

Д.К. ЛЕВОНЕВСКИЙ, А.И. МОТИЕНКО, А.В. БОГОМОЛОВ АВТОМАТИЗАЦИЯ КИБЕРФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ В УМНЫХ ПАЛАТАХ

Левоневский Д.К., Мотиенко А.И., Богомолов А.В. Автоматизация киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах.

Аннотация. Цифровизация здравоохранения предполагает широкое внедрение технологий информатизации и автоматизации процессов мониторинга состояния человека, ориентированных на сохранение, укрепление и восстановление его здоровья. Для адаптации существующих решений в области электронного здравоохранения к медицинской инфраструктуре выполнено моделирование расширяемых программных компонентов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах. Представлена математическая модель процессов киберфизического мониторинга состояния пациента, описывающая медицинский алгоритм как эстафету с альтернативными маршрутами с помощью аппарата параллельных полумарковских процессов. Охарактеризованы особенности программных компонентов киберфизического мониторинга состояния пациента как гибкого, расширяемого интегрируемого элемента умной медицинской палаты, позволяющего персонифицировать и оптимизировать лечебно-диагностические процедуры с помощью целевой функции, характеризующей отклонение показателей текущего состояния пациента от показателей его целевого состояния. Продемонстрированы потенциальные возможности автоматизации медицинских процессов при реализации методик диагностики и рискометрии здоровья, основанных на использовании балльных шкал. Результаты моделирования показали, что использование программных компонентов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах позволяет не только ускорить расчёты, но и сократить время получения данных благодаря их автоматической загрузке из информационных систем и автоматизированному снятию показателей с медицинских устройств, открывая новые возможности персонифицированного управления оказанием стационарной медицинской помощи.

Ключевые слова: информатизация здравоохранения, медицинская информатика, автоматизация мониторинга состояния, умная палата, киберфизическая система, программный компонент, киберфизический мониторинг.

1. Введение. Здоровье человека характеризуется множеством показателей, отражающих активность функциональных систем организма. Это обуславливает насущную необходимость мониторинга здоровья, глубина которого (количество показателей и дискретность их мониторинга) определяется спецификой решаемых прикладных задач здравоохранения [1, 2]. В настоящее время наиболее часто применяется дистанционный мониторинг состояния здоровья и окружающей среды человека – разновидность телемедицинских технологий, позволяющая отслеживать во времени выбранные показатели здоровья человека и показатели окружающей среды, накапливать эти данные в цифровом виде и передавать их для анализа

врачу или медицинскому персоналу, чтобы реализовать персонифицированное управление здоровьем [3 – 5].

Автоматизация процессов мониторинга здоровья – это использование технологий и систем для сбора, анализа и интерпретации данных о состоянии здоровья человека без необходимости постоянного вмешательства медицинских специалистов [2]. Она использует широкий спектр устройств: от носимых и бесконтактных до мобильных приложений типа «лаборатория на чипе» и систем телемедицины. Применение интеллектуальных медицинских технологий сбора и обработки данных о состоянии человека, выработки предварительных результатов и рекомендаций с помощью систем поддержки принятия решений, включая технологии искусственного интеллекта, позволяет эффективно решать задачи персонифицированного управления здоровьем [6]. Кроме того, большие языковые модели, такие как ChatGPT, Deepseek и подобные им, могут быть использованы для интерпретации медицинских данных, генерации персонализированных рекомендаций и общения с пациентами в понятной для них форме.

В настоящее время мониторинг здоровья осуществляется с помощью технологий киберфизических систем, реализующих интеграцию вычислительных ресурсов в инженерно-технические системы [7, 8]. Вычислительная компонента любой киберфизической системы распределена по всей системе и синергетически увязана с составляющими ее элементами, которые взаимодействуют, самонастраиваются и адаптируются к изменениям с помощью типовых программных интернет-протоколов. Поэтому к приоритетным задачам относятся диагностика и прогнозирование состояния пациентов с помощью расширяемых программных компонентов автоматизированного киберфизического мониторинга. Решение подобных задач имеет особое значение в стационарных условиях, поскольку здесь пациенты зачастую находятся в более тяжёлом состоянии, а количество мониторируемых показателей и частота их мониторинга существенно больше, чем в других условиях.

Одним из приоритетов совершенствования технологий оказания медицинской помощи в стационарных условиях является создание умных медицинских палат – медицинских киберфизических систем, интегрирующих передовые технологии сбора и анализа данных, информатизации и автоматизации процессов лечения, повышения безопасности пациентов и оптимизации рабочего процесса медицинского персонала. Умные палаты объединяют ряд инновационных инструментов: носимые и бесконтактные устройства,

датчики и сенсоры мониторинга состояния пациента и микроклимата в палате; электронные медицинские карты и цифровые аптеки; инструменты автоматизированного предоставления медицинским работникам полной и актуальной информации о пациентах в реальном времени и т.п. Объединяемые инструменты связаны между собой посредством различных программных интерфейсов и протоколов, таких как интерфейсы прикладного программирования (API), функционирующие по протоколу TCP/IP, протоколы Интернета вещей (IoT), специальные медицинские протоколы типа HL7 и т.д. Данные, поступающие от этих компонентов, интегрируются и анализируются для решения задач здравоохранения и медицины [9].

Целью проведенного исследования было изучение возможностей автоматизации киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах, реализуемого в виде концептов мобильных приложений с использованием облачных технологий для выполнения обработки данных.

2. Обзор мобильных медицинских приложений. Цифровое здравоохранение активно развивается в последние годы и охватывает такие направления, как электронное здравоохранение, мобильное здравоохранение, телемедицина и данные здравоохранения [3, 5]. e-Health (электронное здравоохранение) представляет собой использование информационных и коммуникационных технологий в сфере здравоохранения. Оно охватывает широкий спектр услуг, включая электронные медицинские записи, телемедицину, дистанционный мониторинг, системы поддержки принятия клинических решений и платформы для управления состоянием здоровья. Главные цели e-Health – улучшение качества медицинского обслуживания, повышение доступности услуг и оптимизация процессов в здравоохранении.

m-Health (mobile health; мобильное здравоохранение) – отрасль электронного здравоохранения e-Health, использующая мобильные технологии и устройства, а также беспроводные технологии передачи данных для улучшения здравоохранения и медицинских услуг (мониторинг, профилактика заболеваний, диагностика и пр.). m-Health включает в себя приложения для смартфонов, носимые устройства, телемедицину и системы мониторинга состояния здоровья. Это направление помогает в управлении заболеваниями, повышении доступа к медицинской помощи, а также в сборе и анализе данных о здоровье. Под управлением заболеваниями понимается способность человека с хроническими заболеваниями управлять симптомами, лечением, физическими и социальными последствиями, а также

изменениями в образе жизни для снижения числа обострений, осложнений, потребности в стационарной и скорой медицинской помощи. В настоящее время существует большое количество решений в этой области.

Исследователи во Франции разработали онлайн-инструмент для выявления потенциальных рецидивов рака легких на основе отчетов пациентов [7, 8]. Пациентов с раком легких просили оценивать свои симптомы (например, усталость, боль или изменения веса) с помощью короткой онлайн-формы каждую неделю. Алгоритм обрабатывает баллы симптомов и автоматически отправляет электронное письмо онкологу пациента, когда эти баллы указывают на потенциальный рецидив. Этот процесс позволяет онкологам предпринимать немедленные действия (например, контрольные звонки или визуализационные тесты) при первых признаках рецидива [10]. В конечном итоге алгоритм был встроен в веб-приложение Moovcare®.

Исследование [11] ориентировано на систематический поиск и выявление мобильных приложений, способных решать некоторые задачи врачей общей практики. В процессе исследования авторы выделили 12 задач, 9 из которых могут быть потенциально реализованы средствами mHealth. Охарактеризуем возможности решения этих задач с помощью существующих мобильных приложений, упоминаемых в работах [7 – 11].

1. Применение структурированного подхода к сбору и исследованию данных.

Приложение Ada – анализирует симптомы и предоставляет персонализированную информацию о состоянии здоровья на основании медицинского словаря, включающего симптомы и синдромы тысяч расстройств и заболеваний. Пользователь получает индивидуальный отчет об оценке, в котором описываются риски здоровью и дальнейшие действия по их минимизации. Ключевой момент состоит в том, что приложение Ada не может поставить медицинский диагноз и не заменяет консультацию врача.

Приложение HealthDiary: Medical History помогает пользователям составлять персональную историю болезни перед посещением врача, таким образом, устраняя необходимость сбора этих данных медицинским специалистом.

2. Точная интерпретация результатов для постановки диагноза.

Приложение Doctor Diagnose Symptoms Check предназначено для информирования и повышения осведомленности пациентов об их состояниях (может помочь с анализом симптомов и диагностикой).

Приложение GB Diagnosis Medical App определяет предполагаемый диагноз на основе взаимодействия и ответов пользователей (предлагает смоделированный разговор между врачом и пациентом для сбора симптомов и индивидуальной информации для постановки диагноза): за четыре шага после ввода симптомов заболевания приложение предлагает наиболее вероятный медицинский диагноз или рейтинговый список вероятных диагнозов.

Приложение My diagnostic направлено на идентификацию заболеваний в базе данных на основе симптомов, введенных пользователями.

Приложение Rapid diagnosis-mental health предназначено для помощи в диагностике психических, эмоциональных или психологических состояний, которые можно дифференцировать на основе симптомов.

Приложение Symptomate – Symptom checker предоставляет оценку здоровья пользователя (указывает возможные причины симптомов, варианты лечения и предлагаемые лабораторные анализы), анализируя тысячи симптомов и связывая их с несколькими заболеваниями или физиологическими состояниями, выбирая ограниченное количество из сотен возможных. Symptomate подходит для предварительной оценки выраженности симптомов как у детей, так и у взрослых. Сервис не ставит диагноз.

Приложение WebMD предлагает проверенную врачом информацию о состоянии здоровья и интерактивные инструменты формирования перечня возможных диагнозов на основе основного симптома и краткий набор общих вопросов (данные анамнеза, принимаемые в настоящее время лекарства, характеристики качества жизни и т.п.).

