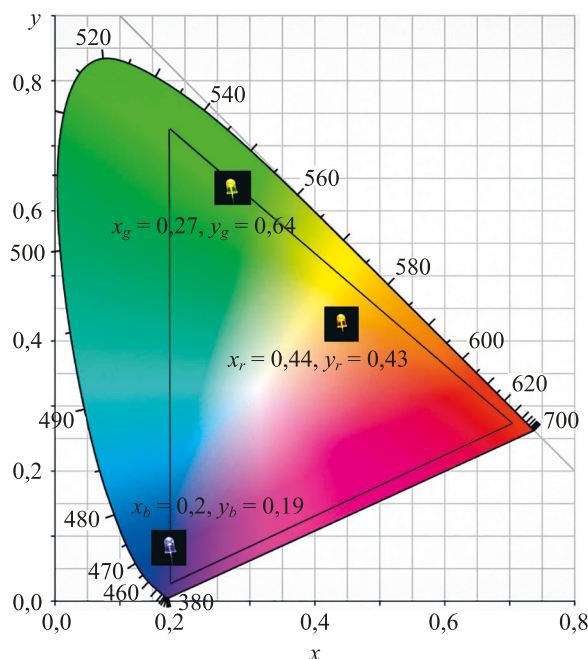


Рис. 4. Сценарии цветности светодиодов на диаграмме цветового пространства

Fig. 4. LED scenarios on the color space diagram

образом, цвета не будут пересекаться и дадут ясное представление о типе отклоняемого параметра.

Расчет теплового нагрева объекта визуального отображения

На основании того, что в объекте визуального отображения предполагается подложка со светодиодами, необходимо учитывать нагрев одеяла при проектировании системы. При прямом контакте одеяла с телом пациента появляется необходимость установления ограничений на допустимый диапазон температур и совершенствования способов отвода тепла. Допустимый нагрев тканей человеческого организма не должен превышать 43°C [14]. Длительный нагрев выше этой температуры вызывает необратимые процессы в клетках кожи и ожоги.

Для исследования распределения температуры в одеяле осуществлено численное моделирование в программном пакете COMSOL Multiphysics. Объектом исследования стали RGB светодиодные ленты Arlight 5060, 12 В, 30 шт/м, с пиксельной адресацией ввиду простого управления. Объект визуального отображения имеет четыре слоя: пододеяльник с нижней и верхней сторонами, шерстяное одеяло и хлопковую подложку со светодиодными лентами.

Максимальная мощность ленты данного типа длиной 1 м составляет 7,2 Вт, световой поток 240 лм. Тогда коэффициент полезного действия η светодиодных лент составляет 37 %. Тепловая мощность определена выражением:

$$P_T = P \cdot l \cdot \eta,$$

где P — погонная мощность светодиодной ленты; l — длина ленты.

Зададим $P = 7,2$ Вт/м, $l = 6,6$ м, получим значение полной тепловой мощности $P_T = 29,94$ Вт.

Отметим, что при разработке модели учитывались теплофизические свойства тканых материалов и воздушных прослоек между ними. Примем, что коэффициенты теплопроводности для хлопка — $0,05$ Вт/(м·К) и для шерсти — $0,035$ Вт/(м·К).

В основе математической модели, описывающей распространение тепла по элементам системы, лежит стационарное уравнение теплопроводности

$$-\lambda \Delta T = q_v,$$

где λ — коэффициент теплопроводности; q_v — объемная мощность источников теплоты.

Для модели, приближенной к реальной среде, в пакете COMSOL Multiphysics зададим граничные условия:

- температура окружающей среды $T_{\text{ext}} = 24^\circ\text{C}$;
- граничный источник тепла — тепловая мощность светодиодов $P_0 = 0,15$ Вт, заданная для тонкого слоя рабочей области каждого светодиода;
- поток тепла — теплопередача от верхней и нижней границ системы в соответствии с законом Ньютона–Рихмана

$$q_0 = h(T_{\text{ext}} - T),$$

где $h = 25$ Вт/(м²·К) — коэффициент теплоотдачи; q_0 — удельный тепловой поток, Вт; T — температура поверхности, °C;

- термический контакт — дополнительное тепловое сопротивление, возникающее в результате неидеального контакта поверхностей — задан между слоями тканых материалов толщиной 2 мм и имеет тепловые свойства воздуха.

