

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

Эволюционный алгоритм искусственного интеллекта для оптимизации обнаружения фаз шага по данным трёхосевого акселерометра, размещённого на стопе

П.А. Хмарский

Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 15.04.2025

Принята к печати 03.06.2025

Современные технологии захвата движения и анализа его параметров, основанные на использовании инерциальных измерительных модулей, находят всё более широкое применение в различных областях: биомедицинская инженерия, спорт, мониторинг физической активности, эргономика, научные исследования движения и смежные дисциплины. Цель исследования заключалась в разработке и экспериментальной проверке алгоритма автоматического подбора частотных характеристик фильтров и порога обнаружения для повышения точности и надёжности обнаружения фаз шага. Данная задача имеет принципиальное значение не только для объективной реабилитации и мониторинга двигательной активности, но и для задач спортивной аналитики, эргономики, игровых и инженерных разработок, а также научных исследований локомоции. В работе представлен автоматизированный подход к оптимизации параметров обнаружителя фаз шага на основе данных трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе. Реализован эволюционный алгоритм искусственного интеллекта, имитирующий процессы естественного отбора, который обеспечивает автоматический поиск оптимальных параметров обнаружителя шага путём минимизации ошибки между восстановленной с помощью инерциальных измерительных модулей и эталонной (оптической) траекторией, полученной с системой OptiTrack. Подробно описаны механизмы формирования и эволюции популяции параметров, построение целевой функции и методы компенсации дрейфа при интегрировании ускорения. Эксперименты с движением по замкнутому квадратному маршруту подтвердили высокую точность и устойчивость предлагаемого метода: совпадение оптимизированной траектории с эталонной указывает на практическую применимость подхода для точной реконструкции локомоции в различных условиях. Методика легко адаптируется к индивидуальным особенностям движений и может быть интегрирована в современные носимые сенсорные системы для широкого спектра научных и прикладных задач.

Ключевые слова: обнаружение шага, инерциальный измерительный модуль, акселерометр, эволюционные алгоритмы, захват движения

Адрес для переписки:

Хмарский П.А.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: pierre2009@mail.ru

Address for correspondence:

Khmarskiy P.A.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: pierre2009@mail.ru

Для цитирования:

П.А. Хмарский.
Эволюционный алгоритм искусственного интеллекта
для оптимизации обнаружения фаз шага по данным трёхосевого
акселерометра, размещённого на стопе.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 98–108.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

For citation:

Khmarskiy P.A.
Evolutionary Artificial Intelligence Algorithm for Optimizing Step
Phase Detection Based on Foot-Mounted Triaxial Accelerometer Data.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):98–108. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

Evolutionary Artificial Intelligence Algorithm for Optimizing Step Phase Detection Based on Foot-Mounted Triaxial Accelerometer Data

P.A. Khmarskiy

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

Received 15.04.2025

Accepted for publication 03.06.2025

Abstract

The aim of this study was to develop and experimentally validate an algorithm for automatic selection of filter frequency characteristics and detection threshold in order to enhance the accuracy and reliability of gait phase detection. This challenge is crucial not only for objective rehabilitation and monitoring of motor activity, but also for sports analytics, ergonomics, gaming and engineering applications, as well as studies of human locomotion. An automated approach for optimizing the parameters of a gait phase detector based on data from a three-axis foot-mounted accelerometer is presented. This work implements an evolutionary artificial intelligence algorithm that mimics natural selection processes, providing automatic search for the optimal gait phase detector parameters by minimizing the error between the trajectory obtained from inertial measurement units and the reference (optical) trajectory acquired using an OptiTrack system. Details are provided regarding the formation and evolution of the parameter population, design of the objective function, and drift compensation methods utilized during acceleration integration. Experiments involving walking along a closed square path confirmed the high accuracy and robustness of the proposed method: the match between the optimized and reference trajectories demonstrates the practical applicability of the approach for precise gait reconstruction under different conditions. The proposed methodology is easily adaptable to individual movement characteristics and can be integrated into modern wearable sensor systems for a wide range of scientific and applied tasks

Keywords: step detection, inertial measurement unit, accelerometer, evolutionary algorithms, motion capture

Адрес для переписки:

Хмарский П.А.
Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: pierre2009@mail.ru

Address for correspondence:

Khmarskiy P.A.
Institute of Applied Physics of the National Academy of Science
of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: pierre2009@mail.ru

Для цитирования:

П.А. Хмарский.
Эволюционный алгоритм искусственного интеллекта
для оптимизации обнаружения фаз шага по данным трёхосевого
акселерометра, размещённого на стопе.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 2. С. 98–108.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

For citation:

Khmarskiy P.A.
Evolutionary Artificial Intelligence Algorithm for Optimizing Step
Phase Detection Based on Foot-Mounted Triaxial Accelerometer Data.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(2):98–108. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-2-98-108

Введение

Современные технологии захвата движения и анализа его параметров, основанные на использовании инерциальных измерительных модулей, находят все более широкое применение в различных областях: биомедицинская инженерия, спорт, мониторинг физической активности, эргономика, научные исследования движения и смежные дисциплины [1–4]. Благодаря объединению в одном корпусе трёхосевых акселерометров, гироскопов и часто магнетометров, такие модули обеспечивают автономную, высокочастотную и воспроизводимую регистрацию движений вне лабораторных условий, открывая новые возможности для комплексного анализа двигательной активности человека [2, 4–6].

Одна из ключевых и сложных задач в этой области – автоматическое выделение фаз шага, которое необходимо для точного расчёта пространственно-временных и кинематических характеристик походки: длины шага, темпа, симметрии, анализа траекторий и паттернов двигательной активности в естественных условиях [3, 4, 7, 8]. На практике параметры фильтрации и пороговые значения для обнаружения фаз шага часто устанавливаются вручную, что снижает воспроизводимость алгоритмов, влияет на достоверность получаемых данных и может приводить к дополнительным ошибкам при длительном мониторинге [7, 9].

Современные исследования показывают, что автоматизированная оптимизация параметров обнаружения фаз шага позволяет значительно повысить точность и устойчивость работы алгоритмов как в спортивных и биомедицинских приложениях, так и при оценке эргономики рабочих процессов и изучении закономерностей человеческого движения [4, 6, 8, 10]. Эффективный способ решения подобных оптимизационных задач представлен эволюционными методами искусственного интеллекта, в частности генетическими алгоритмами, которые, наряду с традиционными подходами машинного обучения, позволяют находить оптимальные решения в сложных, многомерных и слабо формализуемых пространствах параметров [4, 7].

Данная работа посвящена применению эволюционного алгоритма искусственного интеллекта для автоматизированной оптимизации параметров фильтрации и обнаружения фаз

шага по данным с трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе. В исследовании рассмотрены особенности используемых сигнальных признаков, методы компенсации дрейфа ускорения акселерометра, а также реализованы подходы к автоматизированному подбору параметров с целью повышения точности и воспроизводимости обнаружения фаз шага. Для объективной валидации результатов проведено сравнение с эталонными траекториями, полученными с помощью высокоточной оптической системы захвата движения OptiTrack. Полученные решения актуальны для широкого спектра задач анализа человеческого движения – от спорта и научных исследований до мониторинга активности, эргономики и автоматизированных систем оценки походки.

Цель работы – разработать и экспериментально проверить алгоритм оптимизации параметров обнаружения фаз шага на основе данных трёхосевого акселерометра стопы с применением эволюционного алгоритма искусственного интеллекта на экспериментальных данных с эталонными траекториями.

Фазы шага и особенности их обнаружения по данным акселерометра

Исследование походки человека традиционно основывается на разбиении шага на отдельные фазы – опорную и переносную (также встречаются более детализированные подфазы: начальный контакт, стопа плоско на земле, отрыв пятки, перенос, см. рисунок 1). Чёткое выделение этих фаз позволяет объективно оценивать динамику нагрузки, координацию и возможные нарушения походки [1].

В рамках настоящей работы основной интерес представляло выделение моментов смены фазы опоры на фазу переноса стопы при ходьбе. Для автоматического выделения фаз шага использовался акселерометр, закреплённый непосредственно на стопе испытуемого. Такое размещение обеспечивает наилучшую информативность, поскольку именно в области стопы динамика шага проявляется максимально выражено [2, 11]: на этом участке чётко видны моменты перехода от фазы опоры к фазе переноса, а амплитуда сигналов значительно выше по сравнению с другими частями конечности. Размещение датчика на голени или бедре также возможно, однако сопровождается снижением точности обнаружения фаз шага из-за

сглаживания характерных пиков и повышенного влияния шумов [2].

Обнаружение фаз шага реализовывалось по схеме, представленной на рисунке 2.