Также в список входит приложение Ada, описанное выше в п. 1.

3. Демонстрация квалифицированного подхода к клиническому обследованию.

Приложение Runtastic Heart Rate используется для мониторинга частоты сердечных сокращений методом фотоплетизмографии (необходимо приложить палец к камере смартфона, после чего его «просвечивает» вспышка).

Приложение SkinVision проверяет наличие признаков рака кожи, используя камеру телефона для захвата изображения кожного поражения и оценки риска рака кожи у пользователя: пациент может сфотографировать пятна на коже и в течение 30 с получить информацию о риске рака кожи с рекомендациями, в том числе о необходимости посещения врача.

4. Демонстрация профессионального подхода к выполнению процедур (не решается с помощью приложений mHealth).

5. Внедрение соответствующих принципов принятия решений.

Приложение Gout Decision Aid предоставляет информацию пациентам с подагрой (может функционировать как инструмент, помогающий пользователю участвовать в принятии решений).

6. Принятие структурированного подхода к клиническому менеджменту.

Приложение Rapid diagnosis-mental health, описанное выше.

7. Использование надлежащим образом других специалистов и услуг (не решается с помощью приложений mHealth).

8. Оказание неотложной помощи.

Приложение Google Assistant предоставляет информационную поддержку пользователям в использовании функций телефона и при поиске информации в Интернете (в том числе, может предоставлять информацию о неотложных и экстренных состояниях и может направлять пользователей в ближайшее медицинское учреждение).

Приложение Siri работает на платформе iOS (устройства Apple) и функционирует как виртуальный помощник (с предоставлением информации о неотложных и экстренных состояниях и направлением пользователей в ближайшее медицинское учреждение).

9. Обеспечение возможности людям с хроническими заболеваниями улучшить свое здоровье.

Приложение Asthma Manager используется для наблюдения за астмой (может помочь отслеживать симптомы и управлять приемом лекарств). В настоящее время приложение интегрируется с приложением Health для iOS.

Приложение Blood Pressure Companion предназначено для мониторинга артериального давления (может регистрировать и анализировать артериальное давление, а также создавать графики, диаграммы и таблицы результатов).

Приложение mySugr – Diabetes Tracker Log представляет собой журнал самоконтроля при сахарном диабете 1-го, 2-го типа и гестационного сахарного диабета (может регистрировать и анализировать параметры заболевания, а также предоставлять обратную связь).

Приложение forDiabetes: diabetes selfmanagement app предназначено для управления диабетом (может отслеживать и контролировать основные данные по диабету, включая уровень

глюкозы в крови, HbA1c (гемоглобин A1c), артериальное давление и прием лекарств).

Приложение Pill Reminder and Medication Tracker by Medisafe используется для напоминания и контроля приёма лекарственных препаратов (напоминает пользователям о необходимости приёма и создаст ежедневные и ежемесячные отчеты о его соблюдении).

10. Управление сопутствующими проблемами со здоровьем у отдельного пациента.

Приложения Asthma Manager, Blood Pressure Companion, mySugr, forDiabetes: diabetes selfmanagement app, Pill Reminder and Medication Tracker by Medisafe.

11. Координация командного подхода к уходу за пациентами (не решается с помощью приложений mHealth).

12. Поддержка людей с учётом их индивидуального опыта в сфере здоровья, болезни и восстановления.

Приложение Appibuddy представляет собой платформу для здорового образа жизни (позволяет пользователям записывать поведение в отношении здоровья и предоставляет платформу, на которой они могут делиться своими действиями и учиться у других пользователей).

Приложение BECCA – Breast Cancer Support направлено на поддержку и помощь пользователям в полноценной жизни после рака груди (предоставляет советы по здоровью, информацию и записи в блогах, чтобы помочь пациентам обеспечить высокое качество жизни после лечения рака).

Приложение Food (lg) представляет собой пищевой журнал, а также трекер и анализатор питания (может анализировать рацион и калории по результатам обработки фотографий еды).

Приложение HealthHub: Track and Improve направлено на достижение индивидуальных целей в отношении здоровья с помощью инструментов, планов действий и руководств по здоровому образу жизни (может фиксировать поведение в отношении здоровья и формировать индивидуальные планы действий пользователя на основе его целей).

Приложение HealthWatch направлено на предоставление практических инструментов для поддержания и улучшения здоровья и качества жизни, а также снижения рисков стресс-индуцированных заболеваний (обеспечивает обучение пациентов, включая регистрацию уровня стресса и предоставляя обратную связь по его коррекции).

Приложение Healthy365 способствует ведению здорового образа жизни (позволяет пользователям отслеживать ежедневные шаги и рассчитывать количество сожженных калорий).

Приложение The circle of health направлено на укрепление здоровья сердечно-сосудистой системы (может измерять и оценивать показатели здоровья сердечно-сосудистой системы и мотивировать пользователей поддерживать здоровый образ жизни).

Большинство названных приложений не могут заменить консультацию врача общей практики и подходят только для сбора анамнеза, предоставления первичной информации и рекомендаций, связанных со здоровьем. Другие компетенции врачей общей практики включают личные качества, практические навыки и гибкие навыки, которые приложения mHealth в настоящее время заменить не могут. Тем не менее, приложения mHealth могут поддерживать врачей общей практики с точки зрения обучения и рекомендаций.

В работе [12] представлены результаты контент-анализа описаний, функций и отзывов пользователей для 168 приложений, доступных в коммерческих цифровых магазинах, которые предназначены для медицинских работников и студентов. Особое внимание уделено мобильным приложениям, включающим искусственный интеллект, помогающий принимать диагностические решения. В исследовании приложения классифицированы по девяти категориям на основе их содержания и полезности: большинство (28%) приложений были «Справочниками/руководствами», которые в основном использовались студентами-медиками для подготовки к сдаче экзаменов, и «Инструментами для дифференциальной диагностики» (20,8%), применяемыми врачами при решении задач клинической дифференциальной диагностики.

Классификация приложений на основе использования искусственного интеллекта (17 приложений) определила «Калькуляторы» и «Инструменты для управления пациентами» как наиболее популярные типы приложений искусственного интеллекта, предлагающие диагностические возможности и оптимизацию лечения, а также минимизирующие время клинических испытаний и стоимость лечения [13].

Авторы работы [14] предлагают систему голосового управления для взаимодействия с оборудованием в умной палате, что повышает качество и удобство оказания медицинской помощи [15 – 17]. Система голосового управления подходит для всех пациентов и особенно эффективна для послеоперационных и инвалидов [18]. Пациенты

могут лежать на кровати и управлять оборудованием, произнося команды для мобильных устройств.

В [19] представлена инновационная интеллектуальная система ухода за пациентами. Ее основная функция заключается в уведомлении медсестер о том, что пациенту нужна помощь. В этой системе все сигналы могут передаваться на мобильные телефоны медсестер, тем самым обеспечивая немедленную связь и трехэтапное оповещение об уходе с постели, поскольку падения пациентов представляют собой серьезную проблему, а их предотвращение является одной из важнейших ожидаемых функций системы ухода [20, 21].

Авторы [22] предлагают систему контроля уровня жидкости в капельницах для внутривенного вливания, которая может использоваться в отделениях интенсивной терапии и послеоперационных отделениях. Система обмена сообщениями на основе GSM используется для оповещения персонала о необходимости замены флакона. Для измерения веса жидкости используется тензодатчик, а микроконтроллер считывает данные и отправляет их в модуль GSM [23]. Уровень жидкости во флаконе отображается в режиме реального времени в приложении Android. На дисплее показывается соответствующий процент жидкости, оставшейся во флаконе, и, когда уровень опускается ниже 100 мл, появляется предупреждение и повторно отправляется SMS-сообщение обслуживающему персоналу с периодом в 10 секунд до тех пор, пока система не будет отключена, и одновременно раздается звуковой сигнал. Кроме того, группа медицинских работников может контролировать уровень жидкости в режиме реального времени на своем рабочем месте с помощью модуля IoT. В случае, если обслуживающий персонал не может немедленно добраться до пациента по тревоге, отток жидкости автоматически блокируется электромагнитным клапаном.

В исследовании [24] рассматривается система локализации пациента. Достижения в технологиях локализации без устройств (DFL), основанных на методах мягких вычислений и позволяющих определять местоположение целей, не несущих никакого оборудования, в сочетании с технологиями машинного обучения, сделали локализацию более точной. Авторы используют сигналы Wi-Fi в отделениях и осуществляют локализацию пациента, сохраняя конфиденциальность, применяя многомасштабные сверточные нейронные сети (CNN) и модели долгосрочного/краткосрочного запоминающего устройства (LSTM). Результаты демонстрируют

высокую точность локализации. Кроме того, система допускает масштабирование для обнаружения чрезвычайных ситуаций, требующих быстрого реагирования медицинского персонала.

В работах [25] предлагается мобильное приложение для диагностики, стратификации и подбора лечения для пациентов с синдромом пароксизмальной симпатической гиперактивности (ПСГА). Приложение опирается на медицинские методики, основанные на шкалах. Несмотря на то, что эта разработка решает частную задачу, она имеет потенциал для развития, так как обладает гибкостью для внедрения шкал тяжести и прогноза развития различных заболеваний и строится как интегрируемый компонент умной медицинской палаты, направленный на автоматизацию киберфизического мониторинга состояния пациентов.

Интеллектуальные приложения являются ценными инструментами медицинской диагностики, особенно для определения состояния пациента и реализации его мониторинга – однако они не заменяют медицинских работников и не освобождают от очной консультации врача.

Существующие решения не вполне адаптированы для интеграции с другими компонентами медицинской инфраструктуры, поскольку являются отдельными приложениями или устройствами; также нет расширяемых и гибких решений для диагностики и рискометрии заболеваний по методикам на шкалах, но существуют частные (например, приложение для диагностики ПСГА). В проведенном исследовании предлагается подход к автоматизации киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах, основанный на гибком интегрируемом и расширяемом приложении для мониторинга состояния пациента при наличии некоторых ограничений. Во-первых, предполагается существование детерминированных методик для диагностики и рискометрии состояния здоровья, приводимых к общему виду на основе шкал. Во-вторых, подобные решения не ставят целью замену медицинского персонала, что невозможно как по профессиональным, так и по юридическим причинам, а только частичную автоматизацию медицинских услуг и, как следствие, повышение их эффективности и качества.

