На правах рукописи

Павликов Артем Евгеньевич

Разработка методов и алгоритмов оценки паттернов движения человека на основе обработки визуальной информации

Специальность 2.3.8.
«Информатика и информационные процессы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре «Математическая кибернетика и информационные технологии» ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ).

Научный руководитель:	кандидат технических наук, доцент **Городничев Михаил Геннадьевич**
Официальные оппоненты:	**Иващенко Антон Владимирович,** доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО "СамГМУ" Минздрава России, директор Передовой медицинской инженерной школы "Цифровое здравоохранение, нейротехнологии и биотехнологии"
	Обухов Артём Дмитриевич, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО "ТГТУ", профессор кафедры "Системы автоматизированной поддержки принятия решений"
Ведущая организация:	ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» (Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования)

Защита состоится 19.02.2026 в 14:30 на заседании диссертационного совета 55.2.002.02 на базе ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский технический университет связи и информатики» (МТУСИ) по адресу: Москва, ул. Авиамоторная 8А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте МТУСИ: https://dis.mtuci.ru/dis/02/

Автореферат разослан _____.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.002.02
(приказ ректора МТУСИ от 18.11.2025
г., №273-о)
доктор физико-математических наук Сергей Юрьевич Казанцев

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последние десятилетия наблюдается устойчивый рост показателя DALY для неврологических заболеваний, включая инсульт, неонатальную энцефалопатию и болезнь Альцгеймера, что обусловлено снижением среднего возраста пациентов и ростом инвалидизирующих состояний. Пациенты с поражениями нервной системы нуждаются в длительной, адаптивной реабилитации, требующей персонализированного подхода и участия специалистов. Однако существующие методы оценки двигательной функции (в том числе гониометрия и визуальный анализ) подвержены субъективности и не позволяют отслеживать динамику движений в реальном времени. Высокоточные оптические системы остаются ограниченно доступными из-за высокой стоимости и сложности эксплуатации.

Современные технологии компьютерного зрения, — в современной науке для обозначения этой задачи закрепилось устойчивое выражение **«оценка позы человека» (Human Pose Estimation, HPE)**,— позволяют на основе обычных видеокамер отслеживать биомеханические параметры движения, сочетая точность с доступностью, что делает их перспективными для применения в домашних и клинических условиях. Это особенно важно в контексте ограниченного доступа к реабилитационным услугам в удалённых регионах Российской Федерации: более 60 % специализированных реабилитационных центров сосредоточены в городах, в то время как население отдаленное от урбанизированных центров сталкивается с нехваткой специалистов по реабилитации и трудностями транспортировки маломобильных граждан. Внедрение автоматизированных решений с элементами телереабилитации может снизить нагрузку на медицинский персонал, повысить мотивацию пациентов к восстановлению и обеспечить объективный мониторинг восстановления.

Исследование направлено на разработку доступных и надёжных методов оценки положения тела, пригодных для интеграции в персонализированные реабилитационные протоколы и обеспечивающих объективную биомеханическую оценку в условиях ограниченных ресурсов.

Степень разработанности темы исследования. К ключевым российским исследователям относятся Ю. В. Проничкин и М. И. Кумсков, предложившие постановку проблемы оценки позы человека как задачу пиксельной классификации на основе глубоких нейронных сетей; М. Г. Воловик, В. В. Борзиков, А. Н. Кузнецов, Д. И. Базаров и А. Г. Полякова, выполнившие обзор интеграции виртуальной реальности в комплексную медицинскую реабилитацию пациентов с ограниченными возможностями. Иностранные исследователи А. Тошев и К. Седжеджи разработали алгоритм DeepPose для регрессионного определения координат суставов; А. Ньюэлл, К. Янг и Д. Дэнг предложили архитектуру Stacked Hourglass

для многоуровневой агрегации контекста в 2D HPE; Ч. Цао, Г. Идальго, Т. Саймон, Ш. Вэй и Я. Шейх создали систему OpenPose на основе Part Affinity Fields; В. Базаревский, И. Грищенко и К. Равендран реализовали лёгкие модели BlazePose и MoveNet для on-device HPE, работающие в реальном времени на мобильных устройствах. Несмотря на достигнутые успехи, в области оценки позы человека, остаются нерешенные задачи и перспективные направления для дальнейших исследований:

- **Реконструкция позы человека в реальных условиях:** разработка методов, обеспечивающих устойчивость к изменениям внешних факторов (ракурс, освещение, частичные перекрытия) при сохранении точности восстановления скелетной конфигурации.
- **Классификация типовых ошибок выполнения упражнений:** требуются практичные методы выявления и валидации ошибок вроде недобора амплитуды, компенсаций корпусом и асимметрий с воспроизводимыми метриками качества на реабилитационных сценариях.
- **Энергоэффективные модели для встраиваемых систем:** Необходимы лёгкие модели, работающие в реальном времени на мобильных устройствах с минимальной латентностью и без передачи медицинских данных.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности программно-аппаратных комплексов персонализированной реабилитации посредством разработки методов и алгоритмов оценки паттернов движения человека на основе обработки визуальной информации.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Исследовать существующие методы цифровой обработки визуальной информации применяемые для объективной оценки амплитудно-скоростных характеристик двигательных паттернов человека.
2. Разработать метод и алгоритмическое обеспечение оценки амплитудно-скоростных характеристик состояния плечевого сустава посредством обработки визуальной информации.
3. Разработать метрики цифровой обработки визуальной информации для оценки паттернов движений верхнего плечевого пояса.
4. Разработать метод и алгоритмическое обеспечение для оценки двигательных паттернов при нарушениях функции верхней конечности.
5. Спроектировать архитектуру и разработать автоматизированную информационную систему поддержки принятия врачебных решений реализующую разработанные методы и алгоритмы.

Объектом исследования являются информационные процессы, методы и технологии цифровой обработки визуальной информации, а

также автоматизированные информационные системы, обеспечивающие поддержку принятия решений в медицинской реабилитации пациентов с нарушениями функции верхнего плечевого сустава.

Предметом исследования являются методы, алгоритмы и программно-технические средства цифровой обработки визуальной информации и интеллектуальной поддержки принятия решений, обеспечивающие автоматизированную оценку стереотипа движений верхнего плечевого пояса.

Методы исследования. Для решения поставленных задач использовались методы автоматической обработки визуальных данных, машинного и глубокого обучения, статистического анализа, а также методы цифровой обработки сигналов.