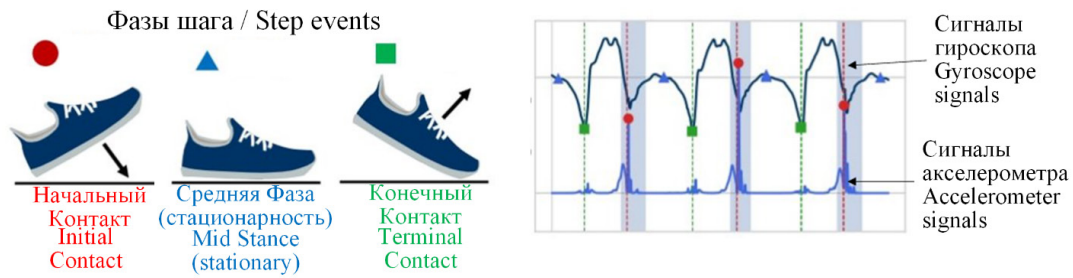


Рисунок 1 – Фазы шага и сигналы датчиков инерциального измерительного модуля

Figure 1 – Phases of gait and signals from inertial measurement unit sensors

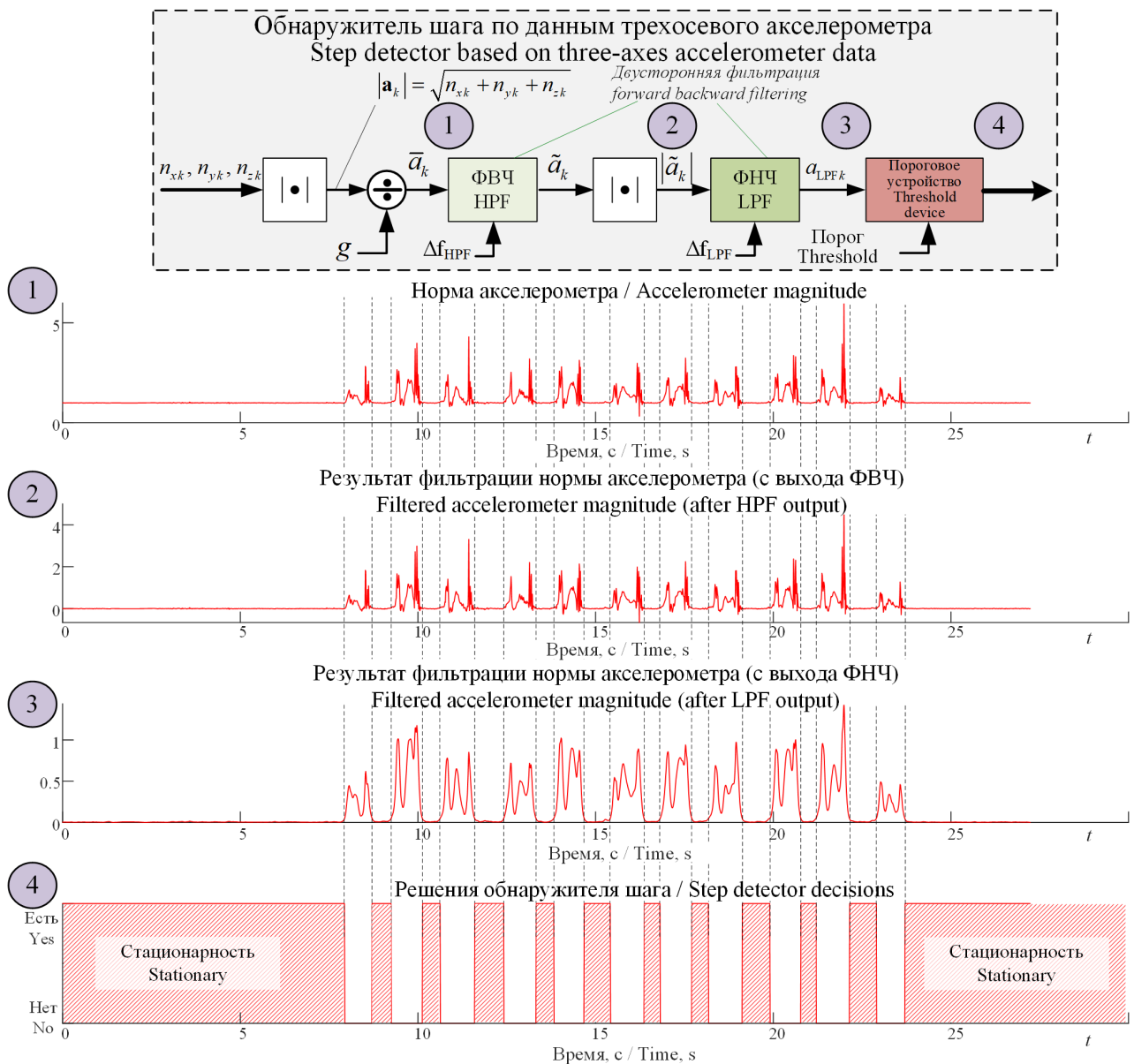


Рисунок 2 – Структурная схема и временные диаграммы обнаружителя шага по данным трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе

Figure 2 – Structural diagram and time diagrams of the step detector based on a three-axis accelerometer mounted on the foot

В качестве исходной величины использовалась норма ускорения, вычисляемая по трём осям акселерометра как $|a_k| = \sqrt{n_{xk} + n_{yk} + n_{zk}}$.

Далее этот сигнал проходил через последовательную фильтрацию с помощью двух линейных фильтров [12]: фильтр верхних частот использовался для удаления медленно изменяющихся трендов и гравитационного дрейфа; фильтр нижних частот подавлял высокочастотные шумы, сохраняя динамические компоненты, обусловленные шагом. В обнаружителе применяется двусторонняя фильтрация – когда сигнал пропускается через фильтр сначала в прямом, а затем в обратном направлении. Такой подход позволяет полностью исключить фазовые искажения и обеспечивает корректную временную локализацию всех событий (отсутствие запаздывания по времени). На завершающем этапе обработки сигнал поступает на пороговое устройство: если значение сигнала превышает заданный порог, фиксируется момент движения стопы; если опускается ниже порогового значения – определяется фаза стационарности (опора).

Выбор значений частотных полос фильтров (верхних и нижних частот) и уровня порога имеет решающее значение: слишком широкая или узкая полоса фильтра может привести к потере

или искажению шага, а неправильно выбранный порог – к ошибочным или пропущенным обнаружениям фаз шага. Обычно эти параметры назначаются вручную, что снижает воспроизводимость и негативно сказывается на точности определения структуры шага, особенно на реальных клинических и реабилитационных данных. Поэтому в данной работе особое внимание уделялось автоматизированной оптимизации параметров фильтрации и порогового уровня, что позволило повысить надёжность работы обнаружителя фаз шага и учесть индивидуальные особенности походки.

После обнаружения фаз шага следующим этапом является восстановление траектории и скоростей стопы. Наиболее простой способ – двойное интегрирование ускорения по осям. Однако при его применении неизбежно возникает выраженная ошибка из-за накопления малейших шумов и смещений (дрейфа), приводящая к некорректному восстановлению скоростей и координат. Это хорошо видно на рисунке 3: верхний график – исходные («сырые») ускорения по осям в мировой системе; средний – выделение статуса стационарности (фаз шага); нижний – скорости, полученные простым интегрированием: отчётливо видна тенденция «дрейфа» всех трёх компонент скорости по мере времени.

