

*На правах рукописи*



**АЛЬ НАСРАВИ ФАРИС ХАЗИМ АБДУЛСАДА**

**РАСПРЕДЕЛЕННАЯ СИСТЕМА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ  
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО  
МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПАЦИЕНТОВ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ**

Специальность 2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка  
информации, статистика (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Саратов 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор  
**Томашевский Юрий Болеславович**

**Официальные оппоненты:** **Садовникова Наталья Петровна,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Цифровые технологии  
в урбанистике, архитектуре и строительстве»  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Волгоградский государственный  
технический университет» (г. Волгоград).

**Обухов Артем Дмитриевич,**  
доктор технических наук, доцент, доцент  
кафедры «Системы автоматизированной  
поддержки принятия решений» федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Тамбовский  
государственный технический университет»  
(г. Тамбов).

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Федеральный  
исследовательский центр «Саратовский научный  
центр Российской академии наук»

Защита диссертации состоится « 24 » декабря 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.391.01 СГТУ имени Гагарина Ю.А. по адресу: 410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, корп. 25, ауд. 815.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке СГТУ имени Гагарина Ю.А. и на сайте [www.sstu.ru](http://www.sstu.ru)

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » октября 2025 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Самойлова Елена Михайловна

## I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Проблематика телемедицины как междисциплинарной отрасли науки и техники, связанной с внедрением IT-технологий, обусловлена необходимостью более эффективно решать проблемы традиционной медицины в условиях роста населения, его старения и новых требований повышения доступности и качества медицинских услуг в условиях ограничений разного рода: технологических, этических и др.

В инфраструктуре здравоохранения и системах реагирования на чрезвычайные ситуации по всему миру существуют «пробелы». Многие люди не имеют доступа к традиционным медицинским услугам, а медучреждения не имеют технологических возможностей и людских ресурсов оказывать полноценные услуги удаленно. Более того, не все пациенты с хроническими заболеваниями могут регулярно получать медицинскую помощь и должным образом контролировать состояние здоровья. По статистике, 87 % взрослых в возрасте 65+ готовы оставаться в собственном доме по мере старения. Это означает, что им необходима качественная удаленная помощь, которая возможна только на основе аппаратно-программного и инфокоммуникационного обеспечения телемедицины. Индустрия медицинских технологий разрабатывает и производит широкий спектр продуктов для мониторинга и диагностики пациентов. Значительные достижения в области беспроводных технологий, миниатюризации и вычислительной мощности носимых датчиков стимулируют инновации в медицинской технике, что приводит к разработке большого количества подключенных медицинских устройств, способных генерировать, собирать, анализировать и передавать данные. Новейшим этапом развития Интернета вещей IoT (Internet of Things) является Интернет медицинских вещей IoMT (Internet of Medical Things), который имеет критически важные приложения для интеллектуальных систем здравоохранения. Подмножество технологии IoMT включает медицинское оконечное оборудование, взаимосвязанное между собой, а также с терминалами анализа состояния пациентов через инфокоммуникационные сети для мониторинга здоровья пациентов.

Между тем, значительный рост числа абонентов и конечного телемедицинского оборудования в сочетании с более скромным ростом вычислительных мощностей серверного оборудования и терминалов врачей медицинских центров, как и их числа, а также пропускной способности каналов связи обуславливает рост нагрузки на телемедицинскую сеть, увеличение времени задержки доставки сообщений, потери фрагментов целостной информации, таких как записи электрокардиограмм, электроэнцефалограмм, кожно-гальванических реакций, фотоплетизмограмм и других функциональных, кинематических, физиологических параметров человека. Изменение структуры исходных измерительных данных и пропуски непосредственно снижают достоверность медицинского диагностирования и оперативность принятия решений по амбулаторным мероприятиям. В результате возникает прагматическое противоречие между необходимостью повышения достоверности телемедицинской диагностики, решения задач

телемедицинского скрининга, сопровождения терапии пациентов и невозможностью обеспечения полноты исходных данных, формируемых возрастающим числом и функциональностью датчиков IoMT. Технологическим решением этой задачи является использование промежуточных узлов (Fog-узлов туманных вычислений) предварительной обработки данных и маршрутизации сообщений. При этом возникает противоречие между необходимостью обеспечения заданной достоверности и целостности передачи сообщений, одновременно формируемых множеством устройств IoMT, и отсутствием научно-методического обеспечения управления функционированием Fog-узлов в условиях разнородных, слабоструктурированных измерительных данных.

Таким образом, тема диссертационного исследования является **актуальной** и обусловлена необходимостью повышения достоверности телемедицинской диагностики и эффективности функционирования телемедицинской сети передачи данных мониторинга в условиях роста числа устройств IoMT при ограничениях на пропускную способность сетей связи и телекоммуникаций.

**Степень проработанности темы.** Современные разработки в области телемедицины и медицинского Интернета вещей (IoMT) с применением облачных и туманных вычислений представлены в трудах отечественных исследователей (Евин И.А., Ковалев С.М., Каширина И.Л., Муха Ю.П., Лебедев Г.С., Чопоров О.Н. и др.) и зарубежных авторов (А. Al-Fuqaha, P. Gore, M. Guizani, M. Hassanali, T. Hwang, A. Mukherjee и др.). Практические решения в этой области развиваются ведущими компаниями: Ростелеком, МТС, СберМедИИ, Philips, Medtronic, IBM, Huawei, Cisco и др.

Несмотря на достигнутые успехи, сохраняются нерешённые задачи: высокая задержка передачи данных при массовом подключении IoMT-устройств, гетерогенность сенсорных потоков, а также недостаточная проработанность моделей управления fog-узлами с использованием нечеткой кластеризации и обучения с подкреплением. Эти проблемы определяют актуальность и новизну данного диссертационного исследования.

**Объект исследования** – система сбора и анализа телемедицинских данных с использованием облачных технологий.

**Предмет исследования** – методы, модели, алгоритмы процессов и закономерностей функционирования системы сбора и анализа телемедицинских данных с использованием облачных технологий.

**Цель диссертационной работы** состоит в повышении достоверности телемедицинской диагностики и эффективности функционирования телемедицинской сети передачи данных мониторинга в условиях роста числа устройств IoMT при ограничениях на пропускную способность сетей связи и телекоммуникаций.

**Для достижения поставленной цели исследования определены следующие задачи:**

1. Провести анализ проблематики телемедицины с использованием облачных технологий, включая системный анализ сбора и обработки данных

распределенной сети устройств IoT, преимуществ и ограничений медицинского Интернета вещей.

2. Разработать модель и методику автоматизированного сбора и обработки данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий.

3. Разработать правила построения и функционирования системы сбора данных на основе технологий туманных вычислений в интересах медицинской диагностики, включающих описания работы и организацию системы сбора данных с носимых датчиков на базе облака в медицинском интернете вещей.

4. Разработать элементы программного сервиса сообщений для взаимодействия между приложением Интернета вещей и подключенными устройствами сбора данных пациента, а также макет специального программного обеспечения, реализующего алгоритм классификации состояния пациента на основе машинного обучения, встроенного в прототип системы дистанционного мониторинга электрокардиограммы на основе медицинского Интернета вещей.

