



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-5-11>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 612.087.1

АЛГОРИТМ АНАЛИЗА БИМЕДИЦИНСКИХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ЗДОРОВЬЯ ЧЕЛОВЕКА

А. Н. ОСИПОВ¹, А. В. ПАЦЕЕВ², С. В. ПАЦЕЕВ³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Республиканский центр медицинской реабилитации и бальнеолечения (г. Минск, Республика Беларусь)

³1-я городская клиническая больница (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 03.11.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Рассмотрены задачи адаптации существующих и разработки новых диагностических алгоритмов и методик дистанционного мониторинга физиологического состояния человека применительно к технологии интернета вещей. Для снижения энергопотребления носимого блока и датчиков биомедицинских сигналов, сокращения избыточности регистрируемой и передаваемой диагностической информации процесс распознавания критической ситуации разделен на два этапа. На первом контролируются основные показатели (частота сердечных сокращений и сигнал, информирующий о падении человека). В случае их несоответствия норме выполняется анализ дополнительных сигналов (второй этап) для подтверждения критической ситуации и определения степени тревоги.

Ключевые слова: дистанционный мониторинг, биомедицинские сигналы, алгоритм работы системы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Осипов, А. Н. Алгоритм анализа биомедицинских сигналов в системах дистанционного мониторинга состояния здоровья человека / А. Н. Осипов, А. В. Пацеев, С. В. Пацеев // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 1. С. 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-5-11>.

ANALYSIS ALGORITHM OF BIOMEDICAL SIGNALS IN REMOTE MONITORING SYSTEMS OF HUMAN HEALTH

ANATOLY N. OSIPOV¹, ALEXANDER V. PATSEEV², SERGEY V. PATSEEV³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Republican Center for Medical Rehabilitation and Balne Treatment (Minsk, Republic of Belarus)

³1st City Clinical Hospital (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 03.11.2022

Abstract. The article considers the problems of adaptation of existing and development of new diagnostic algorithms and methods of remote monitoring of the physiological state of a person in relation to the Internet of Things technology. In order to reduce the energy consumption of the wearable unit and biomedical signal sensors, reduce the redundancy of the recorded and transmitted diagnostic information, the critical situation recognition process is divided into two stages. At the first stage, the main indicators (heart rate and human fall signal) are monitored. If they do not comply with the norm, additional signals are analyzed (the second stage) to confirm the critical situation and determine the degree of alarm.

Keywords: remote monitoring, biomedical signals, system operation algorithm.

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

For citation. Osipov A. N., Patseev A. V., Patseev S. V. (2023) Analysis Algorithm of Biomedical Signals in Remote Monitoring Systems of Human Health. *Doklady BGUIR*. 21 (1), 5–11. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-5-11> (in Russian).

Введение

Современный уровень информационно-коммуникационных технологий, основанных на технологиях 5G, анализа больших данных, искусственного интеллекта и интернета вещей (IoT), предоставляет обширные возможности для развития электронного здравоохранения и, в частности, для дистанционной диагностики состояния органов и функциональных систем человека. Уже к 2013 году с помощью носимых устройств 60 % взрослых американцев отслеживали свой вес, диету или режим физических упражнений, 33 % – такие показатели здоровья, как артериальное давление, уровень гликемии в крови, характер сна, 8 % взрослых американцев специально используют носимые глюкометры [1]. Перечень задач [2] и показателей, отслеживаемых устройствами, прогрессивно увеличивается в связи с заинтересованностью не только систем здравоохранения [3], но и крупных страховых компаний [4]. Разработка систем дистанционного мониторинга пациентов (СДМП) считается одним из самых важных направлений в мобильном здравоохранении [5]. В соответствии с современной классификацией системы индивидуального дистанционного мониторинга (remote patient monitoring) являются составной частью областей телемедицины (tele-medicine) и мобильной медицины (m-medicine), входящих в область электронного здравоохранения (e-health) [6].