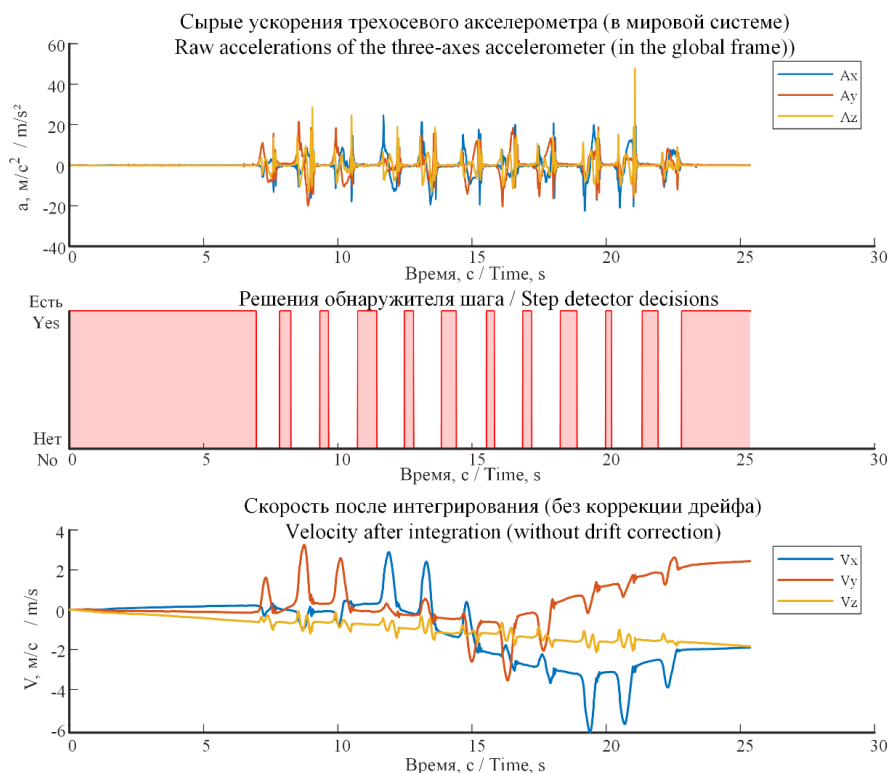


Рисунок 3 – К проблеме дрейфа данных трёхосевого акселерометра

Figure 3 – On the problem of drift in three-axis accelerometer data

Для устранения накопления ошибки (статичности), выявляемом обнаружителем шага (рисунок 4). Такой подход позволяет эффективно компенсировать накопленный дрейф и существенно повысить точность оценки траекторных параметров движения [11].

Для устранения накопления ошибки (статичности), выявляемом обнаружителем шага (рисунок 4). Такой подход позволяет эффективно компенсировать накопленный дрейф и существенно повысить точность оценки траекторных параметров движения [11].