#### **Научная новизна исследования:**

1) Разработана модель автоматизированного сбора и обработки данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий, в отличие от известных, обеспечивающая распределение и выбор пакетов данных IoT в среде «пограничных вычислений» с использованием стратегий нечетких множеств и нейронных сетей в туманных узлах, что позволило снизить задержки передачи данных мониторинга между медицинским Интернетом вещей и облачными серверами.

2) Разработана методика распознавания физиологического статуса пациента на основе нейросетевой классификации вида состояния и технологии «слияния данных», потенциально обладающая высокой достоверностью и оперативностью.

3) Сформулированы принципы построения архитектуры и функционирования системы сбора данных на основе технологий туманных вычислений в интересах медицинской диагностики, в основе которых положены законы функционирования облачных служб в архитектуре системы сбора данных с носимых датчиков на базе облака в медицинском интернете вещей.

#### **Практическая значимость** исследования заключается в следующем:

1. Разработка элементов программного сервиса сообщений для взаимодействия между приложением Интернета вещей и подключенными устройствами сбора данных пациента.

2. Разработка макета системы дистанционного мониторинга электрокардиограммы на основе медицинского Интернета вещей в части программного обеспечения врача для контроля, диагностики и прогнозирования параметров состояния пациента по данным дистанционных электрокардиографических исследований и сопутствующих физиологических кинематических параметров диагностического фона пациента.

**Методологическая основа исследования.** Исследования проведены с применением основ системотехники, теории вероятностей и математической статистики, теории случайных процессов, конструирования средств вычислительной и инфокоммуникационной техники, аналитического конструирования. Практическая часть выполнена с использованием методов математического моделирования, технологий объектно-ориентированного программирования.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Модель минимизации задержки передачи сообщений между медицинскими IoT и облачными серверами на основе нечеткой таксономии интеллектуального шлюза.

2. Алгоритм автоматизированного распределения и выбора пакетов данных для мониторинга состояния пациентов на основе машинного обучения с подкреплением.

3. Методика распознавания физиологического статуса пациента на основе нейросетевой классификации вида состояния и технологии «Multi-sensor fusion».

4. Принципы построения архитектуры, функционирования и элементы программного комплекса системы сбора и обработки данных на основе технологий туманных вычислений.

**Соответствие паспорту специальности.** Диссертация соответствует областям исследований: п. 3 «Разработка критериев и моделей описания и оценки эффективности решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 4 «Разработка методов и алгоритмов решения задач системного анализа, оптимизации, управления, принятия решений, обработки информации и искусственного интеллекта», п. 10 «Методы и алгоритмы интеллектуальной поддержки при принятии управленческих решений в технических системах».

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечена корректным применением методологической базы исследования, адекватностью использованных методов сформулированным задачам, репрезентативностью эмпирической базы исследования, согласованностью статистической и математической обработки данных диагностических исследований.

**Апробация результатов.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на XVIII Международной научно-практической конференции «Проблемы управления в социально-экономических и технических системах», (г. Саратов, 2022), а также на национальных конференциях в департаменте здравоохранения города Аль-Давания в Ираке в период 2022-2025: «Электронное управление в Ираке», «Безопасность базы данных здравоохранения» и «Электронное архивирование» соответственно.

**Личный вклад автора.** Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Автором осуществлен анализ архитектуры и технологии медицинского «Интернета вещей» с использованием облачных технологий, показавший, что современные умные медицинские сенсорные

устройства целесообразно подключать к сети поставщиков медицинских услуг для передачи данных на внутренние облачные серверы; предложена архитектура системы сбора данных с носимых датчиков на базе облака; разработана аналитическая модель работы узлов разгрузки вычислений на базе Fog-узлов, функционирующих на основе нечеткой кластеризации; реализована программа интеллектуального мониторинга состояния пациентов с использованием туманных вычислений.

**Публикации.** По результатам работы опубликовано 9 научных работ, из них 4 статьи в изданиях из перечня ВАК, 5 статей входят в другие научные издания.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Общий объем диссертации составляет 168 страниц компьютерного текста, содержит 60 рисунков. Список литературы содержит 107 источников.

## II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность избранной темы диссертационного исследования, оценивается степень ее разработанности, определяются цели и задачи диссертационного исследования, осуществляется выбор предмета и объекта исследования, раскрывается научная новизна, определяются методологические основания исследования, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, формулируются положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен системный анализ комплекса сбора и обработки данных телемедицины. Систематизирован перечень основных телемедицинских услуг в мире с особенностями национального регулирования в различных странах. Отмечено, что современное аппаратное и программное обеспечение для телемедицины позволяет поставщикам медицинских услуг связывать персонал посредством видеоконференций, организовывать работу медицинских учреждений, управлять лечением и улучшать состояние пациентов многими инновационными способами. Проанализирован мировой рынок телемедицинских устройств и услуг и выявлен ускоряющийся среднегодовой темп роста, который на период с 2023 по 2032 год составит 23,7 %. Проведен анализ степени распространения телемедицинской практики среди врачей различных категорий и направленности, а также среди пациентов в различных целях.

Установлено, что технические и технологические проблемы дальнейшего развития телемедицинских технологий обусловлены, с одной стороны, стремлением обеспечить наблюдаемость пациента для систем анализа его состояния за счет применения технологий ИИ и IoT, с другой – априорной неопределённостью, относительно оптимальности (по критериям максимума оперативности и достоверности) ряда методик сбора, обработки, безопасного (в ряде случаев – бескомпроматного) хранения и анализа медицинских и других фактографических данных, на основе которых врач принимает решения в

рамках национальных законодательств стран – это может быть или принятие решения о необходимости очного приема, там где запрещена постановка диагноза удаленно, либо, собственно, постановка диагноза и назначение курса лечения.

Таким образом, задача эффективного сбора и обработки медицинских данных – повышение достоверности и оперативности предоставления медицинских услуг на расстоянии, основные из которых сведены к задачам распознавания текущего и прогноза будущего состояния здоровья пациентов. Повышение достоверности распознавания по фрагментарным, разнотемповым и неравномерным данным телеметрических измерений с устройств IoMT и IoT заключается в необходимости поиска и использования новых адекватных моделей наблюдений, способных учитывать необходимые свойства распределённых инфокоммуникационных систем, например «умные» сети городских агломераций, интернет-домены, социальные системы с числом субъектов несколько тысяч. Традиционное графоаналитическое имитационное моделирование таких систем с имитацией динамики состояния каждого элемента системы и отображением изменяющейся структуры и топологии наталкивается на проблему размерности.

Учёт размерности необходим на всех этапах автоматизированного моделирования, начиная от постановки задач и заканчивая практическим применением полученных расчетных математических моделей, их алгоритмизацией и программированием. В главе рассмотрены концепция, преимущества и ограничения медицинского Интернета вещей. В архитектуре системы протоколов выделены три обобщенных уровня: 1) уровень сбора и формирования данных; 2) уровень преобразования данных в соответствии с протоколами; 3) данные, собираемые датчиком «сенсорный слой». Отмечены существующие объективные ограничения телемедицинских технологий, связанные с неоднородностью устройств и возможными нарушениями конфиденциальности персональных данных пациентов из электронных медицинских книг (историй болезни).