3. Материалы и методы исследования. Проводимое исследование направлено на устранение противоречия между потенциальными возможностями киберфизических систем, определяемыми уровнем научно-технического прогресса, и отсутствием инструментария исследования автоматизации

киберфизического мониторинга состояния здоровья пациентов в умных палатах. Математическая формулировка решаемой задачи может быть представлена как формирование и реализация управляющих воздействий для i -го пациента (U_i) так, чтобы:

$$U_i \rightarrow \min_{\substack{t \rightarrow \min \\ r \rightarrow \min}} (X_i(t, r) - X_i^C(t, r)),$$

где X_i – текущее состояние i -го пациента, X_i^C – целевое состояние (индивидуальная норма) i -го пациента, t – время пребывания в стационаре, r – ресурсы медицинской организации. По сути это типовая задача оказания стационарной медицинской помощи, но ее отличительной особенностью является ориентация на применение для формирования и реализации управляющих воздействий U_i технологий киберфизических систем, обеспечивающих дополнительные возможности минимизации величин t и r .

При проведении исследования использовались методы системного анализа (абстрагирование и конкретизация, анализ и синтез, индукция и дедукция, формализация и конкретизация, композиция и декомпозиция, реинжиниринг и алгоритмизация), технологии киберфизических систем, теория вероятностей, теория систем массового обслуживания и теория полумарковских процессов. В отличие от ранее известных, полученные результаты ориентированы на автоматизацию киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах, отличительной особенностью которого является реализация управляющих воздействий, направленных на персонализированную оптимизацию стационарного лечения, основанную на мониторинге динамики показателей состояния.

Решаемая задача, в отличие от классической оптимизационной задачи, учитывает ситуацию параллельного назначения терапевтических процедур врачами различных специализаций. То есть мониторинг состояния пациента и управляющих воздействий (терапевтических процедур) осуществляется территориально распределенно и взаимоувязанно, что обеспечено возможностями киберфизических технологий, вычислительные компоненты которых распределены и синергетически увязаны с составляющими их элементами (датчики состояния пациента, цифровые результаты диагностики и терапии, датчики окружающей среды). Элементы киберфизических систем взаимодействуют, самонастраиваются и адаптируются с помощью программных интернет-протоколов.

4. Сценарий применения расширяемых программных компонентов автоматизированного киберфизического мониторинга здоровья пациентов в умных палатах. Одним из программных компонентов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов, часто применяемых на практике, являются оценочные шкалы, позволяющие анализировать состояние пациентов с представлением результатов в виде количественной оценки, определяющей тяжесть состояния и/или выраженность симптомов или синдромов потенциально опасных состояний. Примерами являются шкала для оценки синдрома ПСГА [25], шкала GRACE для рискометрии летальности и развития инфаркта миокарда [26, 27], шкала комы Глазго [28, 29] и т.п.

Рассмотрим сценарий использования программных компонентов сбора, обработки и анализа информации при автоматизированном киберфизическом мониторинге состояния пациентов с помощью методик, основанных на шкалах. Этот сценарий включает сбор исходных данных (набора показателей жизненно важных функций, симптомов, признаков), выполнение расчётов (например, вычисление оценки каждого показателя в отдельности), расчет интегральной оценки, формирование ее интерпретации и рекомендаций на основе полученных результатов. Реализация типового сценария предполагает:

1. Построение базовой методики оценки состояния пациента, ориентированной на балльную оценку, получаемую с применением шкал.
2. Синтез алгоритмов расчета частных и интегральных оценок.
3. Создание программных компонентов сбора и обработки информации.
4. Проведение валидации и верификации полученных результатов.

Базовая методика описывается кортежем, объединяющим четыре множества:

$$M = \langle I, S, C, R \rangle.$$

Множество I – это набор используемых показателей состояния пациентов, которые разделяются на три группы:

1. Первичные показатели служат исходными данными для расчета оценки. Они могут измеряться (например, пульс, систолическое и диастолическое артериальное давление, температура),

оцениваться (степень покраснения кожи, потливость), загружаться из базы данных приложения или из внешних источников, таких как электронные медицинские карты, медицинские информационные системы (ретроспективные данные). Внесение значений показателей в компьютерное приложение может осуществляться вручную специалистом, автоматически через «умные» устройства (мониторы) или сетевые интерфейсы (при загрузке из баз данных).

2. Промежуточные показатели рассчитываются на основе первичных или других промежуточных показателей. Примерами могут быть локальная оценка гипергидроза в баллах или индекс Кердо, который является функцией артериального давления и пульса. Промежуточные показатели используются для расчёта результирующих.

3. Результирующие показатели используются непосредственно для оценки состояния пациента и принятия врачебного решения. Примерами могут быть сумма баллов по шкале или оценка тяжести симптоматики заболевания.

Множество S – это набор правил, задающих порядок действий для определения значений показателей из множества I . Каждое правило характеризуется набором необходимых и достаточных условий для его применения, приоритетом и непосредственно выполняемым действием. Такие правила разделяются на виды:

1. Правила сбора данных применяются для определения начальных показателей и предусматривают спецификацию источника данных (метода ввода информации). Доступ к источникам данных осуществляется через плагины приложения, детали запроса определяются параметрами (к примеру, для внешней базы данных это может быть SQL-запрос).

2. Правила расчёта применяются для расчёта промежуточных и результирующих показателей. Они определяют зависимость начисления баллов от значений показателей текущего состояния и истории болезни (анамнеза) пациента и могут содержать инструкции типа «прибавить к итоговой оценке 1 балл, если температура превышает 37°C», «прибавить к итоговой оценке 1 балл, если симптом регистрируется повторно».

Множество C – это набор условий, определяющих, требуется ли выполнить то или иное действие или выдать рекомендацию в определенных ситуациях (например, «подать сигнал тревоги, если оценка более 10 баллов», «рекомендовать обратиться к врачу, если оценка более 15 баллов»).

Множество R – это набор действий, результатов и рекомендаций (например, «отправить сообщение врачу», «зафиксировать, что вероятность заболевания высока», «оценить течение заболевания как тяжёлое»).

Реализация изложенной базовой методики оценки состояния пациента, ориентированной на использование балльных шкал, в виде программных компонентов киберфизических систем требует наличия модели данных. Разработанная модель данных в минимальной конфигурации изображена на рисунке 1.

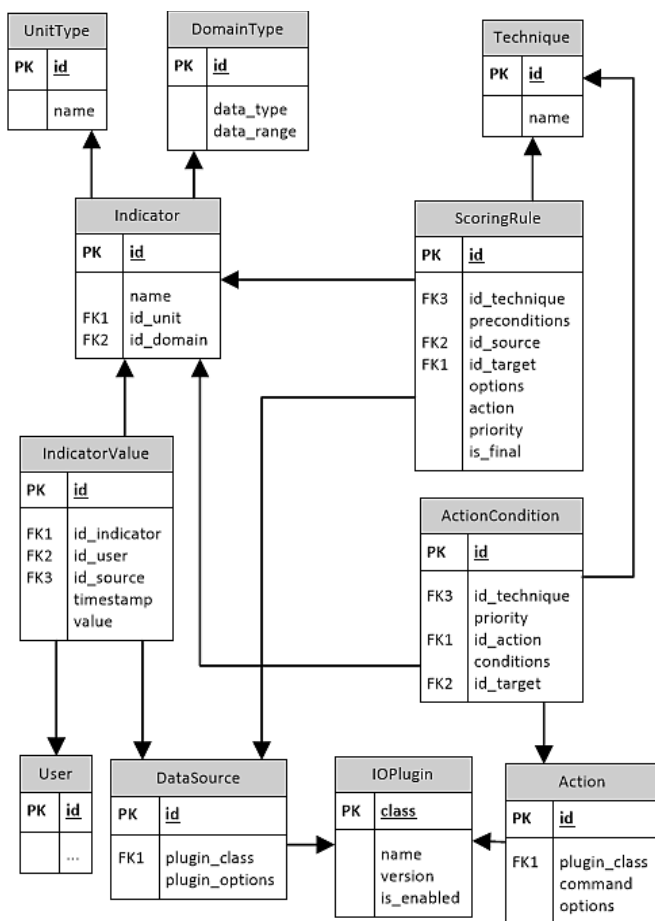


Рис. 1. Модель данных для методики оценки состояния здоровья пациента с применением шкал

В этой модели методика (Technique) непосредственно включает множество правил S (ScoringRule) и условий C (ActionCondition), множества показателей I (Indicator) и действий R (Action) задаются опосредованно. Итоговая оценка также рассматривается как один из показателей здоровья (Indicator). Правила расчёта (ScoringRule) определяются предварительными условиями, приоритетом и операциями, которые представлены математическими выражениями. Например, сложение баллов в зависимости от температуры по методике, изложенной в [25], описывается набором правил, которые строятся с использованием синтаксиса, подобного языку SQL (таблица 1).

Таблица 1. Пример набора правил ($[I_S]$ и $[I_T]$ означают исходный и целевой показатели соответственно)

Исходный показатель	Целевой показатель	Условие	Операция
[Температура тела] ($^{\circ}\text{C}$)	[Общий балл]	$[I_S] \geq 37 \text{ and } [I_S] < 38$	$[I_T] + 1$
		$[I_S] \geq 38 \text{ and } [I_S] < 39$	$[I_T] + 2$
		$[I_S] \geq 39$	$[I_T] + 3$
[Гипергидроз] (0=нет, 1=лёгкий, 2=умеренный, 3=тяжёлый)	[Общий балл]	True	$[I_T] + [I_S]$

Такая модель, помимо определения индикаторов, правил и действий, позволяет подключать плагины ввода и вывода. Это необходимо с точки зрения интеграции с датчиками, модулями умных помещений, базами данных и другими внешними системами и позволяет использовать приложение не только как отдельный модуль, но и как интегрированный компонент инфраструктуры умных медицинских палат. Основные типы входных плагинов:

1. Нет (по умолчанию): требуется ручной ввод данных.
2. Плагин расчета: значение индикатора определяется как производная от других индикаторов. Примером может служить индекс Кердо, который рассчитывается на основе пульса и артериального давления.
3. Плагины для подключения к датчикам: реализуют автоматический ввод данных из различных измерительных приборов.
4. Плагины для баз данных: реализуют сбор данных из внешних источников (баз данных и медицинских информационных систем).