Научная новизна результатов диссертации заключается в совокупности взаимосвязанных алгоритмических, программных, технических и организационных решений, направленных на повышение доступности персонализированных реабилитационных технологий для пациентов находящихся на третьем этапе медицинской реабилитации.

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие оригинальные научные результаты:

1. Разработаны метод и алгоритмическое обеспечение цифровой обработки визуальной информации, *отличающиеся* от существующих тем, что реализуют безмаркерную оценку позы человека, *позволяющие* извлекать амплитудно-скоростные характеристики движения в режиме реального времени (2.3.8, п.4).
2. Разработан метод интеллектуального анализа пространственно-временных паттернов движений посредством обработки визуальной информации, *отличающийся* от существующих реализацией оценки траекторий ключевых точек движения, *позволяющий* автоматически классифицировать типы отклонений кинематико-скоростных профилей движения верхней конечности (2.3.8, п.4).
3. Разработано алгоритмическое обеспечение локальной и распределённой обработки медицинских визуальных данных, *отличающееся* модифицированной компактной нейросетевой моделью, *позволяющее* выполнять весь вычислительный цикл на стороне клиента без серверной обработки (2.3.8, п.6).
4. Разработана архитектура автоматизированной информационной системы поддержки принятия врачебных решений, *отличающаяся* микросервисной архитектурой с включением модулей оценки паттернов движения по монокулярному зрению, *позволяющая* реализовать цикл «наблюдение–оценка–адаптация» и динамически корректировать реабилитационный протокол упражнений по объективным кинематическим признакам (2.3.8, п. 16).

Теоретическая и практическая значимость исследования определяется разработкой и формализацией методов цифровой обработки визуальной информации, предназначенных для безмаркерного извлечения амплитудно-скоростных параметров движений верхнего плечевого пояса и интеллектуального анализа их пространственно-временных паттернов. Предложенные алгоритмы расширяют существующие модели оценки позы человека, уточняют границы применимости графовых представлений скелетных данных к медицинским движениям и закладывают основу для построения энерго- и трафикоэффективных распределённых систем телереабилитации. Практическая значимость заключается в создании алгоритмического комплекса, реализованного в составе автоматизированной информационной системы (АИС) для домашних реабилитационных мероприятий. Система обеспечивает количественно-качественную оценку движений на оконечном устройстве, формирует персонализированные рекомендации пациенту и передаёт врачу объективные данные для дистанционного мониторинга.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Метод и алгоритмическое обеспечение цифровой обработки визуальной информации, *позволяющее* извлекать амплитудно-скоростные параметры ключевых сегментов плечевого пояса в реальном времени при средней задержке обработки кадра не более 40 мс.
2. Метод интеллектуального анализа пространственно-временных паттернов движений, *позволяющий* автоматически классифицировать типы отклонений кинематико-скоростных профилей движения верхней конечности с точностью не менее 92 %.
3. Алгоритмическое обеспечение локальной и распределённой обработки медицинских визуальных данных, *позволяющее* выполнять полный цикл обработки на конечном устройстве с передачей в сеть только агрегированных результатов, сокращая сетевой трафик не менее чем на 80% без снижения точности оценки.
4. Архитектура автоматизированной информационной системы поддержки принятия врачебных решений, *позволяющая* сократить время формирования персонализированной программы реабилитации до 2 минут и обеспечивающая непрерывный мониторинг процесса восстановления пациента.

Степень достоверности и апробации результатов работы обеспечивается использованием в качестве базы современных методов и моделей, применяемых для построения скелетных моделей человека. Математическую основу исследования составляют адаптированные для решения поставленных задач методы анализа данных, машинного обучения и математической статистики. Результаты были представлены на ряде Российских и международных конференций:

– 2024 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications;
– 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications;

Результаты также обсуждались на заседании кафедры, а также на научных семинарах в МТУСИ.

Личный вклад.

В ходе исследования автором лично были разработаны и реализованы ключевые подходы, направленных на повышение эффективности и доступности реабилитационных технологий для пациентов находящихся на третьем этапе медицинской реабилитации:

– Разработаны метод и алгоритмическое обеспечение цифровой обработки визуальной информации, обеспечивающие извлечение амплитудно-скоростных параметров сегментов плечевого пояса с пропускной способностью ≥ 25 кадров/с на бытовых устройствах.
– Создан метод интеллектуального анализа пространственно-временных паттернов движений, реализующий классификацию отклонения от эталонных кинематико-скоростных профилей движения верхней конечности не ниже с точностью 92%;
– Разработано программно-алгоритмическое обеспечение локальной и распределённой обработки медицинских визуальных данных, позволяющее выполнять полный цикл обработки на конечном устройстве с передачей в сеть только агрегированных результатов и сокращать сетевой трафик на 80% без заметной потери точности;
– Спроектирована и внедрена архитектура автоматизированной информационной системы (АИС) поддержки принятия врачебных решений, что сократило время формирования персонализированной программы реабилитации до 2 минут.
– Организованы и проведены экспериментальные исследования, включающие лабораторные тесты на стендах и пилотное внедрение у 80 пациентов третьего этапа реабилитации; полученные результаты подтвердили соответствие заявленным критериям точности, производительности и удобства использования.

Реализация и внедрение. Алгоритмы и архитектура программно-аппаратного комплекса, разработанные в настоящей работе, внедрены в следующих организациях:

– ООО "Басалдук"
– ООО "ЦМР"

Также разработанное алгоритмическое обеспечение внедрено в учебный процесс кафедры "Математическая кибернетика и информационные технологии"МТУСИ. Подтверждается соответствующими актами внедрения результатов диссертационной работы.

Соответствие специальности. Тематика и результаты диссертации соответствуют следующим направлениям специальности: 2.3.8. «Информатика и информационные процессы».

п.4. «Разработка методов и технологий цифровой обработки аудиовизуальной информации с целью обнаружения закономерностей в данных, включая обработку текстовых и иных изображений, видео контента. Разработка методов и моделей распознавания, понимания и синтеза речи, принципов и методов извлечения требуемой информации из текстов».

п.6. «Обеспечение информационных систем и процессов, применения информационных технологий и систем в принятии решений на различных уровнях управления. Общие принципы и основы организации информационных служб и электронных библиотек».