Проведен анализ архитектуры и технологии медицинского «Интернета вещей» с использованием облачных технологий, показавший, что современные умные медицинские сенсорные устройства целесообразно подключать к сети поставщиков медицинских услуг для передачи данных на внутренние облачные серверы.

**Вторая глава** посвящена разработке модели и методики автоматизированного сбора и обработки данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий. Географическая, территориальная децентрализованная концепция облака телемедицинских сервисов и вычислений обуславливает основной недостаток – задержку передачи сообщений. Задержка передачи сообщений является общей трудности облачных служб, когда процедура получения, сбора, предварительной обработки, анализа сообщений и принятия решения на ее основе, распределена по различным вычислительным элементам кластера, при том, что последние нагружены различными задачами, далеко не последнего приоритета

выполнения. Увеличение времени задержки при передаче данных в обе стороны из-за передачи больших объемов данных и большого трафика между IoT и облачными серверами делает медицинские данные неактуальными для конечных пользователей. Чувствительные ко времени медицинские приложения требуют данных в реальном времени. Традиционные облачные серверы не могут удовлетворить минимальные требования к задержкам IoT-устройств и конечных пользователей. В главе предлагается новое решение для вышеупомянутой проблемы, включающее аналитическую модель и гибридную процедуру обучения с подкреплением на основе нечетких данных маршрутизации сообщений в «туманных» узлах инфокоммуникационной сети (т.н. Fog-узлах), реализующих концепцию «пограничных» вычислений (рис. 1).

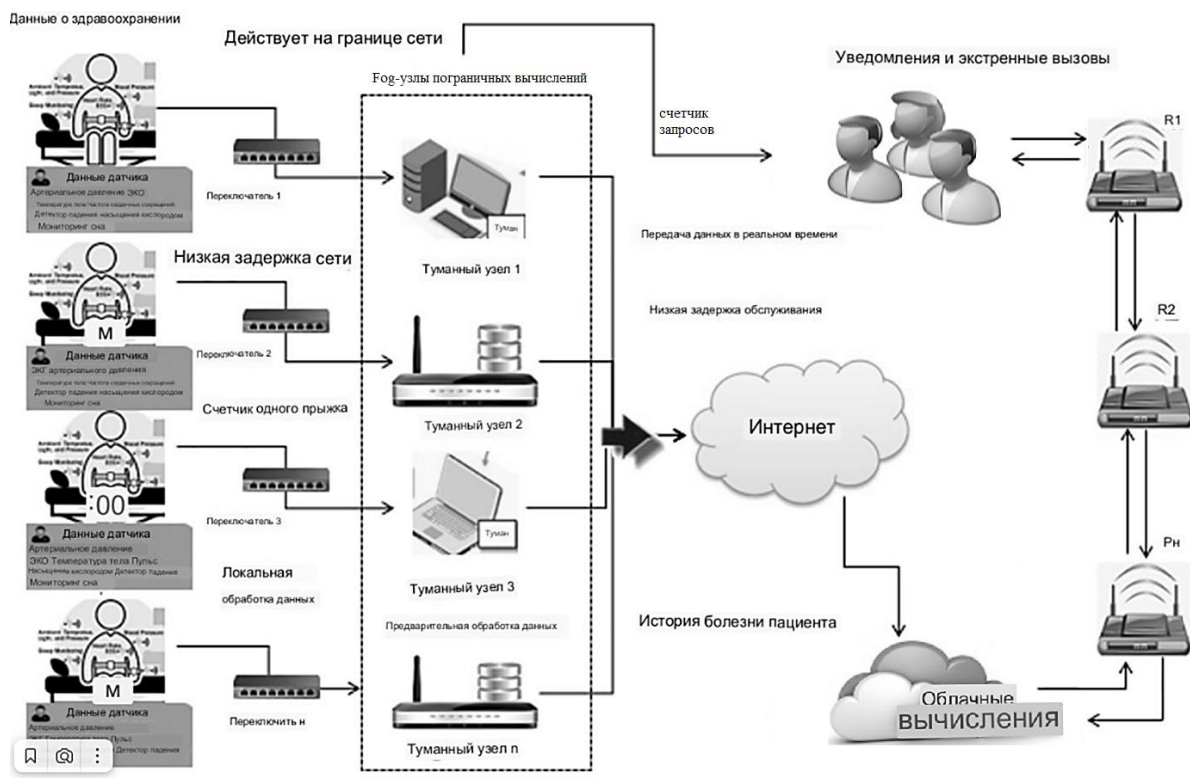


Рисунок 1 – Иллюстрация концепции передачи данных между медицинскими IoT, конечными пользователями и облачными серверами на основе технологии «пограничных» вычислений (нечеткой кластеризации на Fog-узлах)

В главе обосновывается и проектируется усовершенствованная интеллектуальная инфраструктура, выполняющая роль шлюза (Fog-узла) между IoTs и облаком. Этот интеллектуальный шлюз служит для получения идентификатора в режиме реального времени без задержек при коммутации, связи и сетевых задержек между медицинскими IoTs и облачными серверами.

Разработана аналитическая модель на основе нечеткой кластеризации Fuzzy Clustering (FC) для передачи данных IoT в сфере здравоохранения в режиме реального времени конечным пользователям. Модель позволяет туманным узлам (Fog-узлам) определять оптимальные алгоритмы функционирования, выполняя роль своеобразного контроллера.

Введение отношения подобия  $r = \langle X, R \rangle$ , где  $X$  – множество объектов, а  $R$  – отношение сходства между ними, позволяет непосредственно решать задачу кластеризации последовательным применением двух процедур: предварительной и основной кластеризации.

Процедура предварительной кластеризации ориентирована на ее проведение введением на множестве исходных сообщений  $P = \{p^1, p^2, \dots, p^N\}$  отношения сходства  $r$  и осуществления его транзитивного замыкания  $\bar{r}$ . При этом данные о векторах значений признаков  $z^j$  сообщений, входящих в множество  $Z = \{z^1, z^2, \dots, z^N\}$ , хотя непосредственно и не отражаются в  $r$ , но учитываются опосредованным образом при формировании суждений экспертов о сходстве. Процедура включает 5 этапов:

1. Построение отношения сходства  $r$  на множестве сообщений  $P$ .
2. Осуществление транзитивного замыкания – нахождение отношения подобия  $\bar{r}$ .
3. Кластеризация на основе  $\bar{r}$  – разбиение множества  $P$  на  $k$  классов эквивалентности: выбор числа  $k$  осуществляется на основе содержательного неформального анализа задачи.
4. Для каждого из указанных  $k$  классов эквивалентности с использованием нечеткого отношения подобия  $r$  определяется соответствующее ему множество нечетких кластеров и из последнего выделяется такой нечеткий кластер, у которого сумма степеней принадлежности объектов максимальна. Фиксируются степени принадлежности  $m_{ij}$  каждого  $j$ -го объекта к этому нечеткому кластеру.
5. На основе знания векторов значений признаков  $z^j$ , соответствующих каждому сообщению  $p$ , а также степеней принадлежности  $m_{ij}$  определяются точки центров кластеров  $\vec{v}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ .

Основная кластеризация включает 3 этапа.