В обзорных исследованиях по теме IoT медицинских систем обсуждались подходы к анализу данных, сравнительный анализ медицинских сенсорных устройств, результаты программно-аппаратной реализации систем мониторинга [7–11]. Системы удаленного мониторинга имеют, как правило, трехуровневую структуру [12]. Первый уровень включает в себя миниатюрные биосенсоры, которые могут быть как носимыми, так и имплантируемыми, и носимый мобильный блок. Второй уровень состоит из шлюзовых устройств, таких как смартфоны и ноутбуки. Функция шлюза заключается в обеспечении связи между сенсорной сетью и глобальной сетью (третьего уровня). Третий уровень представляет собой сеть, которая включает медицинский сервер хранения и обработки данных, соединенный с различными пользователями (больницей, скорой помощью, врачами, близкими родственникам, аптеками и т. д.). Для обнаружения аномального поведения используются два подхода. Первый основан на простом пороговом методе, а второй – на машинном обучении прогностических моделей для выявления аномального поведения на базе прошлых исторических данных. В [13] сформулированы общие требования к системам индивидуального мониторинга: низкое энергопотребление нательных систем, доступная стоимость обслуживания и ремонта, применение стандартных телекоммуникационных протоколов и устройств, возможность масштабируемости системы и развития ее для диагностики других заболеваний, самонастройка системы, конфиденциальность и безопасность передаваемой и хранимой информации, персональный доступ, режим реального времени, надежность.

Условия функционирования СДМП являются более жесткими в сравнении с условиями работы устройств клинического мониторинга (передвижение пациента и пр.). Кроме того, недостаточно исследованы вопросы, лежащие на стыке выбора медицинской методики диагностирования разработки, разработки алгоритмов выявления критичных ситуаций и оптимизации вычислительных ресурсов системы. Таким образом, в предлагаемом исследовании представлены разработки методик и алгоритмов индивидуальной дистанционной диагностики применительно к технологии интернета вещей.

Обоснование методики (врачебной) дистанционного мониторинга

Естественно, что стратегическими задачами мониторинга жизненно важных (витальных) параметров являются идентификация предкризовых и критических состояний (гипертонический криз, инфаркт миокарда, нарушения сердечного ритма, инсульт, сахарная кома, внезапная сердечная смерть) и выработка тревожной сигнализации как для пациента, так и для медицинского

персонала с целью принятия неотложных мер. При этом важно выделять хронические состояния и степень их тяжести (артериальную гипертензию, ишемическую болезнь сердца, сердечную недостаточность, обструктивную болезнь лёгких, сахарный диабет и др.). Контроль параметров исследуемых сигналов осуществляется на основе принципа контроля резервов регуляторных систем организма по обеспечению гомеостаза. Он, в частности, основан на том, что дисфункции и патологические состояния любой нозологии отражаются на эффективности системы обеспечения тканей и органов кислородом, осуществления газообмена. При этом возникает трудность в определении порогов предкризисных состояний и резервов регуляторных систем с учетом индивидуальных особенностей пациента. В связи с чем сложно обеспечить точность диагностированного результата без проведения дополнительных и повторных исследований.

В настоящем исследовании предлагается другой подход. При критических состояниях организма в наиболее выраженном варианте отклонений система направлена на регистрацию и реагирование процессов, характерных для танатогенеза (или процесса умирания), – это последовательность структурно-функциональных нарушений, вызванных взаимодействием организма с повреждающими факторами, которая приводит к смерти. Знание основных закономерностей танатогенеза и выявление изменений, запускающих его, необходимы для своевременной адекватной диагностики и коррекции критических состояний, возникающих у больных. Основные варианты танатогенеза включают мозговой, сердечный и лёгочный. Также выделяют печёночный, почечный, коагулопатический и эпинеуральный механизмы. Если имеет место несколько подобных поражений, то это комбинированный танатогенез. Печёночный, почечный, коагулопатический и эпинеуральный механизмы характеризуются, как правило, низкой скоростью протекания процессов. Кроме того, диагностику недостаточности печени, почек и эндокринных органов в настоящее время невозможно осуществить в условиях удаленного (дистанционного) наблюдения пациентов.

Сердечный вариант танатогенеза может развиваться при ишемической болезни сердца, кардиомиопатиях, пороках сердца, остром миокардите, аномалиях развития коронарных артерий, синдроме короткого интервала QT, катехоламин-чувствительной полиморфной желудочковой тахикардии, синдроме Бругада, синдроме удлиненного интервала QT, лекарственной проаритмии, кокаиновой интоксикации, выраженном электролитном дисбалансе, идиопатической желудочковой тахикардии, амилоидозе, опухолях сердца и пр. Ключевыми параметрами гемодинамики, подлежащими мониторингованию, являются: ЭКГ (частота сердечных сокращений (ЧСС), пульс), систолическое и диастолическое давление, определение степени насыщения тканей кислородом; дополнительными параметрами – общее периферическое сопротивление сосудов, пульсовое артериальное давление, поверхностная температура тела. Кроме указанных крайних степеней патологических изменений, нарушения гемодинамики встречаются при многочисленных заболеваниях и симптомах: наджелудочковой тахикардии, частой желудочковой и предсердной экстрасистолии и прочих нарушениях проводимости, гипертрофии миокарда левого желудочка, диагностируемых посредством указанных показателей.

