

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы Ларгина Александра Васильевича
«Разработка программно-аппаратных средств и метода цифровой обработки
и интеллектуального анализа сигналов электрокардиограммы и
фотоплетизмограммы для прогнозирования уровня артериального давления»,
представленной на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по
специальности 8D06201 – «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Актуальность работы

Современные тенденции развития науки и техники в значительной степени ориентированы на повышение качества жизни каждого члена общества. Инновации активно внедряются в различные сферы человеческой деятельности, начиная от взаимодействия с государственными органами и коммерческими структурами и заканчивая медициной и бытом. Такие новшества позитивно сказываются на уровне жизни населения как косвенно, оптимизируя социальные процессы и логистику, так и непосредственно, улучшая технологии здравоохранения.

В частности, в сфере медицинской техники ключевой задачей становится модернизация процессов и поиск новых методов анализа биомедицинской информации, основанных на внедрении современных научных достижений на каждом этапе работы с данными. Такие действия позволяют снизить уровень осложнений после тяжёлых заболеваний и обеспечивают раннее выявление опасных патологий, поскольку биомедицинские сигналы содержат важную информацию о состоянии организма. Прогнозирование и мониторинг здоровья значительно сокращают уровень негативных последствий для распространённых заболеваний, параллельно снижая нагрузку на медицинские учреждения.

Решение задачи более глубокого и качественного анализа биомедицинской информации стало возможным благодаря серьёзному технологическому росту в области микроэлектроники, вычислительной техники и инфокоммуникационных технологий.

Радиоэлектронной промышленностью налажен выпуск новых высокоинтегрированных систем на кристаллах или систем-на-чипе (SoC). Современные SoC могут включать в себя не только традиционные компоненты, такие как процессор и память, но и специализированные блоки для обработки биомедицинской информации, основанные на модулях высоко-разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Такие АЦП способны одновременно и в реальном времени производить обработку нескольких видов низкоамплитудных биомедицинских сигналов в широком динамическом диапазоне. Кроме этого, в современных SoC встроены модули беспроводной передачи данных, что существенно повышает возможности интеграции оборудования в коммуникационные сети связи.

В свою очередь, совершенствование инфокоммуникационных технологий повысило скорость передачи и эффективность обработки медицинских данных, улучшив диагностику и мониторинг пациентов в

реальном времени. Интеграция таких технологий, как телемедицина, искусственный интеллект и интернет вещей, предоставляет доступ к медицинским услугам жителям отдаленных районов и помогает в решении проблемы нехватки медицинских специалистов.

Достигнутые успехи в указанных областях открывают возможности для реализации методов анализа и алгоритмов цифровой обработки сигналов (ЦОС), которые ранее были недоступны или были известны только в теории и не находили широкого применения на практике. Появилась возможность в исследовании многоуровневой структуры биомедицинских сигналов, посредством создания многоступенчатых алгоритмов обработки данных.

Можно выделить следующие главные преимущества цифровизации при обработке биомедицинской информации:

- возможность создания многоуровневых систем обработки данных на основе итеративных алгоритмов;
- совместимость с различными аппаратными платформами, что дает возможность к развертыванию программного обеспечения (ПО) как на мобильных, так и на стационарных устройствах;
- высокая экономическая эффективность, в следствии возможности модернизации и тиражирования данных цифровых систем;
- цифровая обработка обеспечивает высокую точность при работе с сигналом при максимальной стабильности характеристик по всему спектру;
- гибкость цифровых методов в корректировке параметров обеспечивает их высокую функциональность, что особенно важно в условиях большого разнообразия, применяемых методов извлечения диагностической информации.

На основании вышеизложенного можно утверждать, что современные достижения в указанных областях науки и техники значительно повышают эффективность процессов автоматизации диагностики и мониторинга в медицинском приборостроении. Внедрение новых технологий имеет особую актуальность в борьбе с наиболее опасными и распространёнными заболеваниями, предоставляя медицинским специалистам новые инструменты для поддержки принятия решений.