п.16. «Автоматизированные информационные системы, ресурсы и технологии по областям применения (научные, технические, экономические, образовательные, гуманитарные сферы деятельности), форматам обрабатываемой, хранимой информации. Системы принятия групповых решений, системы проектирования объектов и процессов, экспертные системы и др.».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 научных работ, из них 6 научных статьей, из которых 3 в научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в периодических научных журналах индексируемом Scopus — 3, в том числе 2 работы опубликованы без соавторов, получены 6 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность темы, обусловленная необходимостью повышения эффективности медицинской реабилитации пациентов с поражениями нервной системы посредством объективной цифровой оценки движений. Определены объект, предмет, цель и задачи исследования, направленные на разработку методов и алгоритмов обработки визуальной информации для автоматизированной оценки двигательных паттернов верхнего плечевого пояса.

Выделена научная новизна, заключающаяся в создании методов интеллектуального анализа пространственно-временных характеристик движений и алгоритмического обеспечения локальной и распределённой обработки визуальных данных. Практическая ценность исследования состоит в разработке и внедрении автоматизированной информационной системы, обеспечивающей количественно-качественную оценку движений

и поддержку принятия врачебных решений в условиях домашней телереабилитации. Кратко изложено содержание диссертации по главам: анализ существующих методов оценки позы человека, разработка методов и алгоритмов цифровой обработки визуальной информации, формирование набора метрик и разработка метода и алгоритмического обеспечения оценки двигательных паттернов, а также построение архитектуры программного комплекса. Результаты исследования апробированы на международных конференциях и внедрены в клиническую практику.

В **первой главе** проведён анализ существующих методов количественной оценки положения тела человека, применяемых в медицинской реабилитации. Рассмотрены традиционные клинико-функциональные шкалы, гониометрия и фотограмметрия, выявлены их ограничения, связанные с низкой временной и пространственной разрешающей способностью, субъективностью экспертных оценок и высокой трудоёмкостью измерений. Показано, что данные методы недостаточны для объективного мониторинга динамики движений в реальном времени. Рассмотрены современные цифровые подходы, включающие системы на основе инерциальных датчиков, носимых IoT-устройств и технологии биологической обратной связи. Отмечено, что при высокой метрологической точности такие решения оказываются экономически и организационно сложными для масштабирования в домашних условиях. Особое внимание уделено алгоритмам компьютерного зрения (Human Pose Estimation), обеспечивающим восстановление скелетной модели человека по видеопотоку одной RGB-камеры. Приведён сравнительный анализ основных архитектур и тенденций развития методов HPE, подчёркивающих их перспективность для задач бесконтактного мониторинга и телереабилитации. Глава завершается выводами о преимуществах использования алгоритмов компьютерного зрения для построения доступных систем объективной оценки двигательных функций и формулировкой функциональных и технических требований к разрабатываемой автоматизированной информационной системе реабилитации.

Во **второй главе** изложены основы разработки метода и алгоритмического обеспечения для оценки амплитудно-скоростных характеристик состояния плечевого сустава на основе визуальной информации. Проведён анализ метрических подходов к оценке точности моделей определения позы человека, исследованы применяемые наборы данных и современные архитектуры компьютерного зрения, используемые в задачах восстановления скелетной модели человека. На основании полученных результатов обоснован выбор архитектуры для построения метода безмаркерной оценки движений. Представлен формализованный метод извлечения биомеханических параметров из видеопотока и описано программно-алгоритмическое обеспечение, реализующее обработку данных и визуализацию параметров в реальном времени.

Метрики оценки качества 2D моделей. В разделе рассмотрены наиболее распространённые метрики, применяемые при валидации моделей определения положения тела человека: средняя точность (mAP), процент правильных ключевых точек (PCK) и процент правильно обнаруженных суставов (PDJ). Метрика mAP отражает интегральную точность предсказания координат по всем ключевым точкам. Метрика PCK определяется долей правильно локализованных ключевых точек при пороге допустимой погрешности, выраженном как доля нормирующего размера тела. В работе используется $PCK@0.2$, что соответствует ошибке не более 20% от ширины плеч или диаметра туловища.

Метрика PDJ использует в качестве нормирующего параметра диаметр туловища, что обеспечивает независимость оценки от роста и телосложения пациента. Совместное применение указанных метрик обеспечивает объективную количественную оценку точности моделей HPE при анализе движений в задачах медицинской реабилитации.

Сравнение наборов данных для оценки моделей положения человека. Для обеспечения корректности сравнения выполнен анализ наиболее распространённых датасетов, применяемых в задачах HPE: COCO, MPII Human Pose, Yoga-82, Sports-102 и PennAction. COCO содержит разнообразные бытовые и спортивные сцены, MPII — повседневные действия, Yoga-82 и Sports-102 — специализированные наборы поз для оценки устойчивости моделей к статическим и динамическим позам, близким к реабилитационным упражнениям. PennAction представляет видеопоследовательности, аннотированные координатами суставов, что позволяет тестировать временную устойчивость моделей. Компактные характеристики наборов приведены в табл. 1.

Таблица 1 — Характеристики наборов данных для обучения и тестирования моделей HPE

Набор данных	**Точек**	**Объём**	**Разрешение (px)**
COCO	17	330k	640×480 – 1024×768
MPII	16	25k	640×480
Yoga-82	33	28k	256×256
Sports-102	33	13k	256×256
PennAction	13	160k	640×480 (видео)

На основании анализа установлено, что COCO и MPII применяются для базовой оценки точности, а Yoga-82 и Sports-102 позволяют моделировать движения, характерные для лечебной физкультуры. Комплексное использование этих наборов данных обеспечивает адекватную репрезентативность и исключает необходимость создания отдельного медицинского корпуса.

Сравнительный анализ методов определения позы человека. Проведено сравнение архитектур OpenPose, PoseNet, MoveNet и BlazePose по показателям точности, скорости и вычислительной сложности. OpenPose характеризуется высокой точностью ($mAP = 65{,}3\%$), но требует значительных аппаратных ресурсов. PoseNet обеспечивает работу на мобильных устройствах, однако ограничен по анатомической детализации (17 ключевых точек). MoveNet, особенно в конфигурации Lightning, демонстрирует высокую частоту инференса (>100 fps) при $PCK@0.2 = 91{,}0\%$, сохраняя приемлемую точность локализации. BlazePose (Full) использует 33 ключевые точки и достигает $PCK@0.2 = 95{,}5\%$ при задержке менее 35 мс. Результаты суммированы в табл. 2.