Основные типы плагинов вывода:

1. Нет (по умолчанию): данные отображаются на экране пользовательского устройства.
2. Плагины для баз данных: передают данные во внешние источники (базы данных и медицинские информационные системы).
3. Плагины для отправки сообщений (например, по электронной почте).

Алгоритм оценки состояния пациента с использованием построенной модели данных представлен на рисунке 2.

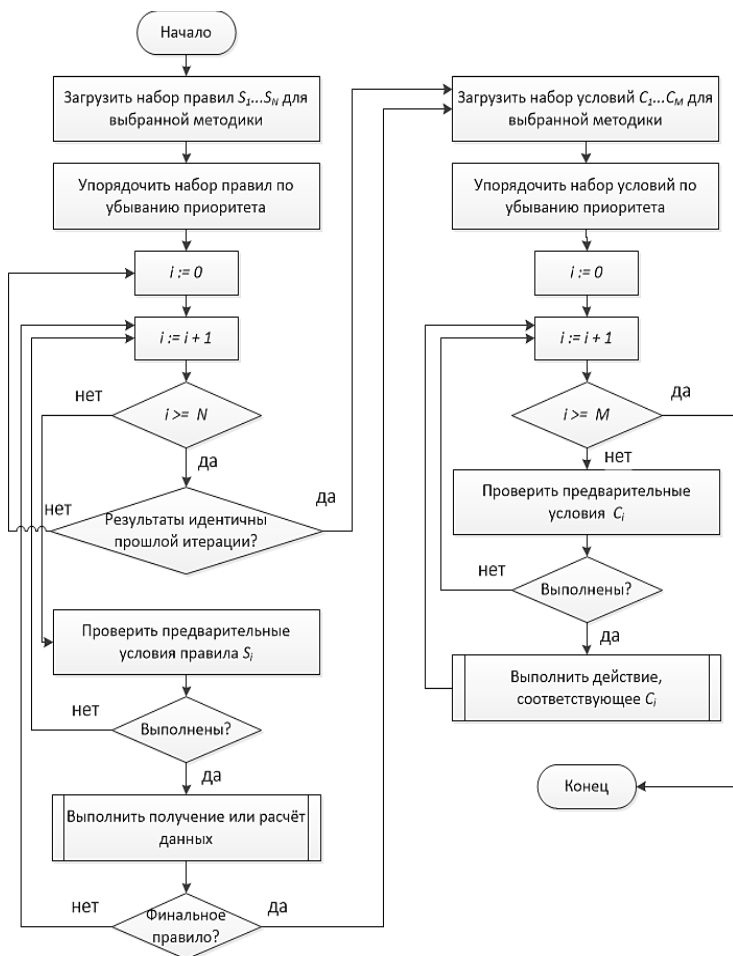


Рис. 2. Алгоритм оценки состояния пациента

Подпроцессы алгоритма связаны с операциями, которые выполняются через плагины программных компонентов киберфизического мониторинга здоровья (в частном случае, мобильного приложения) – сбор данных, обработка данных и вывод результатов.

Ввод данных и подключение плагинов производится на базе типового программного компонента автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах по сбору и обработке данных. Прототип такого программного компонента рассмотрен в работе [25]. Этот прототип разработан в виде мобильного приложения, написанного в среде Android Studio Electric Eel 2022.1.1 на языке Dart с использованием кроссплатформенного фреймворка Flutter, поэтому возможно выполнение сборки для различных типов хостинговых устройств и операционных систем. Серверная часть приложения реализована с применением стандартного стека LAMP (Linux, Apache, MySQL, PHP). Взаимодействие между клиентом и сервером выполняется с помощью библиотеки http, входящей в Dart. Тестирование приложения выполнялось на планшетном компьютере Samsung Galaxy Tab A7 Lite с операционной системой Android 11.

Учитывая вышеизложенные вспомогательные модели и концепции, результирующий метод создания программного компонента автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах состоит из следующих шагов:

1. Определить исходные данные: показатели; правила расчета; правила получения результатов.
2. Определить необходимые входные плагины для каждого индикатора, при необходимости их разработать.
3. Определить необходимые плагины для вывода данных, при необходимости их разработать.
4. Собрать типовый программный компонент (приложение) с подключенными плагинами для необходимой платформы.
5. Установить приложение.
6. Наполнить базу данных приложения информацией об индикаторах и правилах.

Для анализа эффектов от использования приложения программного компонента автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов выполнено моделирование его применения в умной палате при диагностике состояния пациентов с применением рассмотренных шкал.

5. Моделирование процессов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах. В ходе исследования предложен подход к моделированию процессов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах. Предложенный подход объединяет концепции персонализированного управления лечением, стохастического анализа и моделирования альтернативных маршрутов медицинских алгоритмов. Это, в свою очередь, позволяет реализовать непрерывный мониторинг состояния пациента и, при необходимости, скорректировать стратегию и тактику его лечения в масштабе времени, близком к реальному.

Процесс пребывания пациента в стационаре предполагает выполнение лечебно-диагностических мероприятий, направленных на восстановление, укрепление и сохранение его здоровья. Реализация таких мероприятий осуществляется в соответствии с врачебными предписаниями в виде последовательности воздействий, направленных на улучшение состояния пациента. Осуществление автоматизированного мониторинга состояния пациентов в умных палатах с применением технологий киберфизических систем открывает новые возможности для цифрового здравоохранения [2].

Наличие электронной медицинской карты пациента позволяет автоматически получить множество показателей, описывающих его состояние, интерпретируемое как «индивидуальная норма» [5]. При поступлении на стационарное лечение фиксируется описание начального состояния, которое (так как пациент нуждается в стационарном лечении) отличается от индивидуальной нормы. А цель стационарного лечения определяется как «приведение начального состояния пациента к состоянию индивидуальной нормы за минимальное время с достижением максимально выраженного длительного эффекта».

С учетом индивидуальных особенностей пациентов множества показателей состояния, характеризующих индивидуальную норму для разных пациентов, существенно различаются. И при выявлении у человека новых заболеваний множество показателей его состояния изменяется – как правило, расширяется.

После поступления пациента на стационарное лечение определяется диагноз и медицинский алгоритм, определяющий пошаговый протокол для решения задач врачебной практики. Большинство медицинских алгоритмов являются разветвленными – содержащими главный (описывающий наиболее желательное развитие событий или наиболее легкое и благоприятное течение болезни) и

побочные (описывающие нежелательное развитие событий или менее благоприятное, осложненное течение болезни) пути достижения целевого состояния. Каждый путь предполагает реализацию конвейера мероприятий, под которыми понимаются последовательно осуществляемые медицинские процедуры.

Формирование управляющих воздействий, направленных на персонализированную оптимизацию стационарного лечения, должно основываться на объективной динамике изменения показателей состояния. Для этого реализуется следующий подход:

- при поступлении пациента на стационарное лечение определяют модули разности каждого i -го показателя для начального (xn_i) и целевого состояния (xc_i): $xr_i = |xn_i - xc_i|$;
- все определенные разности делят на планируемый (в сутках) срок стационарного лечения (sl), получая величины: $\Delta_i = xr_i / sl$;
- целевое текущее состояние пациента в каждые сутки стационарного лечения (xt_i) определяется как сумма или разность между каждым показателем на момент поступления пациента и в текущие сутки лечения: $xt_i = xn_i \pm sl \times \Delta_i$ (знак «+» или «-» определяется в зависимости от направленности шкалы изменения показателя).

Разность между рассчитанным xt_i и реально достигнутым xt_i значением каждого показателя состояния определяет «штрафные санкции», которые определяют требуемые, согласно решению врача, изменения в стратегии и тактике стационарного лечения пациента, необходимые для достижения целевого состояния.

Таким образом, медицинский алгоритм можно представить как последовательную кооперацию звеньев роя (набора медицинских процедур и манипуляций), осуществляющего конвейерное взаимодействие, при котором следующее звено роя активизируется после того, как предыдущее звено закончит свою часть работы. На практике рой может действовать как последовательно, так и параллельно (например, пациенту выполняют массаж, и на него действует ранее принятое лекарство) с другими роями, также имеющими конвейерную организацию. Конвейерная организация роев характеризует достижение перехода от начального до целевого состояния пациента в результате стационарного лечения, при этом промежуточные состояния, как правило, определяются в каждые сутки лечения (например, в ходе ежедневных медицинских обходов) [30 – 32].

Для моделирования задач автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах вполне естественно потребовать, чтобы эффективность стационарного лечения оценивалась не только как результат мониторинга состояния пациента при поступлении и при выписке, а на основании ежесуточной динамики изменения состояния пациента. В противном случае нельзя, например, исключить манипуляций, направленных на экстренную медикаментозную нормализацию состояния пациента ради его плановой выписки.

Поскольку в большинстве случаев количество суток планового стационарного лечения известно, закон распределения времени нормализации состояния пациента является ключевым контролируемым параметром. То есть имеется тривиальное решение задачи стационарного лечения – привести начальное состояние пациента к целевому с максимальной скоростью (за минимальное время). Но на практике – вследствие сложности понимания механизмов регуляции гомеостаза и индивидуальных особенностей пациента – такое решение реализуется очень редко. Это приводит к необходимости постоянной коррекции реализуемого медицинского алгоритма, поэтому модель процесса киберфизического мониторинга состояния пациентов должна быть стохастической [33].