1. По известным значениям  $m_{ij}$  ( $i=1, 2, \dots, k$ ;  $j=1, 2, \dots, N$ ) определяются центры  $\vec{v}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ . При начале итеративного процесса данный шаг совпадает с 5-м шагом процедуры предварительной кластеризации (определением  $\vec{v}_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$ ).

2. Для каждого объекта  $p^j$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ ) определяются с использованием формулы

$$m_{ij} = \frac{1}{\left(\vec{z}^j - \vec{v}_i\right)^2 \sum_{i=1}^k \frac{1}{\left\|\vec{z}^j, \vec{v}'_i\right\|^2}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\left\|\vec{z}^j, \vec{v}_i\right\|}{\left\|\vec{z}^j, \vec{v}'_i\right\|}\right)^2}, i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, N \quad (1)$$

степень его принадлежности к кластерам  $m_{ij}$ , ( $i=1, 2, \dots, k$ ;  $j=1, 2, \dots, N$ ).

3. Если для всех  $m_{ij}$  выполняется условие

$$\delta(m_{ij}, m'_{ij}) \leq \varepsilon, \quad (2)$$

где  $m_{ij}$  – степени принадлежности, получаемые на данной итерации;

$m'_{ij}$  – степени принадлежности, полученные на предыдущей итерации;

$\delta(m_{ij}, m'_{ij})$  – мера отклонения, например, Манхэттена:

$$\delta(m_{ij}, m'_{ij}) = |m_{ij} - m'_{ij}|;$$

$\varepsilon$  – заданное пороговое значение; если оно превышено, необходимо остановить процесс. В противном случае вернуться к этапу 1.

Таким образом, в соответствии с двумя описанными процедурами осуществляется нечеткая классификация пакета интеллектуального шлюза Fog-уровня вычислений для оптимального направления на конечные узлы облака в режиме реального времени.

В главе представлен алгоритм машинного обучения, который использует систему нечетких выводов для снижения высокой задержки между медицинскими IoT, конечными пользователями и облачными серверами. Классифицируются данные медицинских IoT: с низким, нормальным и высоким риском. Далее в алгоритме используются стратегии нейронных сетей для распределения и выбора пакетов данных в узлах Fog-уровня вычислений. Далее реализуется этап распределения сообщений на конечные узлы в режиме реального времени путем распределения данных в виде марковского процесса принятия решений с учетом контекста сообщений туманных узлов.

Кроме решений задач автоматизированного сбора и обработки данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий и протоколов взаимодействия, технологии медицинского Интернета вещей включают конечный этап анализа – классификацию состояния пациента по данным телеизмерений.

В главе представлена разработанная методика распознавания физиологического статуса пациента на основе нейросетевой классификации вида состояния и технологии Multi-sensor fusion, реализующая параллельное распознавание кривых изменений регистрируемых физиологических параметров пациента различными обнаружителями с последующим комплексированием результатов.

Выделим следующие механизмы вычисления принадлежности состояниям пациента:

– метрические – по критериям минимума *a)* евклидоваго расстояния, *b)* расстояний Чебышёва и Минковского 3-й степени (степень метрики Минковского можно изменять);

– статистические – на основе рассогласования Кульбак-Лейблера;

– на основе максимума нормированной функции кросс корреляции;

– на основе многослойной нейронной сети (НС) прямого распространения с векторной функцией выхода.

Используемая многослойная НС прямого распространения сигнала имеет архитектуру  $\{L, X_1, \dots, X_N, 1\}$ , где  $L$  – размер входного слоя,  $X_1, \dots, X_N$  – размеры скрытых слоев или  $\{ML, X_1, \dots, X_N, 1\}$  – при распознавании по  $M$  первичным признакам, представленным в виде временных рядов данных (рис. 2).

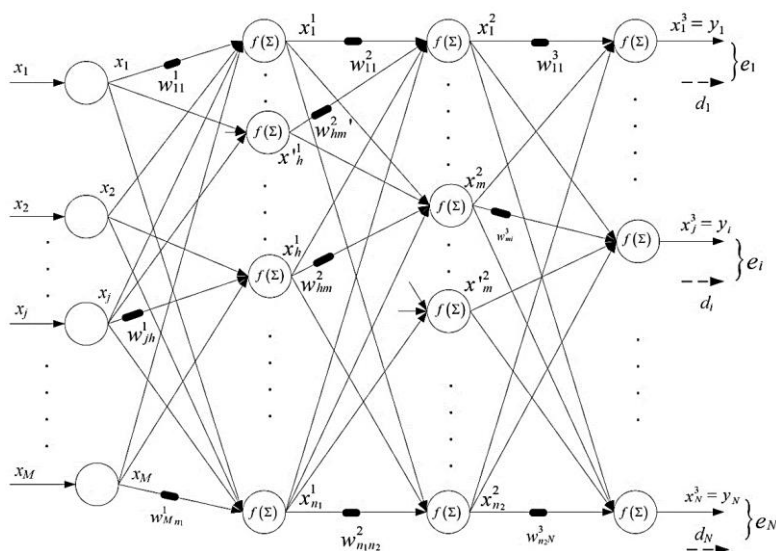


Рисунок 2 – Типовая многослойная НС для комплексирования результатов распознавания пациента с другими обнаружителями

В качестве нормированной корреляционной функции применялась

$$p_I(t_1, t_2) = \frac{K_I(t_1, t_2)}{\sigma_I(t_1)\sigma_J(t_2)} \text{ или } p_I(t_1, t_2) = \frac{K_I(t_1, t_2)}{\sqrt{K_I(t_1, t_1)}\sqrt{K_J(t_2, t_2)}}, \quad (3)$$

где  $I$  – значения отсчетов кривой образца,  $J$  – значения отсчетов кривой эталона.

При обнаружении совпадений двух сигнатур кривых взаимная корреляционная функция для двух фрагментов кривых – окна сканируемой последовательности  $x$  и шаблона  $a$  как коэффициент корреляции между  $x_t$  и  $a_{t+k}$  в зависимости от номера отсчета  $k$  вычислялся параметр

$$r_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} X_t A_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} A_t \sum_{t=1}^{n-k} X_{t+k} / (n-k)}{\sqrt{\left[ \sum_{t=k}^{n-k} A_t^2 - \sum_{t=k}^{n-k} A_t^2 / (n-k) \right] \left[ \sum_{t=k+1}^n X_t^2 - \sum_{t=k+1}^n X_t^2 / (n-k) \right]}}. \quad (4)$$

В том месте, где параметр (4) имел максимальное значение, начиналась реализация искомой сигнатуры данных функционального теле контроля.

В **третьей главе** представлены принципы построения архитектуры и функционирования системы сбора данных на основе технологий туманных вычислений для мониторинга состояния здоровья потребителей телемедицинских услуг. Разработана система сбора данных с носимых датчиков на базе облака в медицинском Интернете вещей, представляющая собой буферную сеть накопителей, к которой обращается сеть серверов (рис. 3).

Облачный сервер Интернета вещей получает данные от шлюза интернета вещей и сохраняет их в облаке. К данным, хранящимся в базе, можно получить доступ позже для дальнейшего анализа, т.е. распознавания состояния пациента.