Развитие технологий в области микроэлектроники и вычислительной техники, современных алгоритмов ЦОС, инфокоммуникационных технологий, а также интеллектуального анализа данных открывает новые возможности для внедрения инноваций в области медицинского приборостроения. При этом, современные социальные вызовы определяют актуальную область для проведения необходимых научных исследований. В частности, проблема мониторинга уровня артериального давления (АД) является чрезвычайно важной, поскольку распространение артериальной гипертензии (АГ) среди населения в настоящее время крайне велико.

По данным исследования 2021 года число людей во всем мире в возрасте от 30 до 79 лет с артериальной гипертензией удвоилось с 331 миллионов женщин и 317 миллионов мужчин в 1990 году до 626 миллионов женщин. и

652 миллионов мужчин в 2019 г. Из доклада Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) от 2023 года следует, что гипертония является одной из основных причин преждевременной смертности во всем мире. 1,28 миллиарда взрослых в возрасте 30 - 79 лет страдают гипертонией, большинство из них (две трети) живут в странах с низким и средним уровнем дохода. По имеющимся оценкам, 46% взрослых с гипертонией не знают о своем заболевании и менее половины взрослых (42%) с гипертонией диагностируются и лечатся. В этом же докладе ВОЗ приводится информация по Республике Казахстан, из которой следует, что за 2019 год распространенность АГ среди взрослого населения составила 42 %, а 64 % смертей от сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) связаны с высоким систолическим АД.

На данный момент для определения АД наиболее широко используются сфигмоманометры, обеспечивающие высокую точность измерения. Данные приборы состоят из манометра для измерения давления воздуха; специальной манжеты, надеваемой на руку пациента, а также нагнетателя воздуха, оборудованного регулируемым клапаном спуска. Применение сфигмоманометра причиняет определенные неудобства пациенту из-за использования манжеты, сдавливающей артерии, в этой связи данный способ неудобен для скрининга, где требуется максимальная простота и быстрота измерений. Кроме этого, сфигмоманометры не могут быть использованы для длительного непрерывного мониторинга АД, так как постоянная компрессия манжеты может повлиять на тонус сосудов и кожных покровов пациента.

В обычной практике для длительного и непрерывного мониторинга АД используется инвазивный метод, при котором катетер вводится в кровеносный сосуд для непосредственного доступа к артерии. Этот метод очевидно болезненный для пациента, имеет противопоказания, требует специализированного оборудования и постоянного наблюдения.

В силу данных обстоятельств, в настоящее время исследователями большое внимание уделяется поиску методов оценки АД, позволяющих обеспечить приемлемый уровень точности, с минимальным дискомфортом для пациента. Большое внимание уделяется методам косвенной оценки АД на основе цифровой обработки и интеллектуального анализа сигналов фотоплетизмограммы (ФПГ) и электрокардиограммы (ЭКГ).

Таким образом, разработка метода неинвазивной оценки уровня АД приемлемой точности без использования манжеты сфигмоманометра и не требующего проведения индивидуальной калибровки, является своевременной и актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка неинвазивного безманжетного метода прогнозирования уровня АД по данным сигналов ФПГ и ЭКГ, снимаемых синхронно. Это позволит создавать новые измерительные приборы для решения задачи скрининга и мониторинга уровня АД без предварительной индивидуальной калибровки и с приемлемой точностью.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Исследование существующих методов оценки уровня АД на этапах сбора, обработки и анализа информации, с целью выявления существенных проблем и особенностей при традиционном мониторинге давления крови.

2. Выполнение анализа сигналов ФПГ и ЭКГ, снимаемых синхронно, с целью выявления наиболее значимых показателей, которые коррелируют с уровнем АД и могут быть использованы для построения информативных признаков.