Модель светодиодной матрицы, реализованная в пакете COMSOL Multiphysics, содержит 198 светодиодов. Результаты моделирования (распределение температуры по поверхности) представлены на рис. 5.

Моделирование выполнено для объекта, целиком окруженного воздухом и без учета влияния тепловыделения человеческого тела, находящегося под одеялом. Для фактора нагрева телом человека в расчетную модель добавлен блок толщиной 3 мм (примерная толщина эпидермиса и дермы кожи человека) с начальной температурой 36°C . При данных условиях характер теплового поля не изменился, а максимальная температура нижнего слоя увеличилась до значения 41°C .

При учете влияния температуры тела человека возникает ряд допущений. Невозможно предусмотреть в модели то, что в реальности разные участки поверхности кожи имеют разную температуру, а также учесть неравномерное прилегание тканевых объектов к человеку и возникающие при этом значительные воздушные зазоры.

Экспериментальное исследование теплового нагрева объекта визуального отображения

С целью предварительной верификации построенной компьютерной модели выполним экспериментальное исследование. На небольшом участке одеяла закрепим и подключим к источнику питания светодиодную ленту, соответствующую по длине размеру участка и имеющую тепловую мощность, заданную при моделировании $P_T = 29,94$ Вт. Полученную систему разместим на горизонтальной поверхности, а к нижнему слою одеяла подведем термопару от термометра Centre 304. С помощью второй термопары измерим температуру окружающей среды, которая равна температуре, взятой при моделировании $T_{\text{окр}} = 24^\circ\text{C}$. Длительность нагрева составила 30 мин.

На рис. 7 представлен график зависимости температуры нижнего слоя объекта визуального отображения от времени работы светодиодной ленты, полученный в результате эксперимента. Вид графика соответствует регулярному режиму нагревания тел. Тепловое равновесие установилось примерно через 15 мин работы, и датчик показал максимальную температуру нижнего слоя равную $32,4^\circ\text{C}$.

Проведем изучение температурного поля объекта визуального отображения с помощью инфракрасной