В представленной архитектуре используются два сегмента сети: LPWAN (Low-Power Wide-Area Network – энергосберегающая сеть дальнего радиуса), включая WBAN (Wireless Body Area Network – беспроводная сетевая структура телесных сенсоров), и буферная, подключаемая к облаку с технологией передачи телеметрии с очередью сообщений (MQTT Message Queuing Telemetry

Transport – протокол телеметрической передачи сообщений). Сообщение и данные от локального брокера MQTT отображаются в локальном пользовательском интерфейсе, а локальный пользовательский интерфейс подпишется на соответствующие разделы. Аналогично сообщение и данные от облачного брокера MQTT будут опубликованы в облачном пользовательском интерфейсе, а облачный пользовательский интерфейс подпишется на нужные адреса необходимых параметров состояния пациентов. В этом случае компьютерные сети передачи данных IoMT становятся подобны (по топологии и размерам) сложным сетям (Complex Network).

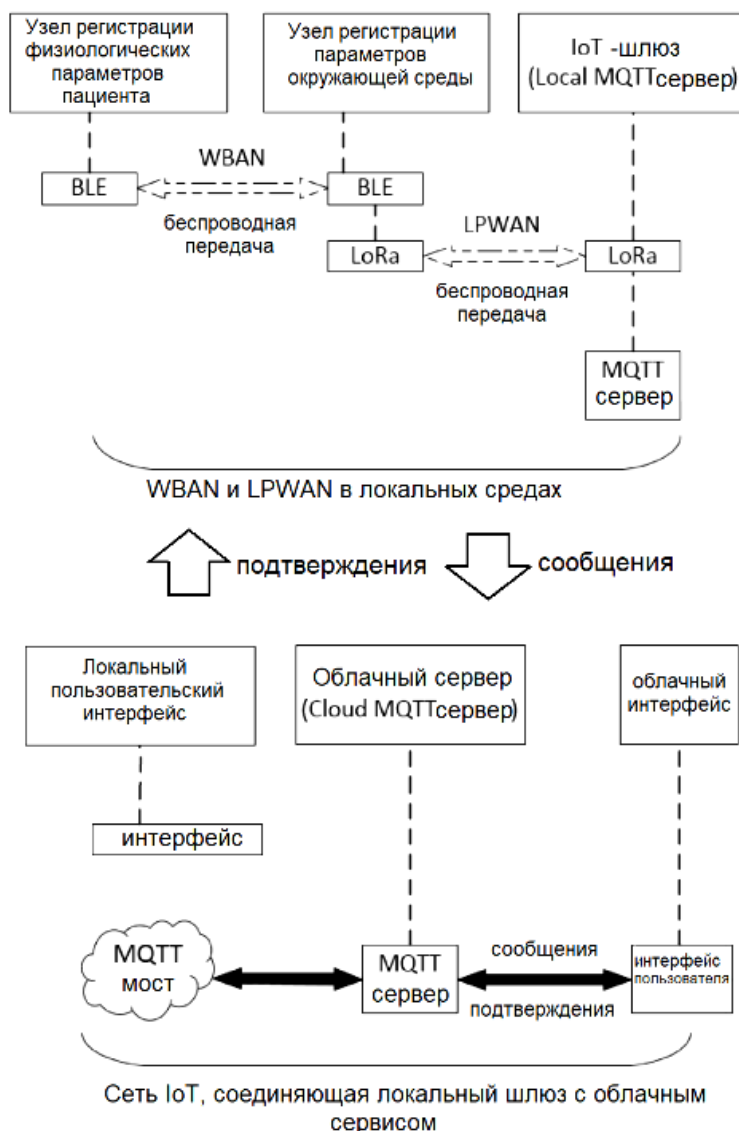


Рисунок 3 – Архитектура системы сбора данных с носимых датчиков на базе облака в медицинском Интернете вещей

В главе описаны принципы функционирования облачных служб, а также анализ номенклатуры носимого оборудования на базе облачного медицинского интернета вещей. Сформированная классификация оборудования IoMT представлена на рис. 4, где в столбце слева приведены основные виды носимого на теле датчика-преобразующего оборудования или устанавливаемого в

области мониторинга человека. Датчики и сенсоры разделены на семь основных категорий: 1) сердечно-сосудистые; 2) датчики окружающей среды; 3) датчики ускорения или положения; 4) дыхательные; 5) датчики считывания электрической активности мозга; 6) датчики скелетных мышц; 7) химические датчики.



Рисунок 4 – Обобщенная классификация оборудования IoT

В **четвертой главе** представлены результаты реализации элементов системы сбора данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий. В процессе практических исследований установлено, что для разработки программного сервиса сообщений для взаимодействия между серверами и шлюзами Интернета вещей и подключенными устройствами сбора данных пациента целесообразно использовать инструментарий, основанный на готовых, проблемно-ориентированных механизмах Firebase Console и Google Cloud, с использованием API и JavaScript и таких функций, как Notifications Composer и Google Analytics. Данные инструменты в отличие от традиционного одностороннего обмена сообщениями (посредством «толстого» и «тонкого» клиентов) обеспечивают персонализированную коммуникацию в реальном времени, облачный обмен сообщениями и необходимые задержки и достоверность передачи сообщений масштабируемому множеству потребителей услуг, предоставляемых телемедицинскими сервисами.

Представлены элементы программного сервиса сообщений для взаимодействия между приложением Интернета вещей и подключенными устройствами сбора данных пациента на основе платформы Firebase (рис. 5 а).

Приведены фрагменты разработки с использованием Firebase Cloud Messaging, как кроссплатформенного решения для обмена, которое позволяет отправлять данные в сервисе сообщений для взаимодействия между приложением Интернета вещей и подключенными устройствами сбора данных пациента.

Представлен макет программного комплекса дистанционного мониторинга электрокардиограммы на основе медицинского Интернета вещей в части программного обеспечения врача для контроля, диагностики и

прогнозирования параметров состояния пациента по данным дистанционных электрокардиографических исследований и сопутствующих физиологических кинематических параметров диагностического фона пациента. Программа решает задачу распознавания аномалий, путем решения последовательности задач кластеризации с разметкой достоверных прецедентов и последующей классификации (рис. 5 б).