3. Разработка и поиск эффективных алгоритмов ЦОС для ФПГ и ЭКГ при помощи теоретических и экспериментальных исследований для обеспечения их совместимости с последующими стадиями обработки информации при прогнозировании уровня АД.

4. Формирование репрезентативной базы данных сигналов ФПГ и ЭКГ для обучения моделей машинного обучения (МО) классификатора и регрессора.

5. Разработка и экспериментальное исследование интеллектуальных алгоритмов классификации и регрессии на базе извлекаемых информативных признаков из сигналов ФПГ и ЭКГ для прогнозирования параметров АД.

6. Синтез программно-аппаратного комплекса для прогнозирования уровня АД на базе разработанных методов цифровой обработки и интеллектуального анализа сигналов ФПГ и ЭКГ, снимаемых синхронно.

Методы исследования

Для выполнения задач, поставленных в рамках диссертационного исследования, были использованы радиотехнические методы ЦОС, инструменты спектрального и вейвлетного анализа, а также интеллектуальные алгоритмы прогнозирования и распознавания образов. Кроме того, применялись методы математического моделирования, линейной алгебры и статистической радиотехники.

В процессе проведения экспериментальных исследований активно применялись технологии машинного обучения (МО), компьютерного моделирования и автоматизации математически расчетов.

Было проведено проектирование схмотехнических решений для оптимизированных узлов регистрационной аппаратуры, созданной на базе современных радиоэлектронных компонентов.

Предметом исследования является техническое и методологическое обоснование, а также создание инновационных решений для прогнозирования показателей АД с использованием современных технологий обработки сигналов и инструментов теории МО.

Объектом исследования являются процессы извлечения, обработки и интерпретации диагностической информации из сигналов ЭКГ и ФПГ.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих положениях и результатах:

1. Разработаны эффективные алгоритмы цифровой обработки сигналов ФПГ и ЭКГ для обеспечения их совместимости с последующими этапами обработки информации при прогнозировании уровня АД.

2. Сформирован подход к выделению значимых информативных признаков из сигналов ФПГ и ЭКГ для оценки АД.

3. На базе инструментов МО разработана интеллектуальная модель классификатора, позволяющая на основе данных сигналов ФПГ и ЭКГ детектировать три уровня АД: низкое, нормальное и высокое.

4. При помощи алгоритмов интеллектуального анализа данных разработаны регрессионные модели, позволяющие прогнозировать параметры систолического, диастолического и среднего АД на основе характеристик сигналов ФПГ и ЭКГ.

5. Реализован программно-аппаратный комплекс для прогнозирования в реальном времени параметров АД по данным сигнала ФПГ с пальца руки и сигнала ЭКГ в первом стандартном отведении, снимаемых синхронно.

Практическая значимость

Практическая значимость работы заключается в возможности использования достигнутых в исследовании результатов для построения эффективных систем прогнозирования АД как для скрининговых исследований, так и для продолжительного мониторинга.

Благодаря методу, предложенному в работе, появляется возможность создания общедоступных систем определения АД, используемых в домашнем мониторинге и работающих с приемлемой точностью. Этому способствует предлагаемый в работе подход по использованию самообучающихся интеллектуальных алгоритмов для анализа сигналов ФПГ и ЭКГ.

Реализованные аппаратные и программные инструменты оценки уровня АД из-за своей компактности и интегрируемости могут быть встроены в распространенные устройства носимой электроники, такие как смартфоны, фитнес-браслеты или электронные часы. Широкое распространение портативных и удобных систем оценки уровня АД даст следующие важные преимущества:

- возможность вовремя предпринимать превентивные меры для предотвращения развития ССЗ;

- разработка персонализированных планов лечения и управления здоровьем, с учетом уникальных характеристик каждого человека;

- снижение вероятности серьезных последствий из-за повышенного АД;

- возможность сбора данных и отправки лечащему врачу в реальном времени, при различных условиях и нагрузках на организм;

- улучшение качества жизни пациентов, за счет предотвращения прогрессирования заболеваний и уменьшения необходимости в экстренной медицинской помощи.