Таблица 2 — Сравнение моделей оценки позы человека

Модель	**Точек**	**PCK@0.2 (%)**	**FPS**
OpenPose	25	90,1	30
PoseNet	17	84,7	80
MoveNet (Lightning)	17	91,0	100+
BlazePose (Full)	33	95,5	80–100

На основании полученных данных выбрана архитектура BlazePose как оптимальная для решения задач телереабилитации, обеспечивающая баланс между точностью, скоростью и вычислительной эффективностью.

Разработка метода качественной оценки амплитудно-скоростных характеристик состояния плечевого сустава посредством визуальной информации. Метод основан на последовательной обработке координат ключевых точек скелета и включает ряд этапов.

Шаг 1. Выделение ключевых точек.

$$p_i = (x_i, y_i), \tag{2}$$

Шаг 2. Нормализация и сглаживание.

$$x_i' = \frac{x_i}{W}, \qquad y_i' = \frac{y_i}{H}, \tag{3}$$

$$\tilde{p}_i(t) = \alpha p_i(t) + (1-\alpha)\tilde{p}_i(t-1), \tag{4}$$

где α — коэффициент экспоненциального сглаживания.

Шаг 3. Расчёт угла сгибания-разгибания плечевого сустава.

$$\theta = \arccos\left(\frac{\mathbf{u}\cdot\mathbf{v}}{\|\mathbf{u}\|\|\mathbf{v}\|}\right), \tag{5}$$

где $\mathbf{u} = p_{\text{плечо}} - p_{\text{локоть}}$, $\mathbf{v} = p_{\text{плечо}} - p_{\text{кисть}}$.

Шаг 4. Расчёт амплитуды и симметрии движений.

$$A(t) = \sqrt{(x_2(t) - x_1(t))^2 + (y_2(t) - y_1(t))^2}, \tag{6}$$

$$S(t) = |\theta_L(t) - \theta_R(t)|. \tag{7}$$

Шаг 5. Сегментация фаз движения.

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt}, \qquad a(t) = \frac{d^2\theta(t)}{dt^2}, \tag{8}$$

где моменты смены знака $\omega(t)$ определяют границы фаз «подъём–удержание–опускание».

Предложенный метод обеспечивает извлечение амплитудных и скоростных характеристик в реальном времени, а также оценку симметрии движений, что делает его пригодным для применения в системах телереабилитации.

Разработанный метод и алгоритмическое обеспечение реализуют полный цикл локальной обработки видеопотока: инференс скелетной модели в контейнере ONNX Runtime, сглаживание координат ключевых точек, вычисление параметров $\theta(t)$, $A(t)$, $S(t)$, $\omega(t)$, $a(t)$ и генерацию визуальной обратной связи в среде WebGL. Система отображает траекторные и фазовые диаграммы, обеспечивая задержку визуальной реакции не более 120 мс. Средняя частота обновления составляет 40–60 Гц на потребительских GPU и не менее 20 Гц на мобильных устройствах. Обработка выполняется полностью локально, что исключает передачу персональных данных в облачные сервисы и соответствует требованиям Федерального закона № 152-ФЗ «О персональных данных».

Во **третьей главе** представлена реализация **метода оценки двигательных паттернов у пациентов с нарушением функции верхней конечности** и разработанного **алгоритмического обеспечения**, обеспечивающего его функционирование в режиме реального времени. Основное внимание уделено формализации пространственно-кинематических характеристик движений и их интеграции в вычислительный конвейер анализа. Глава включает три логических раздела: формирование набора формализованных геометрических метрик, разработку и описание поэтапного метода оценки, а также алгоритмическое обеспечение, реализующее автоматический контроль корректности движений для различных групп упражнений.

Для обеспечения объективности и воспроизводимости анализа движений разработан набор из пяти безразмерных геометрических показателей, формализующих пространственные соотношения ключевых звеньев верхней конечности и корпуса, извлекаемых в реальном времени из последовательности кадров видеопотока. Каждый из показателей отражает определённый аспект техники выполнения упражнения — амплитуду, симметрию, устойчивость положения или наличие компенсаторных смещений

— и имеет клиническое обоснование, подтверждённое экспериментальными наблюдениями.

Метрики определяются на основе координат ключевых точек скелетной модели, нормализованных относительно размеров кадра, что обеспечивает инвариантность к масштабу, расстоянию до камеры и антропометрическим различиям пациентов. Их вычисление основано на векторных операциях, что позволяет реализовать обработку в режиме реального времени на массовых вычислительных платформах без использования специализированного оборудования.

Метрика №1 — Сгибание рук (угол между плечом и предплечьем):

$$\theta(t) = \arccos \frac{\vec{u}(t) \cdot \vec{v}(t)}{\|\vec{u}(t)\| \, \|\vec{v}(t)\|}. \tag{9}$$

Используется для контроля полноты разгибания локтя при подъёме руки. Порог $> 150°$ соответствует визуально полному разгибанию без вовлечения локтевого компенсаторного движения.

Метрика №2 — Одновременность движения правой и левой рук:

$$\Delta\theta(t) = |\theta_{\text{правая}}(t) - \theta_{\text{левая}}(t)|. \tag{10}$$

Характеризует межконечностную симметрию; порог $< 12°$ отражает функциональную согласованность движений.

Метрика №3 — Подъём плечевого пояса:

$$\Delta y_{\text{плечо}}(t) = \frac{|y_{\text{плечо}}(t) - y_{\text{плечо}}(t_0)|}{H}. \tag{11}$$

Оценивает степень участия плечевого пояса в компенсации недостатка амплитуды. Допустимое значение — не более 2% высоты кадра.

Метрика №4 — Наклон туловища:

$$\phi(t) = \arccos \frac{\vec{T}(t) \cdot \vec{e}_y}{\|\vec{T}(t)\|}. \tag{12}$$

Измеряет угол отклонения корпуса от вертикали. Порог $\phi < 5°$ отделяет функциональные колебания от компенсаторных наклонов.

Метрика №5 — Наклон головы:

$$\Delta y_{\text{голова}}(t) = \frac{|y_{\text{голова}}(t) - y_{\text{голова}}(t_0)|}{H}. \tag{13}$$

Позволяет фиксировать вовлечение шейного отдела в движение. Допустимое значение — не более 4% высоты кадра.

Совокупность рассмотренных критериев сведена в табл. 3, где приведены их пороговые значения, используемые при автоматической проверке корректности выполнения упражнений.