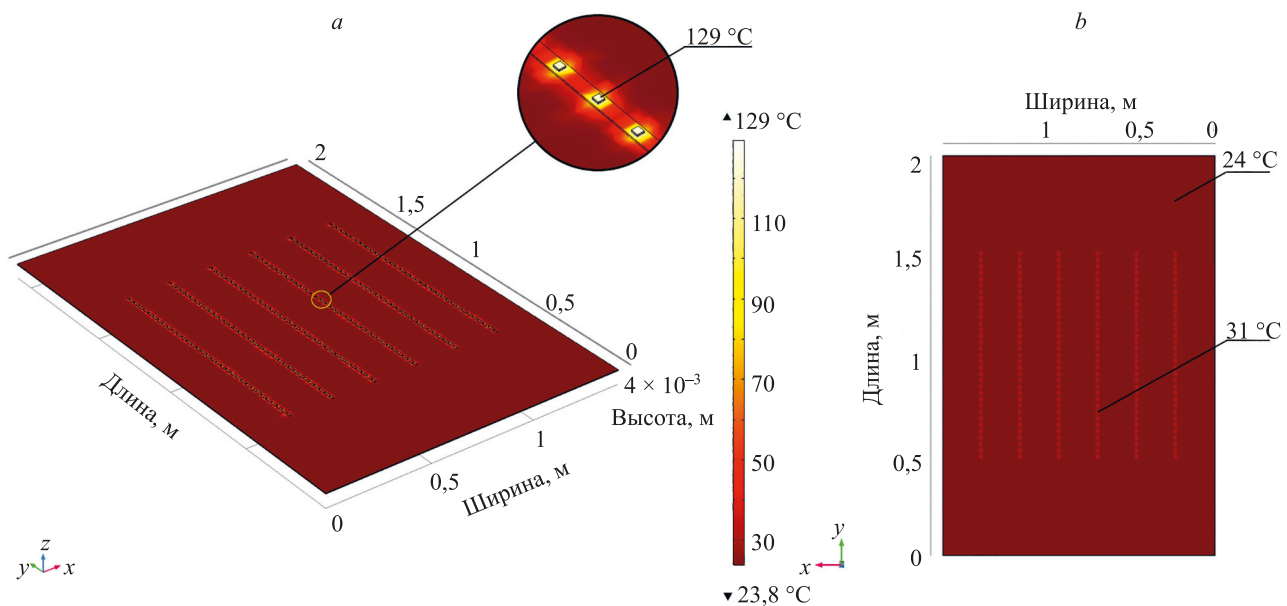


Рис. 5. Распределение температуры по поверхности объекта визуального отображения на верхнем (a) и нижнем (b) слоях. 129°C и 31°C — максимальные температуры в местоположении светодиода на верхнем и нижнем слоях; 4×10^3 — координата по оси Z

Fig. 5. Temperature distribution over the surface of the visual display object: on the top layer (a), on the bottom layer (b).

129°C and 31°C are the maximum temperatures at the location of the LED on the top and bottom layers; 4×10^3 is coordinate along the Z axis

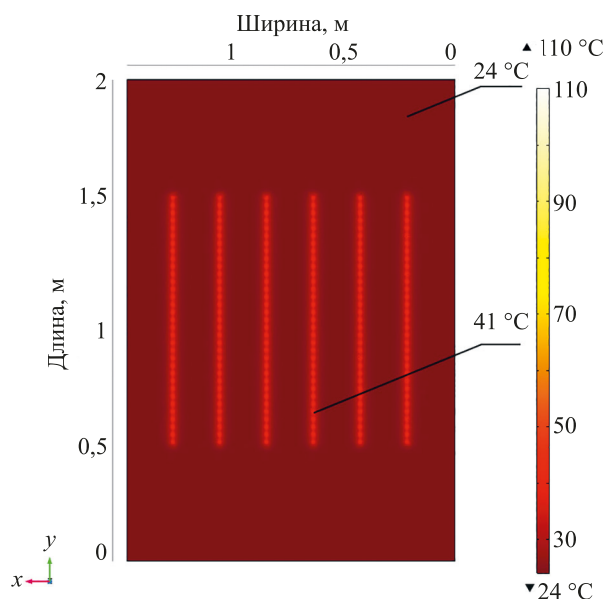


Рис. 6. Распределение температуры на нижнем слое объекта визуального отображения при моделировании с учетом температуры тела человека

Fig. 6. Temperature distribution on the lower layer of the visual display object, considering a temperature of the human body

камеры. Экспериментальная установка и начальные условия идентичны как при эксперименте учета температуры тела человека. В качестве измерительного прибора используем инфракрасную камеру Optiris PI 640i. На рис. 8 представлен вид теплового поля, снятый камерой. Среднее значение температуры в выбранной области составляет 30 °C.

Отметим, что результаты теплового распределения получены в воздушной среде без учета тепла выделяемого телом человека. Чтобы убедиться в безопасности системы инфракрасной камерой, снимем значения температуры на верхнем и нижнем слоях в случае, когда объект находится на человеке. На рис. 9 представлен

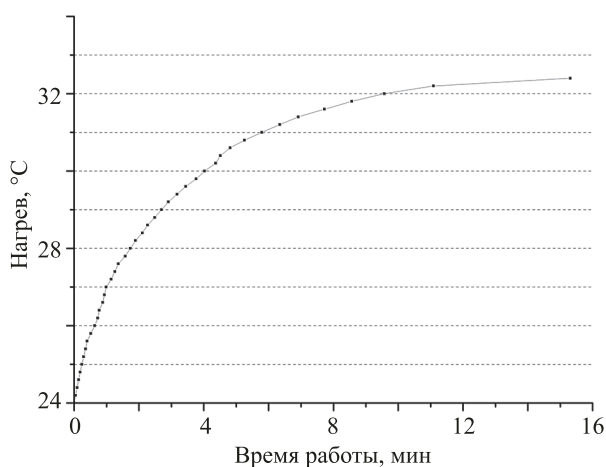


Рис. 7. График зависимости температуры нагрева нижнего слоя объекта от времени работы светодиода

Fig. 7. Graph of the dependence of the heating temperature of the lower layer of the object on the operating time of the LED