Связь с государственными программами

Разработка программно-аппаратных средств и методов прогнозирования параметров артериального давления способствует достижению целей стратегии «Казахстан-2050», направленной на повышение продолжительности и качества жизни казахстанцев. Инновационные подходы в диагностике и мониторинге сердечно-сосудистых заболеваний обеспечат

раннее выявление рисков и своевременное вмешательство, что является важным шагом в реализации стратегических задач страны.

Данное диссертационное исследование, соответствует приоритетам государственных программ в области здравоохранения Республики Казахстан. В частности, работа отвечает задачам государственной программы развития здравоохранения на 2020-2025 направленной на улучшение здоровья населения и снижение заболеваемости и смертности от хронических неинфекционных заболеваний, включая ССЗ.

Исследование вносит значительный вклад в развитие медицинских технологий, включая телемедицину и мобильное здравоохранение. Создание программно-аппаратного комплекса на базе разработанного метода позволит осуществлять дистанционный мониторинг состояния пациентов, что особенно актуально в условиях пандемий и ограниченного доступа к медицинским учреждениям.

Социально-экономическая значимость данного исследования заключается в снижении затрат на лечение и реабилитацию пациентов за счет точной диагностики и профилактики осложнений. Это способствует уменьшению частоты госпитализаций и снижению нагрузки на систему здравоохранения, что имеет важное экономическое значение для Республики Казахстан.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Многоступенчатый алгоритм цифровой обработки ФПГ и ЭКГ, позволяющий извлекать из синхронно зарегистрированных сигналов значимые информативные признаки для прогнозирования уровня АД.

2. Метод интеллектуального анализа данных на базе разработанной модели классификатора для детектирования трех уровней АД: низкого, нормального и высокого.

3. Метод интеллектуального анализа данных на базе разработанных регрессионных моделей для прогнозирования параметров систолического, диастолического и среднего АД.

4. Программно-аппаратный комплекс для прогнозирования в реальном времени параметров АД по данным сигнала ФПГ с пальца руки и сигнала ЭКГ в первом стандартном отведении, снимаемых синхронно.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: Международной научно-практической конференции «Тенденции развития естественных и технических наук в современном мире» (Казахстан, 2022); Международной научно-практической конференции «Цифровая трансформация Казахстана: цели, задачи и ключевые факторы успеха» (Казахстан, 2021); Международной научно-практической конференции «Молодежь и наука» (Казахстан, 2021).

Публикации

Основные результаты диссертационного исследования были отражены в 5 научных работах, в том числе в 3-х статьях в научных журналах, входящих в Перечень научных изданий, рекомендуемых для публикации основных

результатов научной деятельности, утверждаемый уполномоченным органом; в 2-х статьях в международных научных журналах, имеющих показатель процентиля по CiteScore (СайтСкор) не менее 35-ти в базе данных Scopus (Скопус); в 3-х работах, отраженных в трудах международных научных конференций, а также в авторском свидетельстве.

Личный вклад автора

Основные экспериментальные, теоретические и практические результаты, полученные в ходе проведения диссертационного исследования, получены автором самостоятельно. В опубликованных научных работах в составе коллектива соавторов, соискателю принадлежит основной вклад при получении, обобщении и анализе достигнутых результатов.

Структура диссертации

Данная диссертационная работа состоит из вводной части, основной части, включающей четыре раздела, заключения, списка использованных источников и приложения. Работа изложена на 102 страницах компьютерного текста, включает 50 рисунков, 13 таблиц и 98 наименований библиографических источников.