Таблица 3 — Безразмерные метрики оценки качества движений

Метрика	**Порог**
Сгибание рук (плечо–предплечье)	$> 150^\circ$
Одновременность движений рук	$< 12^\circ$
Подъём плечевого пояса	$< 0.02H$ (2%)
Наклон туловища	$< 0.05H$ ($\approx 5^\circ$)
Наклон головы	$< 0.04H$ (4%)

Совокупность представленных критериев формирует формализованную основу для последующей автоматической проверки техники выполнения движений. Они позволяют не только количественно оценивать степень соответствия выполняемых упражнений клинической норме, но и выявлять характерные асимметрии, компенсаторные стратегии и нарушения координации, проявляющиеся в изменении пространственных и угловых параметров траектории. Применение данного набора метрик обеспечивает устойчивость анализа к случайным артефактам видеосъёмки и создаёт основу для построения метода оценки двигательных паттернов, описанного далее.

Метод оценки двигательных паттернов у пациентов с нарушением функции верхней конечности. Разработанный метод предназначен для автоматизированной и воспроизводимой оценки качества выполнения реабилитационных упражнений на основе анализа пространственно-временных характеристик движений верхней конечности. Он обеспечивает количественную интерпретацию моторных параметров, выявление отклонений от эталонных траекторий и вычисление интегрального показателя корректности Q, отражающего степень соответствия движения установленным критериям.

Метод ориентирован на работу в системах телереабилитации и предназначен для использования как в клинических, так и в домашних условиях без применения специализированных маркерных комплексов. Его структура построена таким образом, чтобы обеспечить независимость от аппаратной платформы и возможность функционирования в реальном времени при ограниченных вычислительных ресурсах. Он включает семь последовательных шагов, охватывающих весь цикл обработки данных — от захвата видеопотока и выделения ключевых точек до проверки критериев качества и формирования итоговой метрики.

Шаг 1. Захват видеопотока.

$$\mathcal{F} = \{F(t) \mid t = 1, \ldots, T\}, \quad F(t) \in \mathbb{R}^{W \times H \times 3}. \tag{14}$$

Шаг 2. Выделение ключевых точек.

$$\mathbf{K}(t) = \{(x_1(t), y_1(t)), \ldots, (x_K(t), y_K(t))\}. \tag{15}$$

Шаг 3. Нормализация и сглаживание координат.

$$\tilde{x}_i(t) = \frac{x_i(t)}{W}, \quad \tilde{y}_i(t) = \frac{y_i(t)}{H}, \tag{16}$$

$$\bar{p}_i(t) = \alpha\, p_i(t) + (1-\alpha)\, \bar{p}_i(t-1), \quad \alpha \in (0{,}1]. \tag{17}$$

Шаг 4. Выделение амплитудно-скоростных характеристик. Из сглаженных координат вычисляются показатели, соответствующие метрикам, которые описаны выше.

Шаг 5. Проверка выполнения паттерна по эталону.

$$\Delta_i(t) = |P_i^{\text{obs}}(t) - P_i^{\text{ref}}(t)|. \tag{18}$$

Шаг 6. Оценка ошибок по критериям.

$$f_j(t) = \begin{cases} 1, & M_j(t) > P_j, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \tag{19}$$

Шаг 7. Агрегация результатов.

$$E_j = \sum_{t=1}^{T} f_j(t), \qquad Q = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{n} E_j}{n\,T}. \tag{20}$$

Интегральный показатель $Q \in [0{,}1]$ отражает долю корректно выполненных повторов и служит итоговой оценкой качества выполнения упражнения. При значениях $Q \to 1$ движение считается полностью соответствующим эталону, а при $Q \to 0$ фиксируется выраженное нарушение техники.

Такое представление обеспечивает не только числовую, но и интерпретируемую характеристику качества выполнения двигательного паттерна. Показатель Q может использоваться как индивидуальная метрика эффективности тренировки, как индикатор динамики восстановления в серии занятий, а также как объективный критерий для автоматизированных систем обратной связи и медицинского мониторинга. Разработанный метод формирует замкнутый цикл анализа — от извлечения координат ключевых точек до расчёта интегральной оценки — и служит концептуальной основой для реализации алгоритмического обеспечения, подробно рассмотренного в следующем разделе.

Группы упражнений (двигательных паттернов). Для реализации контроля разработанный метод интегрирован в пять функциональных групп упражнений, охватывающих основные типы двигательных паттернов верхних конечностей. Каждая группа отражает определённый класс движений, характерный для этапов реабилитации — от базовых амплитудных и симметричных до сложнокоординированных и стабилизационных.

Такое распределение позволяет адаптировать алгоритмы оценки к различным сценариям восстановления, обеспечивая универсальность метода и возможность его применения при индивидуальной настройке программ тренировок.

Группа I. Сгибание и разгибание (сагиттальная плоскость). Оценивается амплитуда подъёма руки и симметрия при двусторонних движениях. Контролируются подъём плечевого пояса, наклоны корпуса и головы. Система фиксирует нарушение при недостаточной амплитуде или вовлечении плечевого пояса в движение.

Группа II. Отведение и приведение (лобная плоскость). Контролируется достижение целевого угла, синхронность и стабильность корпуса. Модуль выявляет асимметрию движений и смещения центра массы.

Группа III. Диагональные и перекрёстные движения. Рука перемещается по диагональной траектории к противоположной части тела. Алгоритм анализирует расстояние до целевой точки и ротацию корпуса, предотвращая компенсаторные скручивания.

Группа IV. Точечные движения к ориентирам головы. Проверяется точность позиционирования кисти и плавность финальной фазы. Система контролирует отсутствие лишних наклонов и подъемов плеч.

Группа V. Замкнутые движения и изометрическая стабилизация. Фиксируется устойчивость корпуса и минимизация дрейфа кистей при удержании позы. Эти упражнения развивают координацию и контроль баланса.

Каждая группа имеет ведущие параметры, критерии проверки и единые правила сегментации активной фазы $\mathcal{T} = \{t_s, \ldots, t_e\}$, что обеспечивает унифицированную обработку данных и формирование интегральной оценки Q.

Объединение описанных групп упражнений в единую систему контроля потребовало разработки алгоритмического обеспечения, реализующего полный цикл обработки данных. На основе предложенного метода была построена программная логика, обеспечивающая автоматическое выполнение всех этапов анализа — инициализацию модели, активацию видеопотока, выделение ключевых точек, проверку критериев, фиксацию ошибок и подсчёт повторений.