Наличие альтернативных стратегий и тактик управления здоровьем создает предпосылки для возникновения игровых ситуаций, в которых можно управлять не только временем стационарного лечения, но и вероятностями (в зависимости от сочетания диагнозов) или периодичностью выбора маршрута медицинского алгоритма. То есть при моделировании расширяемых программных компонентов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов возникает задача анализа эстафет с альтернативными маршрутами [30, 34]. Начальным (стартовым) пунктом эстафеты является начальное состояние пациента (поступление на стационарное лечение), конечным пунктом – состояние пациента при выписке (в идеале – целевое состояние). Схему эстафеты с альтернативными маршрутами можно представить в виде графа, узлы которого представляют собой пункты эстафеты (как правило, сутки стационарного лечения), а дуги графа – альтернативные маршруты реализуемого медицинского алгоритма.

В общем случае в эстафетах участвуют M роев, которые функционируют независимо друг от друга. Рои должны преодолеть расстояние от поступления до выписки пациента за время, не превышающее время планового стационарного лечения. Это

расстояние делится на J этапов (как правило, сутки лечения $J=sI$), а j -й этап m -го роя включает $K(m, j)$ маршрутов. После завершения j -го этапа j -й единицей m -го роя, $(j+1)$ -я единица может выбрать один из $K(m, j)$ возможных маршрутов $(j+1)$ -го этапа. Первые единицы сразу стартуют по одному из возможных маршрутов первого этапа (врачебные назначения при поступлении пациента), а время прохождения маршрутов этапов единицами является случайным, определяется для них индивидуально и описывается плотностью вероятности. После завершения j -го этапа j -м звеном $(j+1)$ -е звено сразу приступает к реализации $(j+1)$ -го этапа. Победой в соревновании роев на конкретном этапе считается достижение показателями текущего состояния пациента значений, не хуже требуемых, а штраф определяется нормированной величиной разности между требуемым и реально достигнутым значением i -го показателя.

С учетом допущений показано, что модель эстафет с несколькими альтернативными маршрутами может быть представлена как M -параллельный полумарковский процесс [30, 31]:

$$\mu = \{A, \mathbf{h}(t)\},$$

где t – время; A – множество состояний; $\mathbf{h}(t)$ – полумарковская матрица;

$$A = \bigcup_{m=1}^M A^m, \quad A^m = \{a_j^m\},$$

$$A^m \cap A^n = \emptyset, \text{ если } m \neq n;$$

где a_0^m – являются исходными, а a_j^m – поглощающими состояниями M -параллельного процесса. Состояния модели можно соотнести с состоянием пациента, а маршруты на графе – с динамикой состояния.

В свою очередь m -я полумарковская матрица имеет вид:

$$\mathbf{h}^m(t) = [\mathbf{h}_{j,k}^m(t)],$$

$$\text{где } \mathbf{h}_{j,k}^m(t) = \begin{cases} \mathbf{h}_j^m(t), & \text{если } k = j+1; \\ 0, & \text{иначе;} \end{cases}$$

$$\mathbf{h}_j^m(t) = \left[h_{k(m,j)}(t) \right], \quad h_{k(m,j)}(t) = p_{k(m,j)}(t) f_{k(m,j)}(t),$$

$$p_{k(m,j)} = \int_0^\infty h_{k(m,j)}(t) dt, \quad p_{k(m,j)} = 0, \quad f_{k(m,j)}(t) = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \delta(t - \tau),$$

$p_{k(m,j)}$ – вероятность выбора маршрута j -й единицей m -го роя;
 $f_{k(m,j)}(t)$ – плотность времени преодоления маршрута j -й единицей m -го роя. Процесс перехода из состояния S_{j-1}^m в состояние a_j^m по любому маршруту в полумарковском процессе описывается как [30]:

$$\mu^m = \{A^m, \mathbf{h}^m(t)\}.$$

В связи с тем, что все возможные переключения составляют полную группу несовместных событий, плотность времени пребывания процесса μ^m в состоянии a_{j-1}^m имеет следующий вид [32, 34]:

$$f_j^m(t) = \sum_{k(m,j)=1}^{k(m,j)} h_{k(m,j)}(t), \quad \sum_{k(m,j)=1}^{K(m,j)} p_{k(m,j)}(t) = 1.$$

Из всех возможных маршрутов блуждания по процессу μ^m выбирается маршрут:

$$s_{l(m)} = \left[k(m, j) \right],$$

а общее количество выбранных маршрутов равно

$$K(m) = \prod_{j=1}^J K(m, j).$$

Взвешенная плотность времени нахождения пациента в состоянии a_0^m до перехода в состояние a_j^m по выбранному маршруту выглядит следующим образом [34]:

$$h_{k(m)}(t) = L^{-1} \left[\prod_{j=1}^J L[h_{k(m,j)}(t)] \right],$$

а вероятность прохождения маршрута можно оценить как [30]:

$$p_{k(m)} = \int_0^{\infty} h_{k(m)}(t) dt = \prod_{j=1}^J p_{k(m,j)}.$$

Плотность вероятности для чистого времени перехода пациента из состояния a_0^m в состояние a_J^m по выбранному маршруту имеет вид [31]:

$$f_{k(m)}(t) = \frac{h_{k(m)}(t)}{p_{k(m)}},$$

а плотность времени такого перехода по любому возможному произвольному маршруту имеет вид [30]:

$$f_{\Sigma}^m(t) = \sum_{k(m)=1}^{K(m)} h_{k(m)}(t).$$

Представленные соотношения обеспечивают моделирование процессов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах. Накопление массива репрезентативной информации о реализации такого мониторинга для различных групп пациентов обеспечит возможность формирования рекомендаций по совершенствованию стандартов оказания стационарной медицинской помощи пациентам с различными заболеваниями.

Практическая реализация предлагаемого подхода к моделированию процессов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах требует решения комплекса задач, связанных со структурной и параметрической идентификацией, а также с верификацией, основанной на результатах практического применения. Это, в свою очередь, требует наличия сценариев моделирования с учетом применения расширяемых программных компонентов автоматизированного киберфизического

мониторинга состояния пациентов. В наиболее простом случае такие сценарии ориентированы на применение программных компонентов мониторинга состояния пациентов, основанных на использовании оценочных шкал.

6. Моделирование приложения для оценки состояния пациентов с помощью шкал. Наиболее простым сценарием использования приложения с помощью рассмотренных шкал является оценка степени нарушения сознания и комы для детей старше четырех лет и взрослых по шкале Глазго. Эта шкала предполагает определение трёх качественных показателей состояния пациента – открывание глаз (Eye response – E), речевая реакция (Verbal response – V) и двигательная реакция (Motor response – M), после чего выполняется подсчёт баллов и интерпретация результата в диапазоне от ясного сознания до глубокой комы и терминальной комы (смерти мозга). Все показатели оцениваются экспертно, среднее время тестирования согласно методике [35] составляет 1-2 минуты. В этом случае приложение может применяться только для расчёта баллов, оценки состояния и фиксации результата, но не для сбора данных. Процесс показан на рисунке 3, где серым цветом отмечены автоматизируемые действия.



Рис. 3. Сценарий использования шкалы Глазго

Более сложным примером является рискотметрия смерти при остром коронарном синдроме по данным, полученным при поступлении в стационар. Шкала GRACE (Global Registry of Acute Coronary Events) позволяет оценить риск смерти и развития инфаркта миокарда как на госпитальном этапе, так и в течение последующего полугодия, а также определить рациональный медицинский алгоритм лечения конкретного больного. Шкала GRACE предусматривает оценку 8 показателей, получаемых из разных источников: карточка пациента (возраст, результаты анализов), экспертная оценка (класс сердечной недостаточности по классификации Killip, девиация сегмента ST электрокардиограммы), измерение (частота сердечных сокращений, систолическое артериальное давление). Соответствующий процесс показан на рисунке 4.

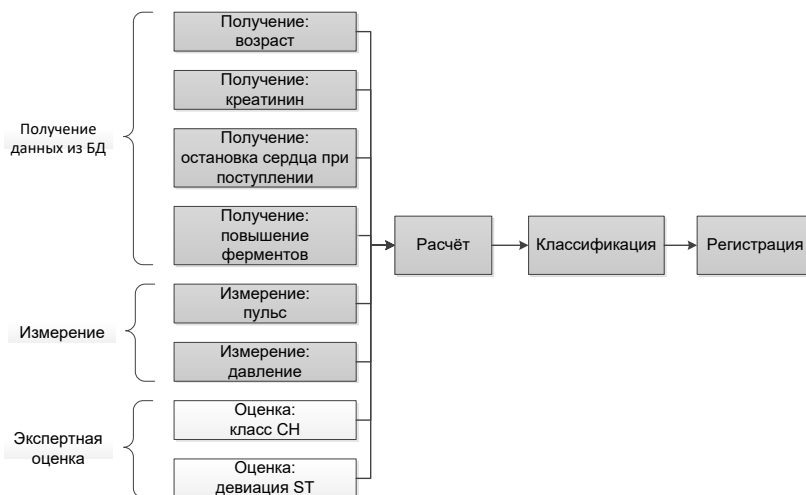


Рис. 4. Сценарий использования шкалы GRACE

Методика диагностики пароксизмальной симпатической гиперактивности также предполагает использование измеряемых и экспертно оцениваемых показателей, получаемых путём визуального осмотра пациента, а также загрузку ретроспективной информации о его состоянии. Применение этой методики рассмотрено в [36].

Для оценки времени, необходимого для выполнения указанных процессов, выполнено их имитационное моделирование.

7. Результаты моделирования. Моделирование выполнено для следующих вариантов диагностики состояния пациента по трём рассмотренным шкалам:

1. Без использования приложения: сбор данных и все расчёты выполняются специалистами вручную.
2. Приложение используется в автономном режиме: расчёты выполняются автоматически, но необходим ручной сбор и внесение всех показателей.
3. Приложение используется в режиме компонента умной палаты и способно получать значения некоторых показателей автоматически (например, с «умных» мониторов).

Для каждого случая проведено 1000 итераций моделирования, гистограммы распределения времени выполнения процессов для трёх шкал и трёх режимов использования приложения показаны на рисунках 5-7.