Лёгочный механизм смерти (первичная остановка дыхания) встречается значительно реже сердечного механизма: при истинном утоплении, крупозной пневмонии, острой постгеморрагической анемии, остром респираторном дистресс-синдроме и др. Параметрами для удаленного мониторингования являются частота и характер дыхания, степень насыщения крови кислородом.

Мозговой механизм смерти подразумевает повреждение или поражение структур центральной нервной системы (острые нарушения мозгового кровообращения, травмы), интоксикацию, что проявляется, прежде всего, в нарушении сознания. Удаленное мониторингование может осуществляться проверкой уровня сознания вербальными и невербальными методами, фактом быстрого изменения положения тела в сочетании с проверкой уровня сознания. Таким образом, для целей дистанционного мониторингования пациентов наиболее предпочтительным является контроль сердечно-сосудистой и лёгочной деятельности.

Алгоритм работы системы дистанционного мониторинга

Существует множество медицинских приложений на основе IoT, разработанных для удаленного мониторинга состояния здоровья пациентов. Алгоритмы функционирования для обеспечения

устойчивости системы дистанционного мониторинга к ошибкам и обеспечения требуемой диагностической достоверности являются избыточными, что приводит к значительному энергопотреблению и сокращению длительности автономной работы носимых блоков, к неэффективному использованию полосы пропускания передачи и возможностей хранения диагностической информации и, как следствие, к снижению быстродействия системы и оперативности разрешения критических ситуаций медперсоналом. Для уменьшения данных издержек и реализации эффективной системы дистанционного мониторинга авторы предлагают строить ее работу на основе принципов:

- контроля и анализа параметров биосигналов, используемых для оценки состояния витальных функций, которые в крайне критических ситуациях отражают процесс танатогенеза;
- выделения основных и дополнительных сигналов и соответственно параметров для анализа;
- организации обратной связи путем формирования запроса к пациенту;
- распределения функций мониторинга на различных уровнях с учетом вычислительных ресурсов системы.

Для обеспечения высокой достоверности регистрируемых параметров и требуемых пользовательских свойств (удобство фиксации датчиков на теле, периодичность контроля и т. д.) применен принцип минимума контролируемых сигналов с достаточной информацией о состоянии пользователя. Контролируемые системой сигналы делятся на два типа: основные и дополнительные. В качестве основных используются сигналы ЭКГ и положения тела, как дополнительные – сигналы насыщения крови кислородом и частота дыхания. Для каждого биосигнала выбираются основные и дополнительные параметры, применяемые соответственно на этапах порогового и нейросетевого распознавания ситуации. При пороговом распознавании для каждого вида сигнала формируются индивидуально несколько допустимых диапазонов значений сигналов по типу «зеленый» (нормальные показатели), «оранжевый» (тревожные), «красный» (критичные).

Для оперативного контроля функционального состояния вычисляются ЧСС на основе анализа кардиограммы и сигнал падения тела. ЧСС определяется при вычислении измеренных значений R-R интервалов. Сигнал падения формируется при обнаружении одновременно некоторых значений ускорения и наличия удара. На рис. 1 представлен концептуальный алгоритм функционирования системы, разработанный на основе приведенных выше принципов.

Регистрация и вычисление параметров основных биомедицинских сигналов (БМС) в носимом блоке (НБ) (рис. 1) выполняются со скоростью, сопоставимой с изменениями контролируемых физиологических процессов пациента. Если анализируемый параметр находится в «зеленой» зоне, то система реагирует пассивно: с требуемой периодичностью информация пересылается в медицинский сервер (МС) хранения и обработки данных. Частота периодичности регистрации БМС намного выше частоты периодичности передачи информации. Соответственно объем информации, считываемой датчиками-сенсорами, существенно больше объема информации, передаваемой на сервер. Это позволяет уменьшить требования к скорости обмена данными между различными уровнями в системе мониторинга и минимизировать объем диагностической информации, хранимой в МС.