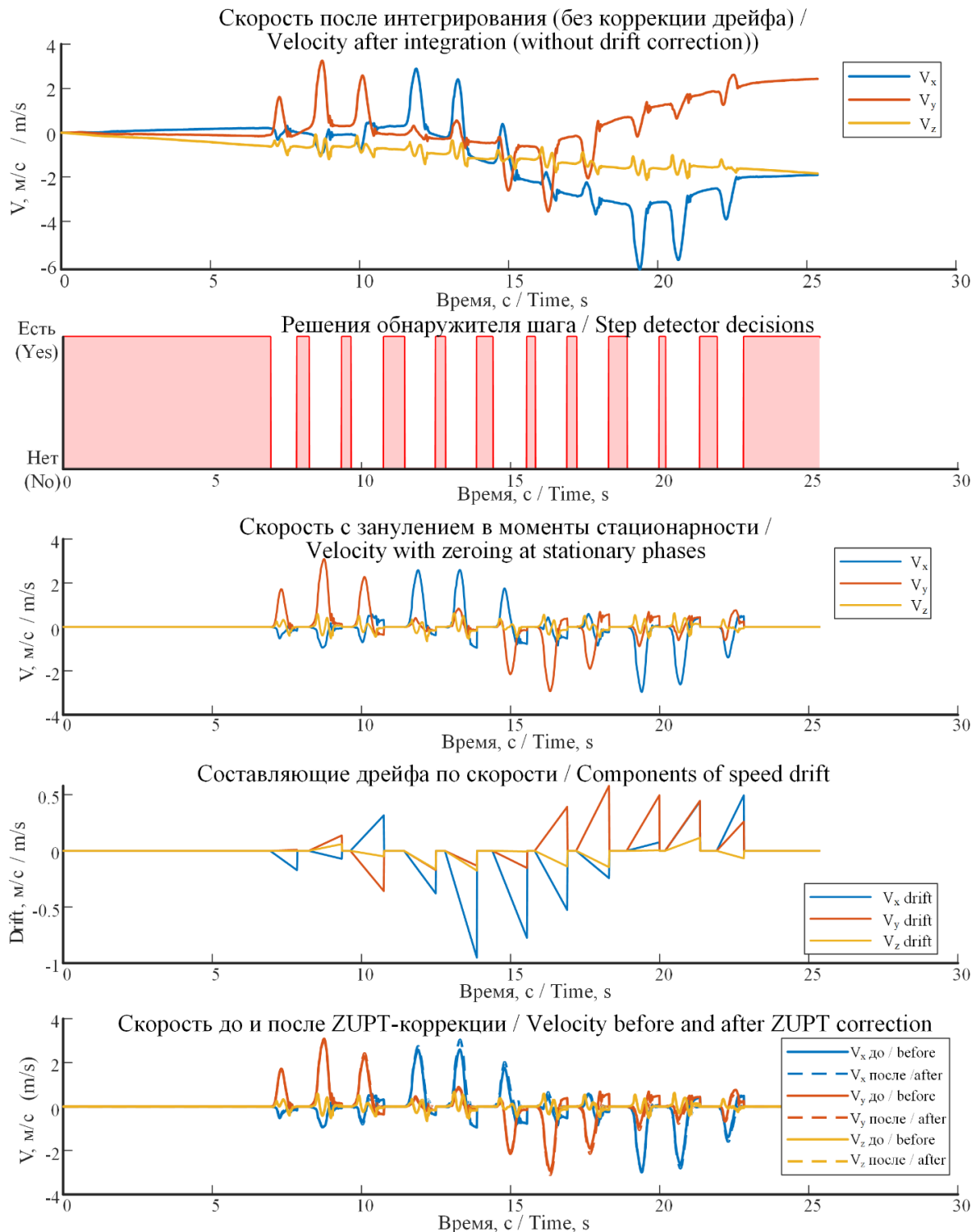


Рисунок 4 – К пояснению алгоритма ZUPT

Figure 4 – Explanation of the ZUPT algorithm

На рисунке 4 представлены результаты применения алгоритма ZUPT для коррекции дрейфа скоростей, возникающего при двойном интегрировании ускорений акселерометра. Хорошо видно, что при отсутствии компенсации скорости постепенно «уплывают» от исходного уровня по всем осям, а также накапливается дрейф – последовательная систематическая ошибка. После применения алгоритма ZUPT, реализующего регулярную коррекцию скоростей в моменты стационарности стопы, величина дрейфа практически полностью устраняется:

восстановленные скорости периодически сбрасываются к нулю при каждом шаге, что обеспечивает гораздо более достоверное определение кинематических параметров движения.

Для повышения точности выделения фаз шага и, как следствие, всей последующей кинематической реконструкции в работе реализован модуль оптимизации параметров обнаружителя шага. На рисунке 5 представлена структурная схема взаимодействия всех ключевых компонентов алгоритма.

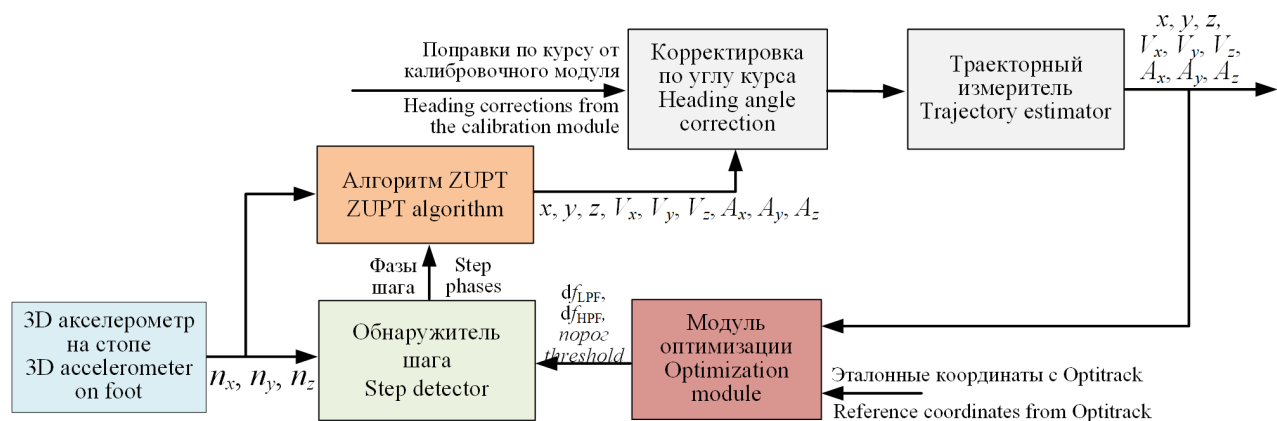


Рисунок 5 – Схема оптимизации обнаружителя шага

Figure 5 – Step detector optimization scheme

Сырые данные трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе, поступают на блок обнаружителя шага, где определяется положение стопы (фазы опоры и переноса), что непосредственно влияет на дальнейшую обработку данных. Полученная информация используется в алгоритме ZUPT для регулярной коррекции скоростей.