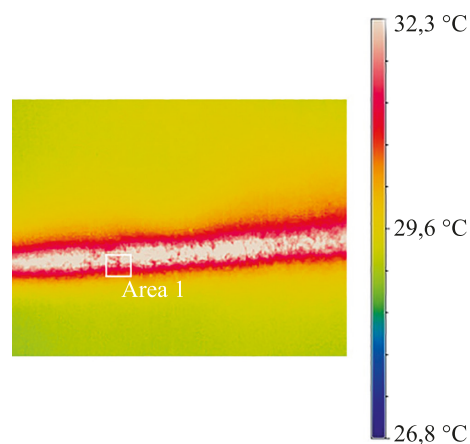


Рис. 8. Тепловое распределение на участке нижнего слоя, где Area 1 — выбранная область измерений
Fig. 8. Thermal distribution in the area of the lower layer where Area 1 is the selected measurement area

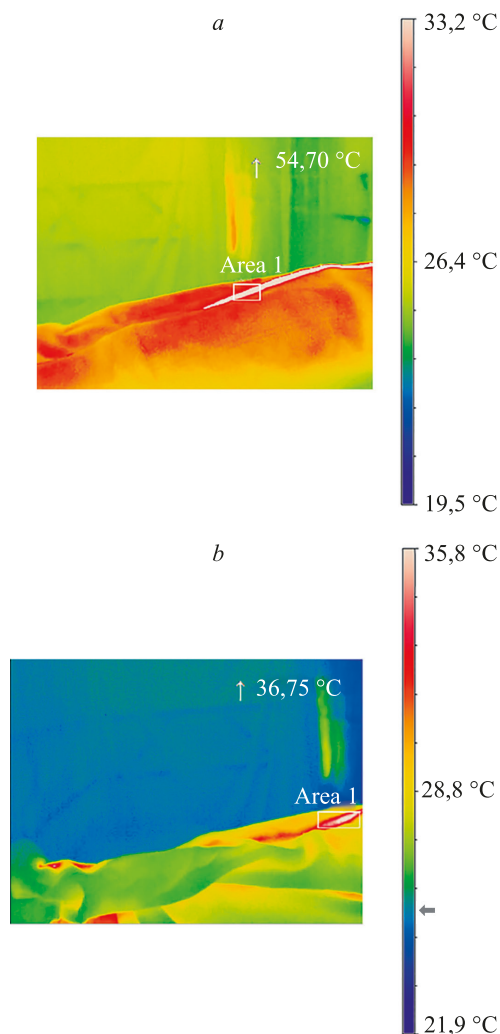


Рис. 9. Тепловое распределение на участках верхнего (a) и нижнего (b) слоев

Fig. 9. Thermal distribution in the area: upper layer (a), lower layer (b)

вид теплового поля, если человек находится под одеялом.

Для верхнего слоя максимальная температура на снимке 54,7 °C, для нижнего 36,75 °C.

Основные результаты

Моделирование проведено для стационарных задач, т. е. не учитывалась зависимость температурного распределения от времени. Результаты получены для системы с установившимся тепловым равновесием.

В результате моделирования в воздушной среде выявлено, что температура поверхности нижней части пододеяльника достигает максимального значения 34,31 °C в местах проекции светодиодов на эту плоскость. В случае моделирования с учетом температуры тела человека температура достигает 41 °C, при экспериментальном исследовании в воздухе – 32,2 °C, а при контакте с телом человека – 36,75 °C. Все полученные значения температур и в эксперименте, и в модели попадают в допустимый диапазон. Форма температурного поля при распространении тепла от светодиодной ленты в случае моделирования совпадает с формой, полученной в реальных условиях при наблюдении тепловизором. Во всех случаях наблюдается рассеивание тепла от светодиодных лент на тканевых материалах и, как следствие, значительное уменьшение температуры нагрева нижнего слоя объекта визуального отображения по сравнению с рабочей областью светодиода.

Отметим, что для устранения непрерывного тепловыделения и снижения величины нагрева использованы периодические сценарии изменения цветности излучения светодиодов.