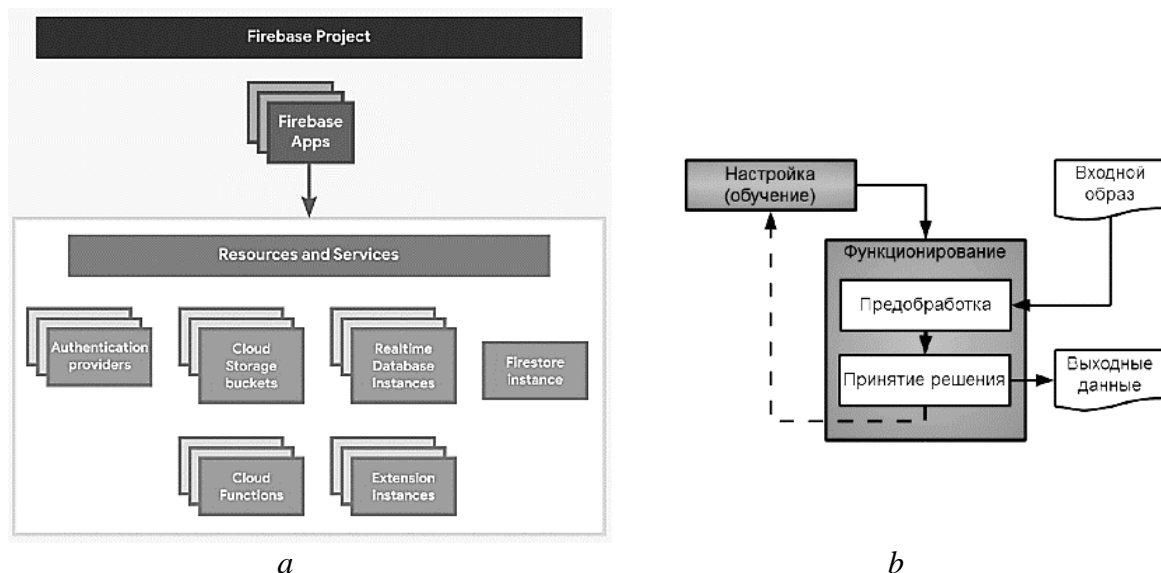


Рисунок 5 – Архитектуры элементов подсистем сбора-передачи и анализа данных:

а) базовая иерархия проекта Firebase;

б) типовая функциональная схема системы распознавания состояния по ЭКГ

На вход программного модуля через сервис облачных сообщений в течение некоторого интервала времени наблюдения пациента, кроме данных электрокардиограммы, поступает массив дополнительных, сопутствующих измерений. Работа с программой осуществляется запуском исполняемого файла \*.exe, загрузки массива данных и выбора типа программной задачи или необходимого алгоритма обработки загруженных данных, при необходимости загружается модель обработки – предобработка/очистка от шума, формирование вектора вторичных признаков, кластеризация, классификация, прогноз состояния пациента. Общий алгоритм работы распределенной системы сбора данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий иллюстрирован на рис. 6, 7.

Также в главе представлены предложения по аппаратному обеспечению системы дистанционного исследования электрокардиограммы пациента на основе медицинского Интернета вещей.

На первом этапе облачный сервис получает сообщения от датчиков медицинского Интернета вещей (IoMT) и выполняет проверку степени загрузки облачных ресурсов. При низкой загрузке данные передаются в облако, где совместно с накопленными массивами производится распознавание состояния пациента с применением нейронной сети. В случае выявления критического состояния формируются уведомления врачу и соответствующие рекомендации заносятся в медицинскую базу данных.

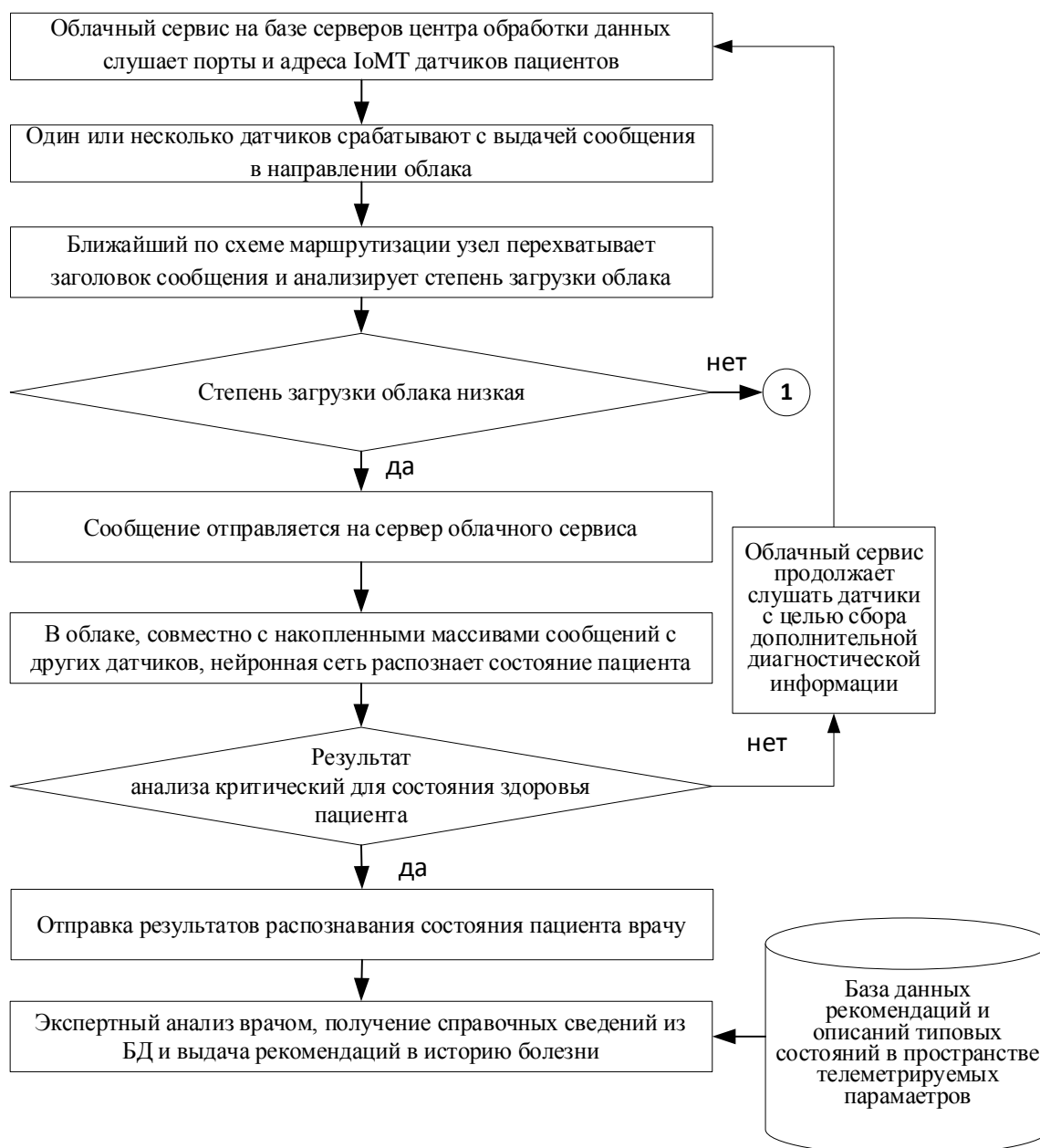


Рисунок 6 – Общая блок-схема алгоритма распределенной системы сбора данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий

При высокой загрузке часть обработки передается на Fog-узлы, что обеспечивает балансировку нагрузки, уменьшение задержек и повышение оперативности анализа данных. Такой подход реализует интеллектуальную маршрутизацию сообщений и многоуровневую обработку медицинской информации.

Fog-узел получает поток сообщений от медицинских датчиков и с помощью алгоритмов нечеткой кластеризации и нейросетевых методов определяет степень важности каждого сообщения. Критические данные передаются в облако для немедленной обработки, тогда как некритические помещаются в очередь и агрегируются в буфере узла. После накопления информации запрашиваются дополнительные сообщения данного типа мониторинга для повышения достоверности анализа. В облаке выполняется

окончательное распознавание состояния пациента, а результаты направляются врачу-эксперту. Такая организация вычислений обеспечивает приоритизацию критически важных данных и сокращение времени отклика системы при массовом трафике устройств IoT.