В первом разделе диссертационной работы проведен анализ существующих методов косвенной оценки АД, не требующих манжеты, с использованием сигналов ФПГ и ЭКГ. Приведены математические модели, связывающие эластичность сосудистых стенок, толщину стенок, диаметр сосудов и плотность крови с параметрами пульсовой волны для определения уровня АД. Показана необходимость калибровки существующих моделей для повышения точности прогнозирования и приведены предложения по разработке метода, не требующего предварительной калибровки, для скрининга и непрерывного мониторинга АД.

В разделе также приведены международные стандарты классификации артериальной гипертензии (АГ). На их основе представлены таблицы градации уровня АД по систолическому и диастолическому давлениям, что необходимо для стандартизации диагностики и мониторинга. Рассмотрена биофизическая природа сигналов ФПГ и ЭКГ, описаны их морфологические характеристики и особенности, связанные с сердечно-сосудистой системой. Описаны различные виды помех, возникающих при регистрации сигналов, включая низкочастотные (НЧ) и высокочастотные (ВЧ) помехи.

Проведенный в данном разделе анализ позволяет выявить недостатки существующих методов безманжетного определения уровня АД и обосновывает необходимость разработки более точных и универсальных моделей, которые могли бы применяться для ранней диагностики и мониторинга артериальной гипертензии на основе данных сигналов ФПГ и ЭКГ.

Во втором разделе диссертационной работы рассмотрены подходы к разработке процесса цифровой обработки сигналов ФПГ и ЭКГ для оценки АД. Описана структура ЦОС, включающая этапы фильтрации, нормализации, выделения информативных признаков и их подготовка для моделей машинного обучения (МО).

Проведен анализ алгоритмов фильтрации ВЧ и НЧ помех. Для удаления ВЧ-шумов использованы фильтры Баттерворта с нулевым фазовым сдвигом, а для НЧ-помех – вейвлетная фильтрация. Описаны методы двунаправленной фильтрации и вейвлетного преобразования для минимизации фазовых искажений в синхронно записанных сигналах, что позволяет повысить точность анализа.

Этап селекции морфологических компонентов включает автоматическое обнаружение пиков и характерных точек, таких как зубец R на ЭКГ, систолический максимум и минимум на ФПГ, что обеспечивается алгоритмом многомасштабного определения пиков. Предложен метод на основе взаимной корреляции для расчета времени распространения пульсовой волны (ВРПВ) между сигналами ЭКГ и ФПГ. Введены дополнительные информативные признаки, связанные с жесткостью сосудов, отражением пульсовой волны и др., формирующие признаковое пространство для обучения моделей МО.

В третьем разделе диссертации представлен метод интеллектуального анализа ФПГ и ЭКГ сигналов для прогнозирования уровня АД. Обоснована целесообразность использования выбранных алгоритмов МО для решения поставленных задач. Рассмотрен процесс формирования базы признаков, включающей 25 информативных параметров, таких как ВРПВ, частота сердечных сокращений, а также данных, извлеченных из сигнала ФПГ. Проведена фильтрация выбросов для устранения артефактов, что позволило улучшить качество прогнозирования. Описаны методы классификации уровня АД на основе моделей случайного леса, k-ближайших соседей и экстремально случайных деревьев, при этом лучшей по показателям качества оказалась модель классификатора экстремально случайных деревьев (ERTC), адаптированная под дисбаланс классов с использованием алгоритма SMOTE.

Также предложен метод стекинга для регрессионного прогнозирования уровня АД, где метамодель на основе XGBoost сочетает преимущества нескольких моделей, обеспечивая более точное прогнозирование систолического, диастолического и среднего АД. Достигнутые показатели качества моделей соответствуют требованиям стандартов британского общества гипертонии (BHS) и частично ANSI/AAMI SP10, что подтверждает применимость предложенного метода для определения величины АД. Описана общая структура метода оценки параметров АД при помощи интеллектуального анализа сигналов ФПГ и ЭКГ.