Литература

1. Teasdale G., Jennett B. Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale // *The Lancet*. 1974. V. 304. N 7882. P. 81–84. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(74\)91639-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(74)91639-0)
2. Folstein M.F., Folstein S.E., McHugh P.R. “Mini-mental state”: A Practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician // *Journal of Psychiatric Research*. 1975. V. 12. N 3. P. 189–198. [https://doi.org/10.1016/0022-3956\(75\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0022-3956(75)90026-6)
3. Guger C., Allison B., Kammerhofer A., Guttmann F., Von Oertzen T.J., Spataro R., La Bella V., Annen J., Laureys S., Heilinger A., Ortner R., Cho W. MindBEAGLE – A new system for the assessment and communication with patients with disorders of consciousness and complete locked-in syndrome // *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2017. P. 3008–3013. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8123086>
4. Thibaut A., Chatelle C., Stender J., Demertzi A., Bernard C., Hustinx R., Laureys S., Bruno M.-A. PET imaging in altered states of consciousness: Coma, sleep, and hypnosis // *PET and SPECT in Neurology*. 2014. P. 965–986. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54307-4_47
5. *Brain Function and Responsiveness in Disorders of Consciousness* / ed. by M.M. Monti, W.G. Sanita. Springer, 2016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21425-2>
6. Cruse D., Chennu S., Chatelle C., Bekinschtein T.A., Fernández-Espejo D., Pickard J.D., Laureys S., Owen A.M. Bedside detection of awareness in the vegetative state: a cohort study // *The Lancet*. 2012. V. 378. N 9809. P. 2088–2094. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61224-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61224-5)
7. Li X., Tan X., Wang P., Hu X., Dong Y., Zhang X., Luo B. Chronic disorders of consciousness: a case report with longitudinal evaluation of disease progression using 7 T magnetic resonance imaging // *BMC Neurology*. 2020. V. 20. P. 396. <https://doi.org/10.1186/s12883-020-01973-0>

Заключение

Представленная система визуального отображения позволяет определять несколько параметров, отображающих физиологическое состояние пациента: частоту сердечных сокращений, насыщение артериальной крови кислородом и температуру тела. Данные параметры выбраны с целью неинвазивного мониторинга физиологического состояния пациентов. В системе использована технология беспроводной передачи данных (Optical Wireless Communication) с применением инфракрасных светодиодов.

Для объекта визуального отображения выбрана подложка из хлопкового материала. Основными критериями выбора ткани стали такие критерии как воздухопроницаемость и теплозащитные свойства (коэффициент теплопроводности — 0,05 Вт/(м·К)), что позволяет сохранять тепло от человека.

Несмотря на актуальность и важное практическое значение инструментального метода мониторинга, отметим, что он не заменяет клиническую оценку параметров пациента (например, артериальное давление и содержание CO₂), а служит визуальным дополнением к мониторингу жизненно важных параметров жизнедеятельности пациента и своевременным средством оповещения о критической ситуации. Система сигнализирует об изменении физиологического состояния как визуально, так и удаленно, чтобы медицинский персонал получал информацию о больных, не находясь в непосредственной близости около пациента.

References

1. Teasdale G., Jennett B. Assessment of coma and impaired consciousness. A practical scale. *The Lancet*, 1974, vol. 304, no. 7882, pp. 81–84. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(74\)91639-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(74)91639-0)
2. Folstein M.F., Folstein S.E., McHugh P.R. “Mini-mental state”: A Practical method for grading the cognitive state of patients for the clinician. *Journal of Psychiatric Research*, 1975, vol. 12, no. 3, pp. 189–198. [https://doi.org/10.1016/0022-3956\(75\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0022-3956(75)90026-6)
3. Guger C., Allison B., Kammerhofer A., Guttmann F., Von Oertzen T.J., Spataro R., La Bella V., Annen J., Laureys S., Heilinger A., Ortner R., Cho W. MindBEAGLE – A new system for the assessment and communication with patients with disorders of consciousness and complete locked-in syndrome. *Proc. of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, 2017, pp. 3008–3013. <https://doi.org/10.1109/SMC.2017.8123086>
4. Thibaut A., Chatelle C., Stender J., Demertzi A., Bernard C., Hustinx R., Laureys S., Bruno M.-A. PET imaging in altered states of consciousness: Coma, sleep, and hypnosis. *PET and SPECT in Neurology*, 2014, pp. 965–986. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54307-4_47
5. *Brain Function and Responsiveness in Disorders of Consciousness*. Ed. by M.M. Monti, W.G. Sanita. Springer, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-21425-2>
6. Cruse D., Chennu S., Chatelle C., Bekinschtein T.A., Fernández-Espejo D., Pickard J.D., Laureys S., Owen A.M. Bedside detection of awareness in the vegetative state: a cohort study. *The Lancet*, 2012, vol. 378, no. 9809, pp. 2088–2094. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61224-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61224-5)
7. Li X., Tan X., Wang P., Dong Y., Zhang X. Chronic disorders of consciousness: a case report with longitudinal evaluation of disease progression using 7 T magnetic resonance imaging. *BMC Neurology*, 2020, vol. 20, pp. 396. <https://doi.org/10.1186/s12883-020-01973-0>