В ходе выполнения каждого упражнения система в реальном времени отслеживает текущее состояние пациента, сравнивает его с эталонными параметрами и формирует корректирующие указания при отклонении от нормы. Такая организация вычислительного процесса обеспечивает замкнутый контур контроля и позволяет реализовать интерактивную обратную связь без участия специалиста.

На рисунке 1 представлена обобщённая блок-схема алгоритмического обеспечения метода, демонстрирующая логику взаимодействия основных

модулей и последовательность операций в процессе оценки двигательных паттернов.

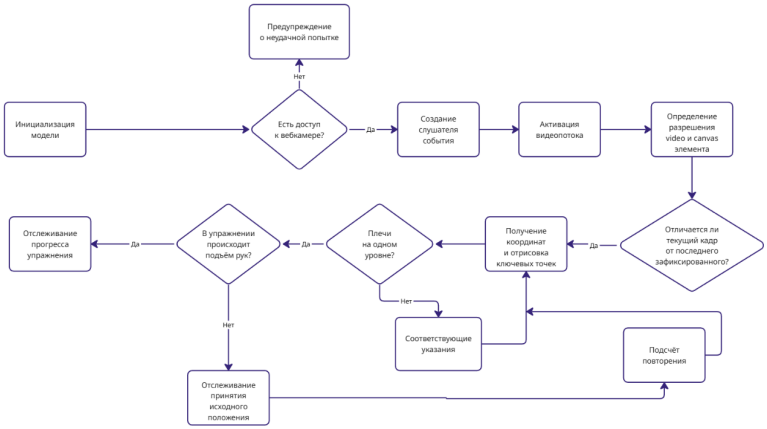


Рисунок 1 — Обобщённая блок-схема алгоритма оценки двигательных паттернов

Разработанный метод и алгоритмическое обеспечение обеспечивают объективную оценку двигательных паттернов верхней конечности в реальном времени. Система сочетает вычислительную эффективность, клиническую интерпретируемость и возможность интеграции в автоматизированные системы телереабилитации.

Четвёртая глава посвящена интеграции разработанных методов цифровой обработки визуальной информации в состав автоматизированной информационной системы (АИС) для домашней телереабилитации. Представлены архитектурные и программно-алгоритмические решения, а также результаты её апробации и оценки эффективности.

Архитектура и программно-алгоритмическое обеспечение. АИС реализована в микросервисной архитектуре с единой точкой входа (API Gateway), обеспечивающей маршрутизацию, авторизацию по JWT-токенам и контроль доступа. Взаимодействие между сервисами осуществляется по протоколу gRPC, а для клиентских приложений предусмотрен REST-интерфейс. Архитектура системы включает специализированные доменные сервисы: управление пользователями и профилями, тренировочные программы и назначения, формы обратной связи, сбор статистики и анкетирование. Общая схема архитектуры представлена на рисунке 2. Каждый микросервис имеет собственную базу данных PostgreSQL, объектное хранилище и кэширующий слой, что обеспечивает изоляцию данных и устойчивость к сбоям.

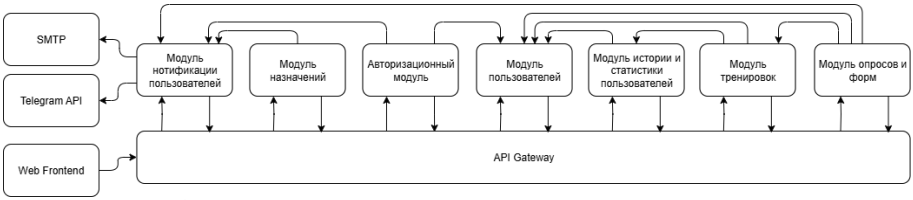


Рисунок 2 — Архитектура разработанной автоматизированной информационной системы телереабилитации

Типовая структура микросервиса показана на рисунке 3 и включает последовательность модулей: приём запросов (gRPC/HTTP-сервер), конвертацию и валидацию данных, бизнес-логику с прикладными функциями и репозиторий, взаимодействующий с хранилищами. Такой подход обеспечивает модульность, масштабируемость и независимое обновление компонентов без нарушения работы всего комплекса. Централизованное логирование, реализованное с использованием Elastic Stack (рис. 4), обеспечивает технический мониторинг, аудит действий пользователей и анализ производительности в реальном времени.

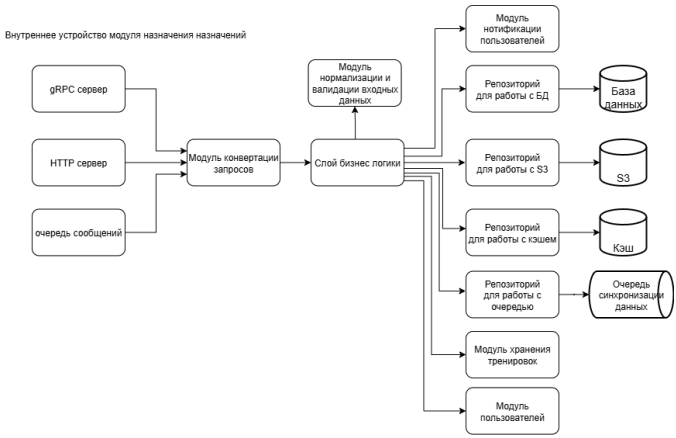


Рисунок 3 — Типовая внутренняя структура микросервиса: приём запросов, валидация данных, бизнес-логика и репозиторий

Алгоритмическое ядро встроено непосредственно в клиентское приложение: цикл «кадр → извлечение позы → вычисление метрик → обратная связь» выполняется локально, без передачи видеопотока на сервер, что гарантирует конфиденциальность персональных данных и обеспечивает задержку менее 120 мс. Результирующие метрики и агрегированные показатели передаются на сервер в формате JSON и сохраняются в

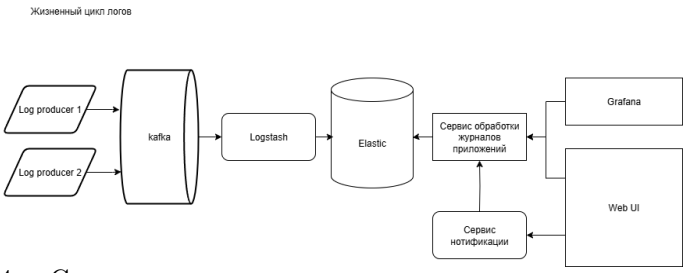


Рисунок 4 — Схема централизованного логирования и мониторинга в микросервисной архитектуре АИС

медицинской карте пациента для последующего анализа и поддержки врачебных решений.