Для повышения точности реконструкции траектории по данным инерциального измерительного модуля методом ZUPT в работе реализован автоматизированный подход к подбору параметров фильтрации и порогов обнаружения фаз шага в модуле оптимизации. Центральным элементом метода выступает эволюционный алгоритм искусственного интеллекта из семейства генетических алгоритмов [4, 7], применение которого обусловлено высокой размерностью и выраженной нелинейностью задачи, а также сложными взаимосвязями между параметрами фильтрации, особенностями сигнала и точностью выделения фаз шага. Эволюционный алгоритм

имитирует процессы естественного отбора, поэтапно улучшая решения на основе принципов селекции, скрещивания, мутаций и выживания наиболее приспособленных особей. Формируется популяция случайно сгенерированных наборов параметров (коэффициенты фильтрации, оконные параметры сглаживания, пороги обнаружения). Для каждого набора проводился полный анализ: фильтрация ускорений, обнаружения фаз шага, восстановление траектории методом двойного интегрирования и расчёт целевой функции – среднеквадратичной ошибки между восстановленной и эталонной траекторией по данным системы захвата OptiTrack. По результату ошибки вычислялась «приспособленность» (fitness), и следующее поколение формировалось из лучших решений с последующими генетическими операциями.

Преимущество эволюционного подхода – возможность эффективно исследовать обширное пространство параметров с учётом их взаимозависимостей, в отличие от традиционных методов. Алгоритм не требует специальной

формы целевой функции, легко адаптируется под конкретную задачу и ограничения параметров. Такое решение автоматизирует настройку обнаружителя шага, повышает точность динамического анализа походки и создаёт основу для гибких и индивидуализированных систем анализа движений, адаптирующихся к особенностям оборудования и целей исследования.

Экспериментальное исследование и анализ результатов

Эксперимент выполнялся в специализированных лабораторных условиях. Испытуемые выполняли свободную ходьбу по заранее размеченному маршруту, включающему как прямолинейные, так и поворотные участки, с естественной для себя скоростью в течение заданного интервала времени.

Для регистрации параметров движения использовались инерциальные модули ICM-20948 (InvenSense), оснащённые трёхосевыми акселерометром, гироскопом и магнитометром. Эти модули обеспечивают одновременную регистрацию данных по всем каналам с частотой до 1125 Гц для акселерометра и гироскопа, обладают низким уровнем шумов и энергопотребления, а также компактными габаритами, что допускает их использование вне лабораторных условий. В каждом случае датчики размещались на ключевых сегментах нижних конечностей в соответствии с типовой анатомической схемой для сбора данных о кинематике движения (рисунок 6). На ноги испытуемого дополнительно крепились маркеры системы оптического захвата движения OptiTrack для валидации данных, что иллюстрируется на рисунке 6.

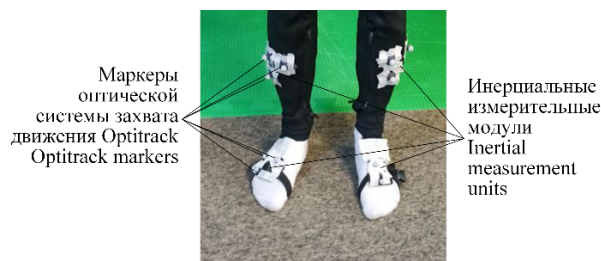


Рисунок 6 – Размещение инерциальных измерительных модулей на ногах с оптическими маркерами Optitrack

Figure 6 – Placement of inertial measurement units on the legs with OptiTrack optical markers

Экспериментальная площадка (рисунок 7) была оснащена системой захвата движения OptiTrack, обеспечивающей высокоточную регистрацию перемещений для верификации алгоритмов. Комплекс включает 12 камер (1,3 МП, 240 кадров/с), размещённых по периметру лаборатории для максимального охвата. Система обеспечивает ошибку измерения положения оптических маркеров не более 1 мм, что позволяет использовать её в качестве «золотого стандарта» при сравнении с инерциальными алгоритмами. На полу отмечены четыре контрольные точки, формирующие базовую траекторию движения испытуемого. Такой подход обеспечивает синхронную регистрацию и подробный сравнительный анализ данных инерциальных и оптических систем.