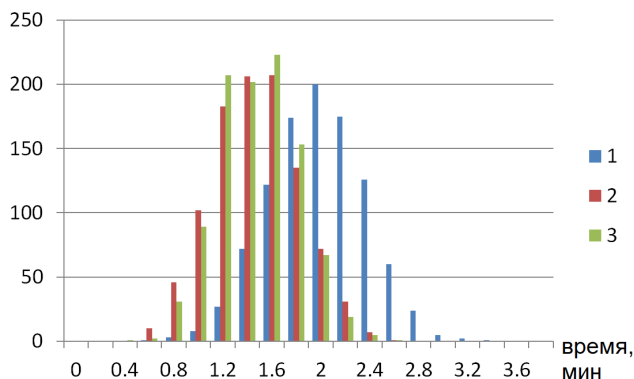


Рис. 5. Гистограмма времени, необходимого для оценки тяжести комы в трёх режимах

Из гистограммы (рисунок 5) видно, что использование приложения (режимы 2 и 3) позволяет сократить время определения тяжести комы со 110 до 80 с, то есть в среднем в 1,4 раза по сравнению с ручным способом расчёта (режим 1). При использовании шкалы Глазго оценки показателей определяются только экспертным путём, поэтому значимой разницы между режимами 2 (автономное использование приложения) и 3 (использование приложения в составе умной палаты) нет. В этом случае приложение используется только для обработки, хранения и визуализации данных.

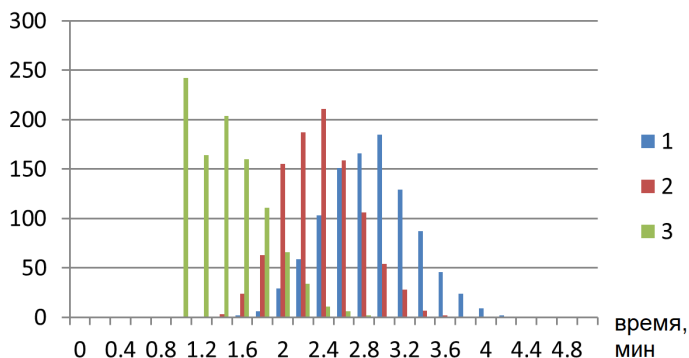


Рис. 6. Гистограмма времени, необходимого для оценки риска смерти при остром коронарном синдроме

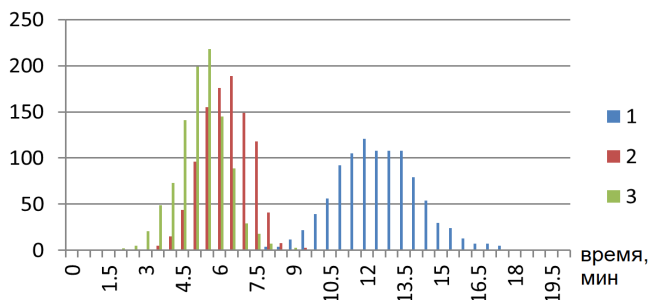


Рис. 7. Гистограмма времени, необходимого для оценки синдрома ПСГА

На рисунках 5-7 видно, что распределение времени для всех трёх режимов существенно отличается. В этом случае использование приложения позволяет сократить на несколько минут не только время расчётов, но и время получения данных за счёт их загрузки из информационных систем и получения из умных мониторов. Так, в задаче оценки ПСГА использование приложения в автономном режиме позволяет сократить время оценки в среднем примерно в 2 раза, при использовании мониторов - в 2,4 раза, т. е. с 12 минут до 6 и 5 минут соответственно. При использовании шкалы GRACE затрачиваемое время сокращается соответственно в 1,2 и 2,1 раза – с 3 минут до 1-2 минут. Такое отличие является значительным, поскольку время работы медицинских специалистов в процессе оценки состояния пациента сокращается более чем в 2 раза. Кроме того, повышается точность оценки за счёт снижения влияния человеческого фактора. Получена обратная связь от медицинских специалистов, подтверждающая результаты моделирования для диагностики ПСГА [25].

8. Заключение. Существующие решения в области m-Health, как правило, не адаптированы к медицинской инфраструктуре (медицинским информационным системам, компонентам умных палат и другим приложениям) и часто применяются изолированно. Кроме того, отсутствуют универсальные и расширяемые инструменты для диагностики и рискометрии заболеваний по шкальным методикам, за исключением узкоспециализированных приложений.

Предложенная математическая модель процессов автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах, описывающая медицинский алгоритм как эстафету с альтернативными маршрутами с помощью аппарата параллельных полумарковских процессов, позволяет реализовать персонифицированное управление здоровьем на основе оптимизации

лечебно-диагностических процедур с помощью целевой функции, характеризующей отклонение показателей текущего состояния от показателей целевого состояния пациента.

Исходя из этого, мобильные приложения описаны как элементы умной медицинской палаты и предложен подход к созданию гибкого, расширяемого и интегрируемого программного компонента автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов. Предложенный программный компонент базируется на детерминированных методиках диагностики и рискометрии здоровья, которые могут быть приведены к унифицированному формату на основе шкал. Это решение позволяет автоматизировать медицинские процессы, что способствует повышению эффективности и качества работы медицинского персонала, так как уменьшается время, затрачиваемое на рутинные операции, и снижается влияние человеческого фактора. Кроме того, использование облачных технологий позволит ускорить обработку данных и повысить гибкость программного компонента киберфизического мониторинга здоровья.

Для оценивания потенциальной эффективности приложения проведено моделирование его применения в умной палате при диагностике и рискометрии состояния пациентов с помощью методик, основанных на шкалах – оценка нарушения сознания и комы по шкале Глазго, риск летального исхода при остром коронарном синдроме по шкале GRACE и диагностика синдрома пароксизмальной симпатической гиперактивности. Моделирование выполнено для трех сценариев: без использования приложения, с его использованием в автономном режиме и с его использованием как компонента автоматизированного киберфизического мониторинга состояния пациентов в умных палатах. Результаты показали, что использование приложения в составе умной палаты позволяет не только ускорить расчёты, но и сократить время получения данных благодаря их автоматической загрузке из информационных систем и автоматизированному снятию показателей с медицинских мониторов.

Авторский коллектив считает важным почтить память выдающегося учёного в области информатики, информационных технологий и теории управления, доктора технических наук, члена-корреспондента РАН, заслуженного деятеля науки и техники РФ Рафаэля Мидхатовича Юсупова. Опыт личного общения с ним, оставивший глубокий и запоминающийся след, стал для авторов важной частью профессионального становления. Научная школа Р.М. Юсупова, отличавшаяся особой системностью и вниманием к строгому обоснованию решений, в значительной степени повлияла

на подходы, использованные при подготовке представленного исследования. Во многом благодаря этим методологическим ориентирам удалось обеспечить целостность и структурированность представленных результатов.

Литература

1. Шадеркин И.А. Дистанционный мониторинг состояния здоровья и окружающей среды человека: возможности и ограничения // Журнал телемедицины и электронного здравоохранения. 2022. Т. 8. № 3. С. 45–49. DOI: 10.29188/2712-9217-2022-8-3-45-54.
2. Богомолов А.В. Информационные технологии цифровой адаптационной медицины // Информатика и автоматизация. 2021. Т. 20. № 5. С. 1154–1182.
3. Ушаков И.Б., Богомолов А.В. Цифровая профилактическая медицина // Вестник Российской академии наук. 2024. Т. 94. № 11. С. 1003–1013. DOI: 10.31857/S0869587324110043.
4. Труханова И.Г., Гуреев А.Д., Лунина А.В. Влияние цифровой трансформации на повышение качества медицинского обеспечения и снижение врачебных ошибок // Биомедицинская радиоэлектроника. 2025. Т. 28. № 1. С. 83–90.
5. Зарубина Т.В. Актуальные вопросы внедрения информационных технологий в здравоохранении // Вестник Росздравнадзора. 2018. № 3. С. 20–25.
6. Zhukova N., Motienko A., Levonevskiy D., Subbotin A., Anh P.T. Smart room for patient monitoring based on IoT technologies // Proceedings of the 2023 6th Artificial Intelligence and Cloud Computing Conference. 2023. pp. 151–158. DOI: 10.1145/3639592.3639630.
7. Denis F., Viger L., Charron A., et al. Detection of lung cancer relapse using self-reported symptoms transmitted via an internet web-application: pilot study of the sentinel follow-up // Supportive Care in Cancer. 2014. vol. 22. pp. 1467–1473. DOI: 10.1007/s00520-013-2111-1.
8. Denis F., Viger L., Charron A., et al. Detecting lung cancer relapse using self-evaluation forms weekly filled at home: the sentinel follow-up // Supportive Care in Cancer. 2014. vol. 22(1). pp. 79–85. DOI: 10.1007/s00520-013-1954-9.
9. Лебедев Г.С., Фомина И.В., Артемова О.Р., и др. Обзор семейства стандартов по обмену данными с персональными медицинскими приборами // Вестник Росздравнадзора. 2022. № 6. С. 75–84.
10. Denis F., Lethrosne C., Pourel N., et al. Randomized trial comparing a web-mediated follow-up with routine surveillance in lung cancer patients // JNCI: Journal of the National Cancer Institute. 2017. vol. 109. no. 9. DOI: 10.1093/jnci/djx029.
11. Wattanapisit, A., Teo, C.H., Wattanapisit, S., et al. Can mobile health apps replace GPs? A scoping review of comparisons between mobile apps and GP tasks // BMC medical informatics and decision making. 2020. vol. 20. no. 1. DOI: 10.1186/s12911-019-1016-4.
12. Galetsi P., Katsaliaki K., Kumar S. Exploring benefits and ethical challenges in the rise of mHealth (mobile healthcare) technology for the common good: An analysis of mobile applications for health specialists // Technovation. 2023. vol. 121. DOI: 10.1016/j.technovation.2022.102598.
13. Хохлов А.Л., Зарубина Т.В., Котловский М.Ю., и др. Механизмы внедрения технологий искусственного интеллекта в здравоохранение: новые этические вызовы // Медицинская этика. 2024. Т. 12. № 3. С. 4–10.
14. Jian W.S., Wang J.Y., Rahmanti A.R., et al. Voice-based control system for smart hospital wards: a pilot study of patient acceptance // BMC health services research. 2022. vol. 22. no. 1. DOI: 10.1186/s12913-022-07668-1.