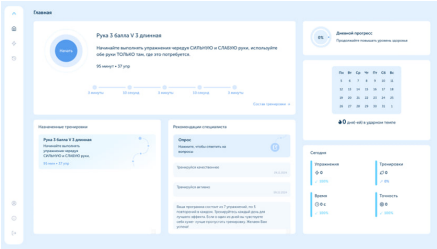
Веб-приложение для врача и пациента. Клиентская часть реализована на стеке React/TypeScript (Bun, Vite, Chakra UI; Feature-Sliced Design) и обеспечивает основное интерфейсное взаимодействие участников реабилитационного процесса. Приложение включает модули отображения прогресса, календарь назначений, панель рекомендаций и блок визуальной аналитики, представленные на рисунке 5а.

Реализованы сценарии: запуск тренировок с видеоинструкциями и наложением скелетной модели, интерактивная обратная связь с отображением ошибок выполнения, прохождение опросов, история занятий и формирование индивидуальных комплексов упражнений (рис. 5б). Врач формирует и назначает комплексы из встроенного каталога, контролирует показатели и при необходимости корректирует программу.

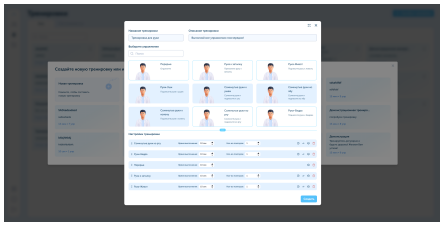
Обработка видеопотока выполняется локально в браузере с использованием WebRTC, что снижает сетевую нагрузку и соответствует требованиям к защите персональных данных. Взаимодействие между интерфейсом и алгоритмическим ядром обеспечивает формирование визуальной обратной связи в реальном времени, способствуя повышению мотивации и приверженности пациентов к занятиям.

Апробация и эффективность. Проведена валидация угла сгибания плеча в стандартизованном тесте «90°» на N=10 испытуемых (по 5 повторов; 50 нормированных циклов) с инерциальной референцией («СТЭДИС-Кинематика»). На общей сетке 30 Гц получены групповые оценки (медиана [Q1–Q3]): MAE $= 2.18^\circ\,[1.62; 2.83]$, RMSE $= 2.61^\circ\,[2.14; 3.19]$, bias $= 0.92^\circ\,[0.38; 1.47]$, LOA $= 7.35^\circ\,[6.21; 8.58]$, CCC $= 0.956\,[0.942; 0.967]$. Эквивалентность подтверждена по TOST для $|\text{bias}| \leq 2^\circ$ и MAE $\leq 5^\circ$.

Фазовый анализ («подъём–удержание–опускание») продемонстрировал наименьшие ошибки на плато, что подтверждает корректность амплитудной оценки и устойчивость вычислений в фазе удержания. На переходных фазах наблюдаются умеренные колебания, не превышающие



а) Главная страница: прогресс, календарь и рекомендации



б) Модуль создания и назначения тренировок

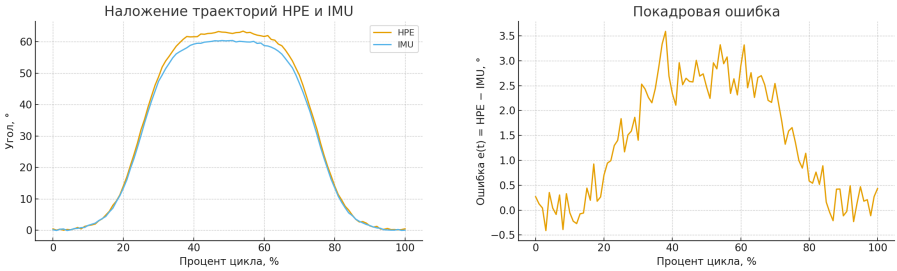
Рисунок 5 — Интерфейсы веб-приложения: (a) главная страница; (b) модуль формирования тренировочных комплексов

установленные допуски. На рисунке 6 представлены результаты сопоставления сигналов HPE и IMU: наложение нормированных траекторий (рис. 6а) и покадровая ошибка (рис. 6б).

Полученные результаты демонстрируют устойчивое совпадение формы кривых и минимальные расхождения в диапазоне 2–3°, что согласуется со статистическими показателями bias = 0.92° и LOA = 7.35°. Пики ошибки на переходных участках (рис. 6б) не выходят за установленные пределы и быстро затухают, подтверждая корректность фазовой синхронизации и фильтрации сигналов.

В производственных испытаниях зафиксированы: латентность $T_{\text{total}} = 220.78$ мс при суммарном джиттере ≈ 0.50 мс; устойчивость серверной части до 7400 RPS при $p99 < 300$ мс; на пользовательских ПК достигается 22–30 FPS при загрузке CPU 9–20 %. Пилотная эксплуатация (около 80 пациентов, амбулаторные и домашние условия) показала высокую приверженность (>70%), положительную динамику коррекции патологических паттернов и сокращение времени формирования индивидуальной программы до 2.3 ± 0.4 мин, что подтверждает прикладную эффективность разработанной АИС.

Результаты апробации подтвердили эквивалентность разработанного метода по отношению к инерциальной референции и его практическую применимость для оценки двигательных паттернов в реабилитации. Полученные значения MAE, bias и CCC соответствуют клиническим допускам, а интеграция метода в АИС обеспечивает объективную оценку движений в реальном времени. Разработанная система продемонстрировала высокую вычислительную эффективность (латентность менее 250 мс), масштабируемость серверной части и стабильную работу клиентского приложения на массовом оборудовании. Пилотная эксплуатация с участием 80 пациентов



а) Наложение нормированных траекторий $\theta_{\mathrm{HPE}}(t)$ и $\theta_{\mathrm{IMU}}(t)$ на шкале 0–100 % цикла

б) Покадровая ошибка $e(t) = \theta_{\mathrm{HPE}}(t) - \theta_{\mathrm{IMU}}(t)$ для одного цикла

Рисунок 6 — Результаты сопоставления методов HPE и IMU: (a) сравнение траекторий; (b) покадровая ошибка

показала рост приверженности к реабилитации и повышение точности выполнения упражнений, что подтверждает технологическую и клиническую состоятельность предложенного решения.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем: В рамках данного исследования была разработана и реализована комплексная автоматизированная информационная система оценки позы и двигательных паттернов пациента для применения в медицинской реабилитации. Работа охватила широкий спектр задач: от анализа методов компьютерного зрения и метрических характеристик до проектирования алгоритмов оценки амплитудно-скоростных параметров и реализации программно-аппаратного комплекса, пригодного для домашней телереабилитации.