При увеличении пороговых значений параметров основных биосигналов выполняются распознавание степени критичности ситуации и определение уровня тревоги; для этого регистрируются и вычисляются параметры дополнительных (коррелирующих) сигналов. Выделяется несколько уровней тревог:

- запись в досье в медицинском сервере;
- связь с доверенным лицом;
- связь с врачом/кол-центром;
- вызов срочной медицинской помощи;
- связь с милицией.

Алгоритм предусматривает также организацию обратной связи: при необходимости в автоматическом режиме формируются запросы пациенту, с учетом ответа на которые (или при отсутствии ответа) система корректирует уровень тревоги. Предлагается использовать два вида запроса: запрос на ввод вспомогательной информации (например, данные об артериальном давлении, уровне глюкозы и т. д.) и запрос, предполагающий ответ пользователя типа «да-нет». Это позволяет уточнить обрабатываемую информацию, а в ряде случаев исключить ложные или ошибочные срабатывания сенсоров. Например, вероятность определения падения современными датчи-

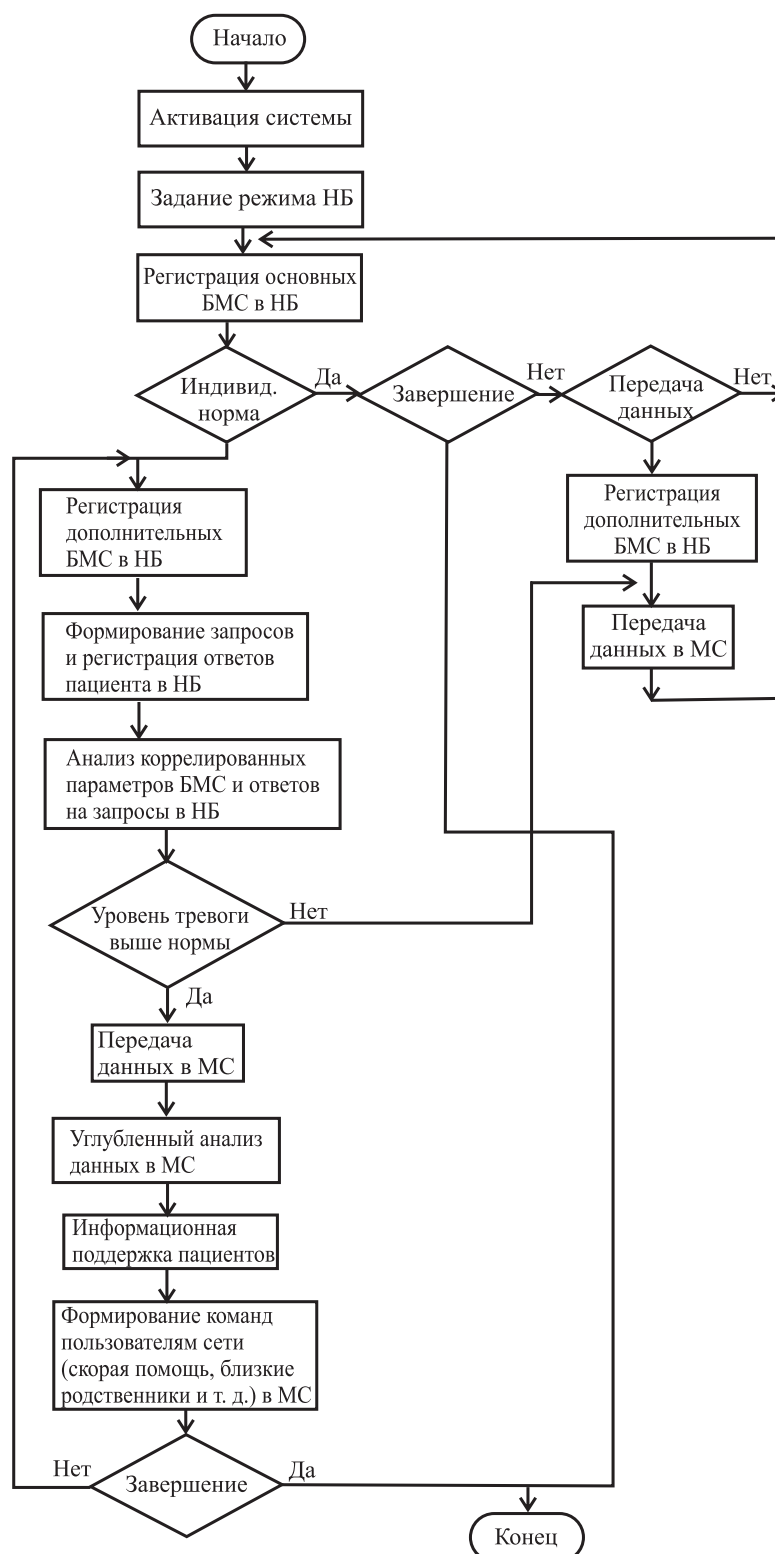


Рис. 1. Концептуальный алгоритм функционирования системы
Fig. 1. A conceptual algorithm of the system functioning

ками составляет около 85 %. При срабатывании датчика падения и в случае нормы параметров ЭКГ уточнение может быть осуществлено посредством запроса пользователю. Отсутствие ответа либо отрицательный ответ являются подтверждением ошибочного срабатывания датчика падения. Аналогичные запросы могут быть сформированы медицинским сервером. Информация о ложных срабатываниях регистрируется наряду с информацией о БМС в медицинском сервере.

В случае превышения пороговых значений или перехода из одной области значений в другую информация об этом пересылается в МС медицинского центра. В центре осуществляются хранение и обработка данных, принятие решений в экстренных ситуациях и выработка оптимального протокола лечения на основе анализа данных за предыдущий период.

Важная задача при проектировании систем дистанционного мониторинга – распределение функций мониторинга по уровням системы. В предлагаемой системе в мобильном блоке реализуются:

- регистрация основных и при необходимости дополнительных БМС, формирование запроса пользователю;
- распознавание тревожной ситуации на основе анализа основных параметров исследуемых сигналов и ответов на запросы;
- формирование и передача данных о состоянии пользователя в медицинский сервер для текущего мониторинга состояния и в случае выявленной тревожной ситуации;
- прием и индикация команд или рекомендаций пользователю из медицинского сервера.

В медицинском сервере реализуются:

- хранение данных БМС, их углубленный анализ на основе предыдущих историй с использованием в том числе программ машинного обучения для определения динамики заболевания, выбора оптимального протокола лечения и т. д.;
- при поступлении информации о тревожной ситуации уточнение (детализация) ее с помощью специализированных программ и формирование команд и рекомендаций пользователю и другим участникам сети (медперсоналу, скорой помощи, родственникам и т. д.).

Таким образом, согласование вычислительных ресурсов, имеющихся на различных уровнях системы, со степенью сложности выполняемых функций обеспечивает повышение энергоэффективности и производительности систем мониторинга.

Заключение

Рассмотрены вопросы разработки методик и алгоритмов индивидуальной дистанционной диагностики на основе механизмов танатогенеза применительно к технологии интернета вещей. Обосновано использование в качестве основных сигналов, постоянно контролируемых системой, сигналов ЭКГ и положения тела, в качестве дополнительных – сигналов насыщения крови кислородом и частоты дыхания. Отличительной особенностью предлагаемого алгоритма является наличие обратной связи, реализованной в виде запроса пациенту, формируемой мобильным блоком. Предложенное разделение исследуемых биомедицинских сигналов на основные и дополнительные, выделение основных признаков экстренной ситуации в мобильном блоке, детализирование и принятие решений в медицинском компьютерном центре позволят создать систему индивидуального врачебного мониторинга, работающую в реальном масштабе времени, характеризующуюся высокой достоверностью диагностирования, простотой реализации и удобством эксплуатации.