15. Brunete A., Gamba E., Hernando M., Cedazo R. Smart assistive architecture for the integration of IoT devices, robotic systems, and multimodal interfaces in healthcare environments // *Sensors*. 2021. vol. 21. no. 6. DOI: 10.3390/s21062212.
16. Azhiimah A.N., Khotimah K., Sumbawati M.S., Santosa A.B. Automatic Control Based on Voice Commands and Arduino // *Proceedings of the International Joint Conference on Science and Engineering (IJCSE 2020)*. 2020. pp. 29–34. DOI: 10.2991/aer.k.201124.006.
17. Cronin S., Doherty G. Touchless computer interfaces in hospitals: A review // *Health informatics journal*. 2018. vol. 25. no. 4. pp. 1325–1342. DOI: 10.1177/1460458217748342.
18. Ali H., Cole A., Panos G. Transforming Patient Hospital Experience Through Smart Technologies // *Design, User Experience, and Usability. Case Studies in Public and Personal Interactive Systems: 9th International Conference (DUXU 2020), Held as Part of the 22nd HCI International Conference (HCII 2020)*. 2020. pp. 203–215. DOI: 10.1007/978-3-030-49757-6_14.
19. Wen M.H., Bai D., Lin S. et al. Implementation and experience of an innovative smart patient care system: A cross-sectional study // *BMC Health Services Research*. 2022. vol. 22. no. 1. DOI: 10.1186/s12913-022-07511-7.
20. Bouldin E.D., Andresen E.M., Dunton N.E. et al. Falls among adult patients hospitalized in the United States: prevalence and trends // *Journal of patient safety*. 2013. vol. 9. no. 1. pp. 13–17. DOI: 10.1097/PTS.0b013e3182699b64.
21. Hempel S., Newberry S., Wang Z., et al. Hospital fall prevention: a systematic review of implementation, components, adherence, and effectiveness // *Journal of the American Geriatrics Society*. 2013. vol. 61. no. 4. pp. 483–494. DOI: 10.1111/jgs.12169.
22. Yadav S., Manohar M., Jeba Shiney O., Priestly Shan B., Das G.J. A Smart System for Monitoring Flow in Drip Bottles in Healthcare // *Proceedings of the International Conference on Futuristic Communication and Network Technologies (VICFCNT 2020)*. 2022. pp. 663–669. DOI: 10.1007/978-981-16-4625-6_66.
23. Gayathri S., Ganesh C.S.S. Automatic indication system of glucose level in glucose trip bottle // *International Journal of Multidisciplinary Research and Modern Education*. 2017. vol. 3(1). pp. 148–151. DOI: 10.5281/zenodo.438622.
24. Feng Y.S., Liu H.Y., Hsieh M.H., Fung H.C., Chang C.Y., Yu C.C., Huang C.W. An RSSI-based device-free localization system for smart wards // *IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW)*. 2021. pp. 1–2. DOI: 10.1109/ICCE-TW52618.2021.9603249.
25. Ценципер Л.М., Мотиенко А.И., Терехов И.С., Левоневский Д.К., Самочерных К.А., Кондратьев А.Н. Цифровое решение для определения тяжести синдрома пароксизмальной симпатической гиперактивности у пациентов с повреждением головного мозга // *Вестник анестезиологии и реаниматологии*. 2023. Т. 20. № 6. С. 90–96. DOI: 10.24884/2078-5658-2023-20-6-90-96.
26. Tang E.W., Wong C.K., Herbison P. Global Registry of Acute Coronary Events (GRACE) hospital discharge risk score accurately predicts long-term mortality post acute coronary syndrome // *American heart journal*. 2007. vol. 153. no. 1. pp. 29–35.
27. Беззубцева Е.Н., Сахарова А.В., Лавлинская Л.И., Черных Е.А., Лавлинская Т.А. Оценка риска летальности по шкале GRACE у больных, перенесших инфаркт миокарда // *Молодежный инновационный вестник*. 2017. Т. 6. № 2. С. 302–303.
28. Пирадов М.А., Супонева Н.А., Рябинкина Ю.В. и др. Шкала комы Глазго (Glasgow Coma Scale, GCS): лингвокультурная адаптация русскоязычной версии // *Журнал им. НВ Склифосовского «Неотложная медицинская помощь»*. 2021. Т. 10. № 1. С. 91–99. DOI: 10.23934/2223-9022-2021-10-1-91-99.
29. Соловьева П.И., Синкин М.В., Талыпов А.Э. Шкала комы Глазго и шкала FOUR для оценки уровня сознания // *Нервные болезни*. 2023. № 3. С. 20–26. DOI: 10.24412/2226-0757-2023-13003.

30. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Dobrovolsky N.N. Discrete model of paired relay-race // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. 2018. vol. 11. no. 3. pp. 72–84.
31. Larkin E.V., Privalov A.N., Bogomolov A.V. Discrete approach to simulating synchronized relay races // Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2020. vol. 54. no. 1. pp. 43–51.
32. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Dobrovolsky N.N. Relay races along a pair of selectable routes // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. 2018. vol. 11. no. 1. С. 15–26.
33. Кибзун А.И., Синицын И.Н. Современные проблемы теории оптимизации стохастических систем // Автоматика и телемеханика. 2020. № 11. С. 3–10.
34. Ларкин Е.В., Привалов А.Н., Богатырева Ю.И. Парное дискретное соревнование со свободным выбором маршрута // Чебышевский сборник. 2021. Т. 22. № 2(78). С. 145–159.
35. The Glasgow Coma Scale – GCS (Teasdale G.M., Jennett B.). URL: <https://cpd-program.ru/methods/gcsc.htm> (дата обращения 14.01.2025).
36. Левоневский Д.К., Мотиенко А.И. Моделирование и автоматизация процессов сбора и обработки данных в умной медицинской палате // Программная инженерия. 2023. Т. 14. № 10. С. 502–512. DOI: 10.17587/prin.14.502-512.

Левоневский Дмитрий Константинович — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, лаборатория технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: технологии программирования и обработки данных, корпоративные социкиберфизические системы, моделирование и автоматизация корпоративных процессов. Число научных публикаций — 100. levonevskij.d@ias.spb.su; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)508-3311.

Мотиенко Анна Игоревна — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, лаборатория технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: математическая статистика, теория вероятности, применение методов математического моделирования в эпидемиологии. Число научных публикаций — 65. anna.gunchenko@gmail.com; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)508-3311.

Богомолов Алексей Валерьевич — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория технологий больших данных социкиберфизических систем, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН). Область научных интересов: цифровизация медицины, медицинская информатика, системы управления, диагностика состояния человека. Число научных публикаций — 350. a.v.bogomolov@gmail.com; 14-я линия В.О., 39, 199178, Санкт-Петербург, Россия; р.т.: +7(812)508-3311.

Поддержка исследований. Работа выполнена при финансовой поддержке государственного бюджета, номер проекта FFZF-2025-0019.

D. LEVONEVSKIY, A. MOTIENKO, A. BOGOMOLOV
**AUTOMATION OF CYBER-PHYSICAL MONITORING
OF PATIENTS' CONDITION IN SMART WARDS**

Levonevskiy D., Motienko A., Bogomolov A. Automation of Cyber-Physical Monitoring of Patients' Condition in Smart Wards.

Abstract. The digitalization of healthcare implies the widespread adoption of informatization and automation technologies for human health monitoring, aimed at maintaining, improving, and restoring health. To adapt existing e-health solutions to the medical infrastructure, we modeled expandable software components for automated cyber-physical patient monitoring in smart wards. A mathematical model of cyber-physical patient monitoring processes is presented, describing a medical algorithm as a relay race with alternative routes using a framework of parallel semi-Markov processes. The software components for cyber-physical patient monitoring are characterized as a flexible, expandable, and integrated element of a smart medical ward, enabling the personalization and optimization of treatment and diagnostic procedures using an objective function characterizing the deviation of the patient's current condition from their target condition. The potential for automating medical processes in the implementation of diagnostic and health risk assessment methods based on point scales is demonstrated. The simulation results showed that the use of software components for automated cyber-physical patient monitoring in smart wards not only accelerates calculations but also reduces the time required to obtain data through automatic downloading from information systems and automated readings from medical devices, opening up new opportunities for personalized management of inpatient medical care.

Keywords: healthcare informatization, medical informatics, automation of condition monitoring, smart ward, cyber-physical system, software component, cyber-physical monitoring.

References

1. Shaderkin I.A. [Remote monitoring of human health and the environment: opportunities and limitations]. *Zhurnal telemeditsiny i jelektronnogo zdravoohraneniya – Russian Journal of Telemedicine and E-Health*. 2022. vol. 8. no. 3. pp. 45–49. DOI: 10.29188/2712-9217-2022-8-3-45-54. (In Russ.).
2. Bogomolov A. [Information Technologies of Digital Adaptive Medicine]. *Informatics and Automation*. 2021. vol. 20. no. 5. pp. 1154–1182. (In Russ.).
3. Ushakov I.B., Bogomolov A.V. [Digital Preventive Medicine]. *Vestnik Rossijskoj akademii nauk – Bulletin of the Russian Academy of Sciences*. 2024. vol. 94. no 11. pp. 1003–1013. DOI: 10.31857/S0869587324110043.
4. Trukhanova I.G., Gureev A.D., Lunina A.V. [The impact of digital transformation on improving the quality of medical care and reducing medical errors]. *Biomeditsinskaja radioelektronika – Biomedicine Radioengineering*. 2025. vol. 28. no 1. pp. 83–90. (In Russ.).
5. Zarubina T.V. [Topical issues of the implementation of information technologies in health care]. *Vestnik Roszdravnadzora – Roszdravnadzor Bulletin*. 2018. no. 3. pp. 20–25. (In Russ.).
6. Zhukova N., Motienko A., Levonevskiy D., Subbotin A., Anh P.T. Smart room for patient monitoring based on IoT technologies. *Proceedings of the 2023 6th Artificial Intelligence and Cloud Computing Conference*. 2023. pp. 151–158. DOI: 10.1145/3639592.3639630.