Ключевые достижения исследования включают:

1. Проведён системный анализ существующих методов оценки движений человека в медицинской реабилитации: от традиционных клинико-функциональных шкал и гониометрии до современных решений на основе скелетных моделей человека. Установлено, что компьютерное зрение обеспечивает оптимальный баланс точности, доступности и бесконтактности, что позволяет рассматривать его как основу для разработки автоматизированных систем реабилитации. **(Задача № 1)**
2. Разработан метод оценки амплитудно-скоростных характеристик движений плечевого сустава на основе визуальной информации. Для этого проведён сравнительный анализ наборов данных (COCO, MPII, Yoga-82, UCF101, PennAction) и метрик (mAP, PCK, PDJ), а также исследованы модели OpenPose, PoseNet, MoveNet и BlazePose. Обоснован выбор модели BlazePose как ядра

системы благодаря её точности и возможности работы в реальном времени на массовых устройствах. **(Задача № 2, Положение № 1)**

3. Формализованы и оцифрованы метрики цифровой обработки визуальной информации для оценки паттернов движений плечевого пояса. Введены пять нормированных геометрических метрик (сгибание руки, симметричность, подъём плеч, наклон корпуса, наклон головы), которые позволяют объективно фиксировать искажения техники. Вычисление указанных показателей осуществляется на основе координат ключевых точек, извлекаемых моделью оценки позы, что обеспечивает возможность их применения в режиме реального времени. **(Задача № 3)**
4. Разработан метод и алгоритмическое обеспечение оценки двигательных паттернов у пациентов с нарушением функции верхней конечности. Введена классификация упражнений по пяти группам (сгибание/разгибание, отведение/приведение, диагональные движения, функциональные упражнения к анатомическим ориентирам, изометрическая стабилизация). Алгоритмы обеспечивают контроль правильности выполнения, автоматическую сегментацию фаз движения («подъём–удержание–опускание») и подсчёт ошибок. **(Задача № 4, Положение № 2,3)**
5. Разработана архитектура и реализован программно-аппаратный комплекс поддержки принятия врачебных решений. Он включает локальный модуль инференса позы, модуль интерактивной визуальной обратной связи (WebGL-графики, фазовые диаграммы, сравнительные траектории) и серверные компоненты для хранения и передачи данных. Практическая апробация показала, что время формирования персонализированной программы реабилитации сократилось до 2 минут, а точность классификации двигательных паттернов составила не менее 92 %. **(Задача № 5, Положение № 4)**

В заключение можно сказать, что проведённое исследование вносит значительный вклад в развитие технологий телереабилитации и цифровой медицины. Разработанная система демонстрирует высокий потенциал для практического применения в условиях домашней и клинической реабилитации, обеспечивая объективный мониторинг восстановления и персонализированную поддержку врачебных решений.

Предложенные методы и средства, полученные в рамках диссертационного исследования, создают основу для дальнейших инноваций в области компьютерного зрения, анализа движений и интеллектуальной поддержки медицинских решений. Объединение технологий машинного обучения, цифровой обработки сигналов и распределённых вычислений открывает

перспективы для создания более эффективных, доступных и масштабируемых систем медицинской реабилитации будущего.

Основные публикации по теме диссертации

Работы, опубликованные в изданиях из перечня ВАК РФ

1. *Павликов, А.* Обзор технологий определения положения тела человека [Текст] / А. Павликов, М. Городничев // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. — 2023. — Янв. — Т. №3(47). — С. 81—97.
2. *Павликов, А.* Разработка игрового модуля с использованием технологии оценки положения тела человека для системы неврологической реабилитации [Текст] / А. Павликов // Computational Nanotechnology. — 2025. — Март. — Т. 12. — С. 116—128.
3. *Павликов, А. Е.* Применение метода оценки положения тела человека для анализа упражнений при восстановлении функций верхней конечности [Текст] / А. Е. Павликов // Экономика и качество систем связи. — 2025. — Сент. — Т. 3. — С. 214—221.

Статьи, индексируемые в международных базах WoS/Scopus

4. *Pavlikov, A.* On the Application of Human Pose Estimation in a Driver Condition Monitoring Task [Текст] / A. Pavlikov, V. Volkogonov, A. Lipatova //. Т. 6. — 2024 Systems of Signals Generating, Processing in the Field of on Board Communications, 03.2024. — С. 1—6.
5. *Pavlikov, A.* Research on Driver Monitoring Methods [Текст] / A. Pavlikov, M. Gorodnichev, A. Lipatova //. — 2024 Systems of Signals Generating, Processing in the Field of on Board Communications, 03.2024. — С. 1—5.
6. *Pavlikov, A.* Algorithm for Predicting Pedestrian Behavior on Public Roads [Текст] / A. Pavlikov, M. Moseva, M. Gorodnichev //. — 2023 Systems of Signals Generating, Processing in the Field of on Board Communications, 03.2023. — С. 1—6.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ

7. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Asisti — программный комплекс [Текст] / А. Е. Павликов [и др.] ; заявитель [и др.]. — Опубл. 01.12.2023, № 2023686016.

8. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* HumanPoseCam — встраиваемый программный комплекс React-видеокамеры для отслеживания положения тела человека с помощью фреймворка MediaPipe [Текст] / А. Е. Павликов [и др.] ; Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». — Опубл. 27.11.2024, № 2024688342.
9. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Go-Configurator — программный модуль для конфигурации приложения [Текст] / А. Е. Павликов [и др.] ; Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». — Опубл. 06.06.2025, № 2025666542.
10. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Go-retryer — программный модуль, предоставляющий функциональность повторных попыток [Текст] / А. Е. Павликов [и др.] ; Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». — Опубл. 05.06.2025, № 2025666229.
11. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Go-Auth — сервис авторизации и осуществления контроля доступа [Текст] / А. Е. Павликов [и др.] ; Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». — Опубл. 27.06.2025, № 2025666682.
12. *Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ.* Go-datetime — программный модуль, предоставляющий работу с датой и временем [Текст] / А. Е. Павликов [и др.] ; Ордена Трудового Красного Знамени федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский технический университет связи и информатики». — Опубл. 03.07.2025, № 2025667302.