8. Kremneva E., Sergeev D., Zmeykina E., Legostaeva L., Piradov M. Chronic disorders of consciousness: role of neuroimaging // *Journal of Physics: Conference Series*. 2017. V. 886. P. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/886/1/012011>
9. Cain J.A., Spivak N.M., Coetzee J.P., Crone J.S., Johnson M.A., Lutkenhoff E.S., Real C., Buitrago-Blanco M., Vespa P.M., Schnakers C., Monti M.M. Ultrasonic thalamic stimulation in chronic disorders of consciousness // *Brain Stimulation*. 2021. V. 14. N 2. P. 301–303. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.01.008>
10. Бакулин И.С., Кремнева Е.И., Кузнецов А.В. и др. Хронические нарушения сознания / под ред. академика РАН М.А. Пирадова. М.: Горячая линия — Телеком, 2020. 288 с. <https://doi.org/10.25780/0006>
11. Пирадов М.А., Супонева Н.А., Сергеев Д.В., Червяков А.В., Рябинкина Ю.В., Силин Д.О., Пойдашева А.Г., Кремнева Е.И., Морозова С.Н., Язева Е.Г., Легостаева Л.А. Структурно-функциональные основы хронических нарушений сознания // *Анналы клинической и экспериментальной неврологии*. 2018. Т. 12. № 5. С. 6–15. <https://doi.org/10.25692/ACEN.2018.5.1>
12. Янковская Л.В., Пицко Д.В. Мониторинг в кардиологических блоках интенсивной терапии // *Международный журнал сердца и сосудистых заболеваний*. 2016. Т. 4. № 12. С. 52–62.
13. Degtiareva S.A., Kondratieva E.A., Smirnova I.G., Polukhin I.S., Andreev Y.S., Bougrov V.E. Visual control and data transmission system by Li-Fi technology for patients in a vegetative state/unresponsive wakefulness syndrome and minimally conscious state // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. V. 1697. P. 012172. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012172>
14. Lovik R.D., Abraham J.P., Sparrow E.M. Surrogate human tissue temperatures resulting from misalignment of antenna and implant during recharging of a neuromodulation device // *Neuromodulation*. 2011. V. 14. N 6. P. 501–511. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1403.2011.00396.x>
8. Kremneva E., Sergeev D., Zmeykina E., Legostaeva L., Piradov M. Chronic disorders of consciousness: role of neuroimaging. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, vol. 886, pp. 012011. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/886/1/012011>
9. Cain J.A., Spivak N.M., Coetzee J.P., Crone J.S., Johnson M.A., Lutkenhoff E.S., Real C., Buitrago-Blanco M., Vespa P.M., Schnakers C., Monti M.M. Ultrasonic thalamic stimulation in chronic disorders of consciousness. *Brain Stimulation*, 2021, vol. 14, no. 2, pp. 301–303. <https://doi.org/10.1016/j.brs.2021.01.008>
10. Bakulin I.S., Kremneva E.I., Kuznetsov A.V. et al. *Chronic Disorders of Consciousness*. Moscow, Gorjachaja Linija–Telekom Publ., 2020, 288 p. (in Russian). <https://doi.org/10.25780/0006>
11. Piradov M.A., Suponeva N.A., Sergeev D.V., Chervyakov A.V., Ryabinkina Yu.V., Sinitsyn D.O., Poidasheva A.G., Kremneva E.I., Morozova S.N., Yazeva E.G. Structural and functional basis of chronic disorders of consciousness. *Annals of Clinical and Experimental Neurology*, 2018, vol. 12, no. 5, pp. 6–15. (in Russian). <https://doi.org/10.25692/ACEN.2018.5.1>
12. Yankovskaya L.V., Pitsko D.V. Monitoring in cardiologic intensive care units. *International Heart and Vascular Disease Journal*, 2016, vol. 4, no. 12, pp. 52–62. (in Russian)
13. Degtiareva S.A., Kondratieva E.A., Smirnova I.G., Polukhin I.S., Andreev Y.S., Bougrov V.E. Visual control and data transmission system by Li-Fi technology for patients in a vegetative state/unresponsive wakefulness syndrome and minimally conscious state. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1697, pp. 012172. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1697/1/012172>
14. Lovik R.D., Abraham J.P., Sparrow E.M. Surrogate human tissue temperatures resulting from misalignment of antenna and implant during recharging of a neuromodulation device. *Neuromodulation*, 2011, vol. 14, no. 6, pp. 501–511. <https://doi.org/10.1111/j.1525-1403.2011.00396.x>