В четвертом разделе описана разработка программно-аппаратного комплекса (ПАК) для оценки параметров АД на основе разработанного метода интеллектуального анализа сигналов ФПГ и ЭКГ. Основой для создания комплекса послужили принципы энергоэффективности, помехозащищённости, использования современных систем на кристалле (SoC), а также специализированных биосенсоров.

Аппаратная часть ПАК построена на системе на кристалле ESP32-WROOM-32 и биосенсоре MAX86150, который обеспечивает синхронную регистрацию ЭКГ и ФПГ сигналов. Беспроводная передача данных

реализована через Bluetooth, а также через протокол ESP-NOW для увеличения зоны покрытия. Программная часть, работающая на ПК под ОС Windows или Linux, включает графический интерфейс.

ПАК предполагает интеграцию в инфокоммуникационные медицинские системы с возможностью передачи данных о параметрах АД на удаленные серверы. Комплекс успешно протестирован в составе экспериментального медицинского робота-ассистента, разработанного для измерения АД у пациентов карантинных стационаров.

В заключении предоставлены выводы по результатам исследования.

Работы опубликованные по теме диссертации.

1. Savostin A., Tuleshov A., Koshekov K., Savostina G., Largin A. Devising a method for predicting a blood pressure level based on electrocardiogram and photoplethysmogram signals Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – Vol. 5, No. 2. – P. 62-74. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265066>.

2. Seidakhmet A., Tuleshov A., Jamalov N., Koshekov K., Abduraimov A., Largin A., Zhauyt A. Design of a complex of medical service robots and analysis of transmission characteristics of drives Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – Vol. 20, No. 4. – P. 1242-1253. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes0-38656>.

3. Савостин А.А., Ларгин А.В., Савостина Г.В., Риттер Д.В., Кошекков А.К. Метод автоматического детектирования характерных точек пульсовой волны. Труды Карагандинского технического университета им. Абылкаса Сағынова. – 2024. – №1 (94). – С. 508-510. DOI 10.52209/1609-1825_2024_1_508.

4. Савостин А.А., Ларгин А.В., Савостина Г.В., Риттер Д.В., Кошекков А.К. Разработка измерительного устройства для оценки уровня кровяного давления по данным сигналов электрокардиограммы и фотоплетизмограммы. Вестник КазАТК. – 2023. – № 2 (125). – С. 354-362. DOI: <https://doi.org/10.52167/1609-1817-2023-125-2-354-362>.

5. Савостин А.А., Савостина Г.В., Ларгин А.В. Анализ методов подавления сетевой наводки в задачах цифровой обработки электрокардиографических сигналов Труды Карагандинского технического университета им. Абылкаса Сағынова. – 2022. – №1 (92). – С. 291-296. DOI 10.52209/1609-1825_2022_2_291.

6. Абдуалиев Е.О., Савостин А.А., Ларгин А.В. Система двухфакторной идентификации сотрудников предприятия Тенденции развития естественных и технических наук в современном мире: материалы международной научно-практической конференции. – Петропавловск: СКУ им. М. Козыбаева, 2022. – С. 502-503.

7. Савостин А.А., Ларгин А.В., Савостина Г.В. Обзор современного состояния и перспективы развития методов автоматического анализа и классификации электрокардиосигналов Молодежь и наука – 2021: материалы международной научно-практической конференции. – Петропавловск: СКУ им. М. Козыбаева, 2021. – С. 380-383.

8. Сейдахметов Б.К., Кошеков К.Т., Савостин А.А., Анаятова Р.К., Ларгин А.В. Автоматическое распознавание психоэмоционального состояния диктора с использованием технологии deep learning. Цифровая трансформация 2021: материалы конференции. – Алматы: Академия гражданской авиации, 2021. – С. 28-31.

9. Свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом. № 29850 от «31» октября 2022 года. Кошеков К.Т., Федоров И.О., Савостин А.А., Тулешов А.К., Ларгин А.В. Метод прогнозирования уровня кровяного давления по данным сигналов электрокардиограммы и фотоплетизмограммы.