References

1. Fox S. (2013) The Self-Tracking Data Explosion. *Pew Research Center*. <https://www.pewresearch.org/internet/2013/06/04/the-self-tracking-data-explosion/>.
2. Sharon T. (2016) Self-Tracking for Health and the Quantified Self: Re-Articulating Autonomy, Solidarity, and Authenticity in an Age of Personalized Healthcare. *Philos Technol.* 30 (1), 93–121. doi: 10.1007/s13347-016-0215-5. <http://www.jbc.org/cgi/pmidlookup?view=long&pmid=5441>.
3. Fratt L. (2013) Medical Device Integration: a Look Past the EHR. *Innovate HealthCare. HealthExec.* <https://healthexec.com/topics/patient-care/digital-transformation/medical-device-integration-look-past-ehr>.
4. Dinh-Le C., Chuang R., Chokshi S., Mann D. (2019) Wearable Health Technology and Electronic Health Record Integration: Scoping Review and Future Directions. *JMIR Mhealth Uhealth.* 7 (9). doi: 10.2196/12861. PMID: 31512582; PMCID: PMC6746089.
5. Ullah S., Khan P., Ullah N., Saleem S., Higgins H., Kwak K. S. (2009) A Review of Wireless Body Area Networks for Medical Applications. *International Journal of Communications, Network and System Sciences.* 2 (8), 797–803.
6. Mahmoud N., El-Sappagh Sh., Abdelrazek S. M., El-Bakry H. M. (2020) A Real-time Framework for Patient Monitoring Systems Based on a Wireless Body Area Network. *International Journal of Computer Applications.* 12–21.

7. Fuller D., Colwell E., Low J., Orychock K., Tobin M. A., Simango B., Buote R., Van Heerden D., Luan H., Cullen K., Slade L., Taylor N. G. A. (2020) Reliability and Validity of Commercially Available Wearable Devices for Measuring Steps, Energy Expenditure, and Heart Rate: Systematic Review. *JMIR Mhealth Uhealth*. 8 (9). doi: 10.2196/18694. PMID: 32897239; PMCID: PMC7509623.
8. Md. Milon Islam, Ashikur Rahaman, Md. Rashedul Islam (2020) Development of Smart Healthcare Monitoring System in IoT Environment. *SN Computer Science*. (1), 185. <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00195-y>.
9. Niknejad N., Ismail W. B., Mardani A., Liao H., Ghani I. (2020) A Comprehensive Overview of Smart Wearables: the State of the Art Literature, Recent Advances, and Future Challenges. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. (90), 103529. doi: 10.1016/j.engappai.2020.103529.
10. Lu L., Zhang J., Xie Y., Gao F., Xu S., Wu X., Ye Z. (2020) Wearable Health Devices in Health Care: Narrative Systematic Review. *JMIR Mhealth Uhealth*. 9 (8). doi: 10.2196/18907. PMID: 33164904; PMCID: PMC7683248.
11. Imran, Iqbal N., Ahmad S., Kim D. H. (2021) *Health Monitoring System for Elderly Patients Using Intelligent Task Mapping Mechanism in Closed Loop Healthcare Environment*. 357. <https://doi.org/10.3390/sym13020357>.
12. Avrajit Ghosh, Arnab Raha, Amitava Mukherjee (2020) *Energy-Efficient IoT-Health Monitoring System using Approximate Computing*. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100166>.
13. Bikash Pradhan, Saugat Bhattacharyya, Kunal Pal (2021) IoT-Based Applications in Healthcare Devices. *Journal of Healthcare Engineering*. 18. <https://doi.org/10.1155/2021/6632599/>.

Вклад авторов

Осипов А. Н. разработал алгоритм работы системы дистанционного мониторинга человека.
Пацеев А. В. обосновал (врачебную) методику дистанционного мониторинга на основе тана-тогенеза.

Пацеев С. В. провел анализ известных методик и алгоритмов работы систем дистанционного мониторинга и предложил двухэтапный алгоритм.

Authors' contribution

Osipov A. N. has developed an algorithm for the operation of a remote human monitoring system.

Patseev A. V. has justified (medical) remote monitoring techniques based on thanatogenesis.

Patseev S. V. has analyzed the well-known methods and algorithms of remote monitoring systems and proposed a two-stage algorithm.

Сведения об авторах

Осипов А. Н., к. т. н., доцент, начальник Центра междисциплинарных исследований «Центр плазменного и биомедицинского инжиниринга» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Пацеев А. В., главный врач Республиканского центра медицинской реабилитации и бальнеолечения

Пацеев С. В., врач 1-й городской клинической больницы

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Осипов Анатолий Николаевич

Information about the authors

Osipov A. N., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Center for Interdisciplinary Researches "Center for Plasma and Biomedical Engineering" of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Patseev A. V., Chief Physician of the Republican Center for Medical Rehabilitation and Balne Treatment

Patseev S. V., Doctor at the 1st City Clinical Hospital

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-41
E-mail: osipov@bsuir.by
Osipov Anatoly Nikolaevich