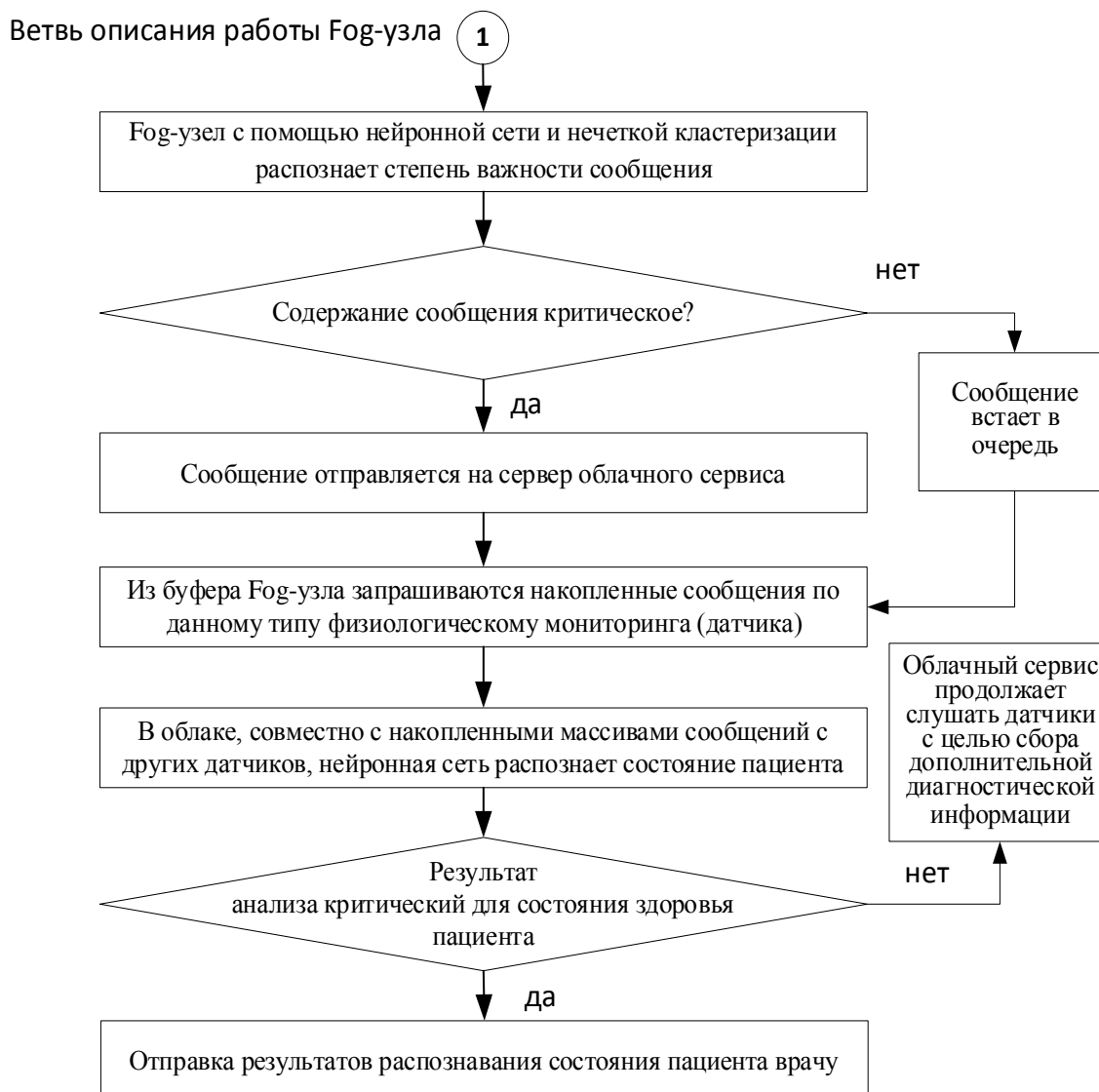


Рисунок 7 – Ветвь анализа Fog-узла в схеме распределенной системы сбора данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий

На рис. 8 представлен пример интерпретируемого отклика нейросетевой (НС) модели на входной вектор  $X$ . НС корректно распознала класс состояния пациента № 8, при этом на графике наблюдаются отдельные ложные импульсы, которые впоследствии устраняются при пороговой фильтрации. Такая визуализация отклика позволяет оценить чувствительность модели к различным компонентам входного сигнала и демонстрирует адекватность обученной НС для распознавания состояний пациентов в реальном времени.

На рис. 9 представлена усреднённая по 30 экспериментам зависимость достоверности распознавания состояния пациента от числа используемых физиологических и фактографических параметров.

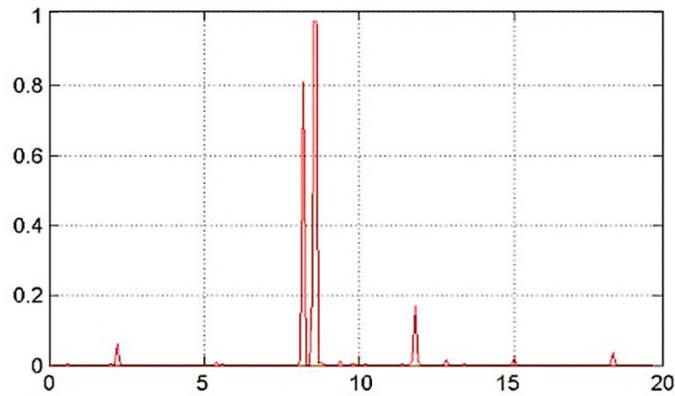


Рисунок 8 – Пример интерпретируемого отклика НС модели на входной вектор  $X$

Результаты показывают, что использование 3–5 основных параметров – частоты пульса, двух кривых кардиограммы, частоты дыхания и фотоплетизмограммы обеспечивает приемлемую точность и рациональные вычислительные затраты. Это соотношение параметров можно считать оптимальным для работы модели в режиме онлайн-мониторинга пациентов в телемедицинском сервисе.

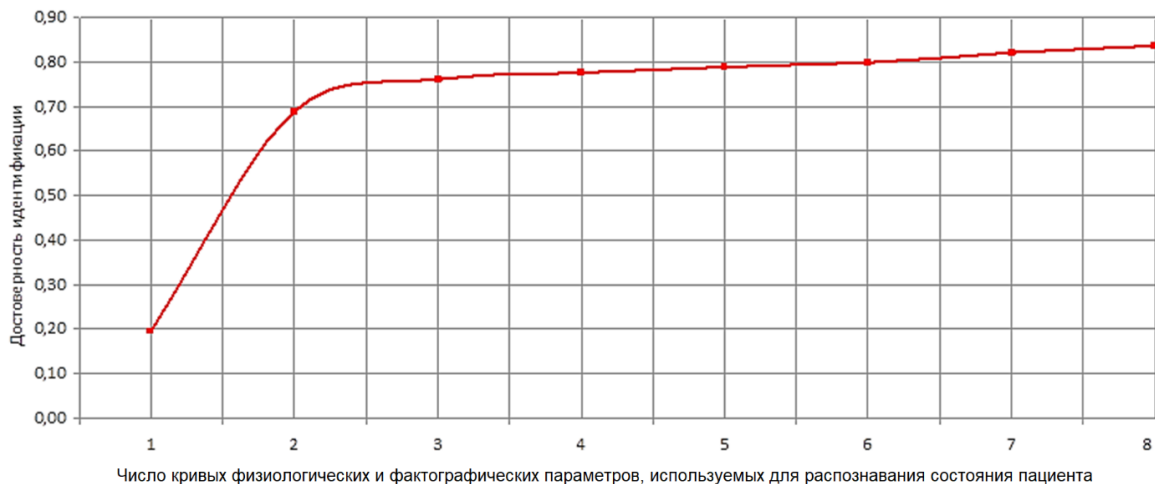


Рисунок 9 – Усредненная зависимость достоверности распознавания от числа кривых параметров на основе протокола наблюдений (обучающей выборки) из 50 пользователей/пациентов