7. Denis F., Viger L., Charron A., et al. Detection of lung cancer relapse using self-reported symptoms transmitted via an internet web-application: pilot study of the sentinel follow-up. *Supportive Care in Cancer*. 2014. vol. 22. pp. 1467–1473. DOI: 10.1007/s00520-013-2111-1.
8. Denis F., Viger L., Charron A., et al. Detecting lung cancer relapse using self-evaluation forms weekly filled at home: the sentinel follow-up. *Supportive Care in Cancer*. 2014. vol. 22(1). pp. 79–85. DOI: 10.1007/s00520-013-1954-9.
9. Lebedev G.S., Fomina I.V., Artemova O.R., et al. [Overview of a family of standards for data exchange with personal medical devices]. *Vestnik Roszdravnadzora – Vestnik Roszdravnadzora*. 2022. no 6. pp. 75–84. (In Russ.).
10. Denis F., Lethrosne C., Pourel N., et al. Randomized trial comparing a web-mediated follow-up with routine surveillance in lung cancer patients. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*. 2017. vol. 109. no. 9. DOI: 10.1093/jnci/djx029.
11. Wattanapisit, A., Teo, C.H., Wattanapisit, S., et al. Can mobile health apps replace GPs? A scoping review of comparisons between mobile apps and GP tasks. *BMC medical informatics and decision making*. 2020. vol. 20. no. 1. DOI: 10.1186/s12911-019-1016-4.
12. Galetsi P., Katsaliaki K., Kumar S. Exploring benefits and ethical challenges in the rise of mHealth (mobile healthcare) technology for the common good: An analysis of mobile applications for health specialists. *Technovation*. 2023. vol. 121. DOI: 10.1016/j.technovation.2022.102598.
13. Khokhlov A.L., Zarubina T.V., Kotlovsky M.Yu., et al. [Mechanisms for introduction of artificial intelligence in healthcare: new ethical challenges]. *Medicinskaja jetika – Medical Ethics*. 2024. vol. 12. no. 3. pp. 4–10. (In Russ.).
14. Jian W.S., Wang J.Y., Rahmanti A.R., et al. Voice-based control system for smart hospital wards: a pilot study of patient acceptance. *BMC health services research*. 2022. vol. 22. no. 1. DOI: 10.1186/s12913-022-07668-1.
15. Brunete A., Gambao E., Hernando M., Cedazo R. Smart assistive architecture for the integration of IoT devices, robotic systems, and multimodal interfaces in healthcare environments. *Sensors*. 2021. vol. 21. no. 6. DOI: 10.3390/s21062212.
16. Azhiimah A.N., Khotimah K., Sumbawati M.S., Santosa A.B. Automatic Control Based on Voice Commands and Arduino. *Proceedings of the International Joint Conference on Science and Engineering (IJCSE 2020)*. 2020. pp. 29–34. DOI: 10.2991/aer.k.201124.006.
17. Cronin S., Doherty G. Touchless computer interfaces in hospitals: A review. *Health informatics journal*. 2018. vol. 25. no. 4. pp. 1325–1342. DOI: 10.1177/1460458217748342.
18. Ali H., Cole A., Panos G. Transforming Patient Hospital Experience Through Smart Technologies. Design, User Experience, and Usability. *Case Studies in Public and Personal Interactive Systems: 9th International Conference (DUXU 2020), Held as Part of the 22nd HCI International Conference (HCII 2020)*. 2020. pp. 203–215. DOI: 10.1007/978-3-030-49757-6_14.
19. Wen M.H., Bai D., Lin S. et al. Implementation and experience of an innovative smart patient care system: A cross-sectional study. *BMC Health Services Research*. 2022. vol. 22. no. 1. DOI: 10.1186/s12913-022-07511-7.
20. Bouldin E.D., Andresen E.M., Dunton N.E. et al. Falls among adult patients hospitalized in the United States: prevalence and trends. *Journal of patient safety*. 2013. vol. 9. no. 1. pp. 13–17. DOI: 10.1097/PTS.0b013e3182699b64.
21. Hempel S., Newberry S., Wang Z., et al. Hospital fall prevention: a systematic review of implementation, components, adherence, and effectiveness. *Journal of the American Geriatrics Society*. 2013. vol. 61. no. 4. pp. 483–494. DOI: 10.1111/jgs.12169.

22. Yadav S., Manohar M., Jeba Shiney O., Priestly Shan B., Das G.J. A Smart System for Monitoring Flow in Drip Bottles in Healthcare. Proceedings of the International Conference on Futuristic Communication and Network Technologies (VICFCNT 2020). 2022. pp. 663–669. DOI: 10.1007/978-981-16-4625-6_66.
23. Gayathri S., Ganesh C.S.S. Automatic indication system of glucose level in glucose trip bottle. International Journal of Multidisciplinary Research and Modern Education. 2017. vol. 3(1). pp. 148–151. DOI: 10.5281/zenodo.438622.
24. Feng Y.S., Liu H.Y., Hsieh M.H., Fung H.C., Chang C.Y., Yu C.C., Huang C.W. An RSSI-based device-free localization system for smart wards. IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW). 2021. pp. 1–2. DOI: 10.1109/ICCE-TW52618.2021.9603249.
25. Tsentsiper L.M., Motienko A.I., Terekhov I.S., Levonevskij D.K., Samochernyh K.A., Kondrat'ev A.N. [A digital solution for determining the severity of paroxysmal sympathetic hyperactivity syndrome in patients with brain injury]. Vestnik anesteziologii i reanimatologii – Messenger of anesthesiology and resuscitation. 2023. vol. 20. no. 6. pp. 90–96. DOI: 10.24884/2078-5658-2023-20-6-90-96.
26. Tang E.W., Wong C.K., Herbison P. Global Registry of Acute Coronary Events (GRACE) hospital discharge risk score accurately predicts long-term mortality post acute coronary syndrome. American heart journal. 2007. vol. 153. no. 1. pp. 29–35.
27. Bezzubceva E.N., Saharova A.V., Lavlinskaja L.I., et al. [Mortality risk assessment using the GRACE scale in patients who have had myocardial infarction]. Molodezhnyj innovacionnyj vestnik – Youth Innovation Bulletin. 2017. vol. 6. no. 2. pp. 302–303. (In Russ.).
28. Piradov M.A., Suponeva N.A., Ryabinkina Yu.V., et al. [Glasgow Coma Scale: Linguistic-Cultural Adaptation of the Russian Version]. Zhurnal im. N.V. Sklifosovskogo «Neotlozhnaja medicinskaja pomoshh'» – Russian Sklifosovsky Journal of Emergency Medical Care. 2021. vol. 10. no. 1. pp. 91–99. DOI: 10.23934/2223-9022-2021-10-1-91-99. (In Russ.).
29. Solovieva P.I., Sinkin M.V., Talypov A.E. [Glasgow Coma Scale and FOUR Scale to Assess Level of Consciousness]. Nervnye bolezni – Nervous diseases. 2023. no. 3. pp. 20–26. DOI: 10.24412/2226-0757-2023-13003. (In Russ.).
30. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Dobrovolsky N.N. Discrete model of paired relay-race. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. 2018. vol. 11. no. 3. pp. 72–84.
31. Larkin E.V., Privalov A.N., Bogomolov A.V. Discrete approach to simulating synchronized relay races. Automatic Documentation and Mathematical Linguistics. 2020. vol. 54. no. 1. pp. 43–51.
32. Larkin E.V., Bogomolov A.V., Privalov A.N., Dobrovolsky N.N. Relay races along a pair of selectable routes. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mathematical Modelling, Programming & Computer Software. 2018. vol. 11. no. 1. C. 15–26.
33. Kibzun A.I., Sinitsyn I.N. [Modern problems of optimization theory stochastic systems]. Avtomatika i telemekhanika – Automation and telemechanics. 2020. no. 11. pp. 3–10. (In Russ.).
34. Larkin E.V., Privalov A.N., Bogatyreva Yu.I. Paired discrete competition with a free route choice. Chebyshevskii sbornik – Chebyshevskii sbornik. 2021. vol. 22. no. 2(78). pp. 145–159. (In Russ.).
35. The Glasgow Coma Scale – GCS (Teasdale G.M., Jennett B.). Available at: <https://cpd-program.ru/methods/gcsc.htm> (accessed 14.01.2025).
36. Levonevskij D.K., Motienko A.I. [Modeling and Automation of Data Collection and Processing in a Smart Medical Ward]. Programmnaya Ingeneria – Programmnaya Ingeneria. 2023. vol. 14. no. 10. pp. 502–512. DOI: 10.17587/prin.14.502-512. (In Russ.).

Levonevskiy Dmitriy — Ph.D., Associate Professor, Senior researcher, Laboratory of big data technologies in socio-cyberphysical systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: programming technologies, data processing, corporate socio-cyber-physical systems, modeling and automation of corporate processes. The number of publications — 100. levonevskij.d@iiias.spb.su; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)508-3311.

Motienko Anna — Ph.D., Senior researcher, Laboratory of big data technologies in socio-cyberphysical systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: mathematical statistics, probability theory, application of mathematical modeling in epidemiology. The number of publications — 65. anna.gunchenko@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)508-3311.

Bogomolov Alexey — Ph.D., Dr.Sci., Professor, Chief researcher, Laboratory of big data technologies in socio-cyberphysical systems, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences (SPC RAS). Research interests: digitalization of medicine, medical informatics, control systems, diagnostics of human condition. The number of publications — 350. a.v.bogomolov@gmail.com; 39, 14-th Line V.O., 199178, St. Petersburg, Russia; office phone: +7(812)508-3311.

Acknowledgements. This research is supported by the state budget, project No. FFZF-2025-0019.