Авторы

Вострикова Светлана Андреевна — научный сотрудник, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-9539-8418>, svetlanadegtiareva@itmo.ru

Погорелова Кира Олеговна — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-4455-1117>, pogorelovakira@itmo.ru

Ширяев Даниил Сергеевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>, dshiryaev@itmo.ru

Полухин Иван Сергеевич — ведущий инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>, ispolukhin@itmo.ru

Андреев Юрий Сергеевич — инженер, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-7806-8652>, yura.andreev.98@mail.ru

Смирнова Ирина Геннадьевна — кандидат технических наук, доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0001-8357-3987>, igsmirnova@itmo.ru

Кондратьева Екатерина Анатольевна — доктор медицинских наук, руководитель группы изучения минимального сознания, Российский научно-исследовательский нейрохирургический институт имени профессора А.Л. Поленова, филиал ФГБУ «НМИЦ им. В.А. Алмазова», Санкт-Петербург, 191014, Российская Федерация; старший преподаватель, Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Санкт-Петербург, 194044, Российская Федерация; старший научный сотрудник, Федеральный научно-клинический центр реаниматологии и реабилитологии, Москва, 107031, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0003-4715-7585>, eak2003@mail.ru

Бугров Владислав Евгеньевич — доктор физико-математических наук, профессор, руководитель лаборатории, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, <https://orcid.org/0000-0002-1365-9184>, vladislav.bougrov@itmo.ru

Authors

Svetlana A. Vostrikova — Scientific Researcher, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-9539-8418>, svetlanadegtiareva@itmo.ru

Kira O. Pogorelova — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-4455-1117>, pogorelovakira@itmo.ru

Daniil S. Shiryayev — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8612-0297>, dshiryaev@itmo.ru

Ivan S. Polukhin — Leading Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-6817-7871>, ispolukhin@itmo.ru

Yurii S. Andreev — Engineer, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-7806-8652>, yura.andreev.98@mail.ru

Irina G. Smirnova — PhD, Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0001-8357-3987>, igsmirnova@itmo.ru

Ekaterina A. Kondratieva — D. Sc. (Medicine), Head of MCS Study Group, Polenov Neurosurgical Institute (Branch of Almazov National Medical Research Centre), Saint Petersburg, 191014, Russian Federation; Senior Lecturer, Military Medical Academy named after S.M. Kirov, Saint Petersburg, 194044, Russian Federation; Senior Researcher, Federal Research and Clinical Center of Intensive Care Medicine and Rehabilitation, Moscow, 107031, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0003-4715-7585>, eak2003@mail.ru

Vladislav E. Bougrov — D. Sc. (Physics & Mathematics), Professor, Head of Laboratory, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, <https://orcid.org/0000-0002-1365-9184>, vladislav.bougrov@itmo.ru

Статья поступила в редакцию 21.12.2021
Одобрена после рецензирования 08.03.2022
Принята к печати 30.03.2022

Received 21.12.2021
Approved after reviewing 08.03.2022
Accepted 30.03.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»