**В заключении** подводятся итоги диссертационного исследования, излагаются его основные выводы и обобщающие результаты по вопросам, составляющим предмет исследования и имеющим как теоретическое, так и практическое значение.

### III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической задачи разработки распределенной системы сбора данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий. Получены следующие результаты:

1. Проведен анализ архитектуры и технологии медицинского Интернета вещей с использованием облачных технологий, показавший, что современные

умные медицинские сенсорные устройства целесообразно подключать к сети поставщиков медицинских услуг для передачи данных на внутренние облачные серверы. Из-за высокой доступности и числа IoT, наиболее критическим элементом становятся безопасность связи для обеспечения защиты конфиденциальности пациента, а также задержки при передаче сообщений из-за неравномерности нагрузок на облачные сервисы. Увеличение времени задержки при передаче данных в обе стороны из-за передачи больших объемов данных и большого трафика между IoT и облачными серверами делает медицинские данные неадекватными для конечных пользователей.

2. Разработана модель работы узлов разгрузки вычислений на базе Fog-узлов, функционирующих на основе нечеткой кластеризации. Модель позволяет туманным узлам (узлам промежуточных, пограничных вычислений) определять оптимальные алгоритмы функционирования, выполняя роль своеобразного контроллера, и состоит из туманных узлов (Fog-узлов), туманных серверов и главного контроллера, с помощью которого конечные пользователи и пациенты могут непосредственно связываться с туманными узлами за малое число итераций запросов-ответов. Предложена новая методика обучения с подкреплением на основе нечеткой логики, использующая стратегии обучения и применения многослойных нейронных сетей для распознавания параметров сообщений и выдачи оптимальных параметров на их маршрутизацию на Fog-уровне.

3. Разработанные модель и алгоритм автоматизированного сбора и обработки данных для мониторинга состояния пациентов с использованием облачных технологий при их применении в сфере Интернета вещей в здравоохранении уменьшают задержку передачи сообщений между медицинскими Интернетом вещей и облачными серверами. Предложенная методика распознавания физиологического статуса пациента на основе нейросетевой классификации вида состояния и технологии Multi-sensor fusion обеспечивает высокую достоверность оценки состояния пациента.

4. Представлена архитектура системы сбора данных с носимых датчиков на базе облака в медицинском Интернете вещей. Рассмотрены основные модели функционирования облачных служб, предназначенные для получения сведений об управлении сетей IoT. Для достоверной классификации состояний пациентов посредством управления измерениями в системе IoT представлены аналитические выкладки определения структуры и параметров подсистемы управления измерениями в облаке.

5. Представлены элементы программного сервиса сообщений для взаимодействия между приложением Интернета вещей и подключенными устройствами сбора данных пациента на основе платформы Firebase. Разработан макет программного комплекса дистанционного мониторинга электрокардиограммы на основе медицинского Интернета вещей в части программного обеспечения врача для контроля, диагностики и прогнозирования параметров состояния пациента по данным дистанционных электрокардиографических исследований и сопутствующих физиологических кинематических параметров диагностического фона пациента.

## Список научных работ, опубликованных по теме диссертации

### *Публикации в изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки России*

1. Аль Насрави Фарис Х.А. Возможности облака здравоохранения / Фарис Х.А. Аль Насрави, Ю.Б. Томашевский // Современная наука: Актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и Технические Науки. – 2022. – № 6. – С. 45-52.
2. Аль Насрави Фарис Х.А. Повышение эффективности интерфейсов «мозг-компьютер», создаваемых на основе сигналов ЭЭГ / М.А.Л. Аль-Духэйдахави, Х.А. Аль Насрави Фарис, Ю.Б. Томашевский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки. – 2022. – № 7. – С. 18-26.
3. Аль Насрави Фарис Х.А. Проектирование носимого оборудования для интернета медицинских вещей (ИОМТ) / Ф.Х.А. Аль Насрави, Ю.Б. Томашевский // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. Естественные и технические науки. – 2022. – № 8. – С. 42-57.
4. Аль Насрави Фарис Х.А. Распределенная система сбора, анализа и обработки данных интеллектуального мониторинга на основе нечеткой кластеризации и машинного обучения / Х.А. Аль Насрави Фарис, Ю.Б. Томашевский // Перспективы науки. – 2025. – № 2. – С. 11-19.

### *Публикации в других научных изданиях*

5. Аль Насрави Фарис Х.А. Опыт и перспективы использования облачных вычислений в здравоохранении различных стран / Х. А. Аль Насрави Фарис, Ю.Б. Томашевский // Проблемы управления в социально-экономических и технических системах: сборник научных статей по материалам XVIII Международной научно-практической конференции, Саратов, 14–15 апреля 2022 года. – Саратов: Издательский центр «Наука», 2022. – С. 197-200.
6. Аль Насрави Фарис Х.А. Интеллектуальные приложения для здравоохранения в сетях 5G. Систематический обзор / Х.А. Аль Насрави Фарис // Научный аспект. – 2023. – № 10. – 8 с.
7. Аль Насрави Фарис Х.А. Анализ медицинского Интернета вещей (ИОМТ) / Х.А. Аль Насрави Фарис // Universum: технические науки. – 2023. – №11. – 26 с.
8. Аль Насрави Фарис Х.А. Архитектура и принципы маршрутизации данных мониторинга состояния пациентов в системе медицинского интернета вещей на основе машинного обучения / Х.А. Аль Насрави Фарис, Ю.Б. Томашевский // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2024. – № 12-3. – С. 37-41.
9. Аль Насрави Фарис Х.А. Современная архитектура и технологии сбора данных о состоянии пациентов с использованием облачных технологий и промежуточных вычислений / Х.А. Аль Насрави Фарис, Ю.Б. Томашевский // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2024. – № 4. – С. 5-11.

Подписано в печать 23.10.2025

Формат 60×84 1/16

Бум. офсет.

Усл. печ. л. 1,0

Уч.-изд. л. 1,0

Тираж 100 экз.

Заказ 41

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, Саратов, ул. Политехническая, 77

Отпечатано в Издательстве СГТУ имени Гагарина Ю.А.

410054, Саратов, ул. Политехническая ул., 77

Тел.: 8(8452) 99-87-39, e-mail: izdat@sstu.ru