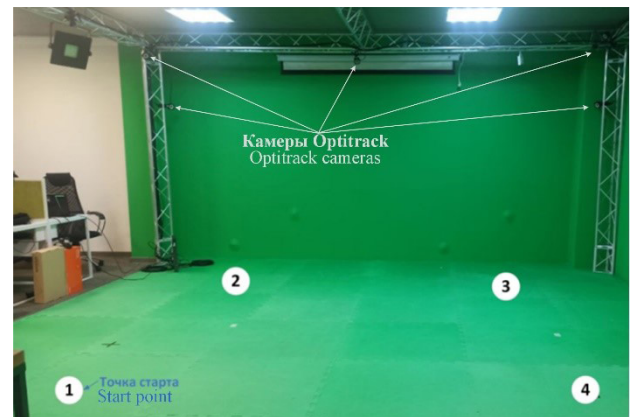


Рисунок 7 – Схема проведения эксперимента

Figure 7 – Experimental setup scheme

Параметры, подбиравшиеся в ходе оптимизации согласно схеме на рисунке 5, включали частоты среза df_{HPF} и df_{LPF} , уровень порога для определения фаз шага. Эволюционный алгоритм начинал с заранее определённой популяции и в процессе 50 поколений эволюционировал к наилучшему решению, минимизируя ошибку между рассчитанными и эталонными координатами. В результате оптимизации были получены следующие параметры: $df_{HPF} = 0,002133$, $df_{LPF} = 2,04$ и уровень порога равный 0,0444, средняя ошибка позиционирования $\Delta\Sigma$ составила 0,1281 м.

На рисунке 8 представлены ключевые результаты проведенной оптимизации. Демонстрируется быстрое снижение ошибки (рисунок 8a) – уже к 17 поколению достигается плато с оптимальными параметрами, подтверждая эффективность и быструю

сходимость метода. Карта на рисунке 8b наглядно показывает области оптимальных частотных характеристик фильтров, при которых

минимизируется ошибка восстановления положения, что подчеркивает ключевую роль фильтрации сигналов.

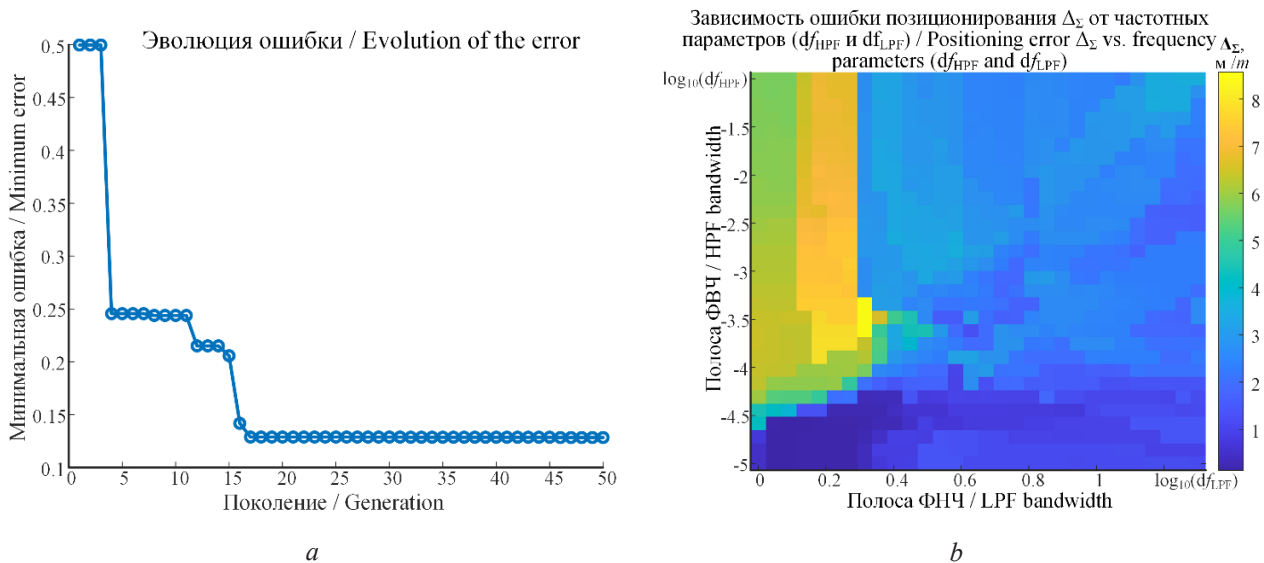


Рисунок 8 – Эффективность оптимизации параметров: *a* – эволюция минимальной ошибки в процессе работы алгоритма оптимизации; *b* – карта влияния частотных параметров фильтрации на ошибку измерения положения

Figure 8 – Optimization efficiency: *a* – evolution of the minimum error during the optimization algorithm; *b* – map of the effect of filter frequency parameters on position error measurement

В завершение, эффективность автоматизированного подбора подтверждается сравнением полученной в результате опти-

мизации траектории и эталонных координат, зарегистрированных системой OptiTrack (см. рисунок 9).

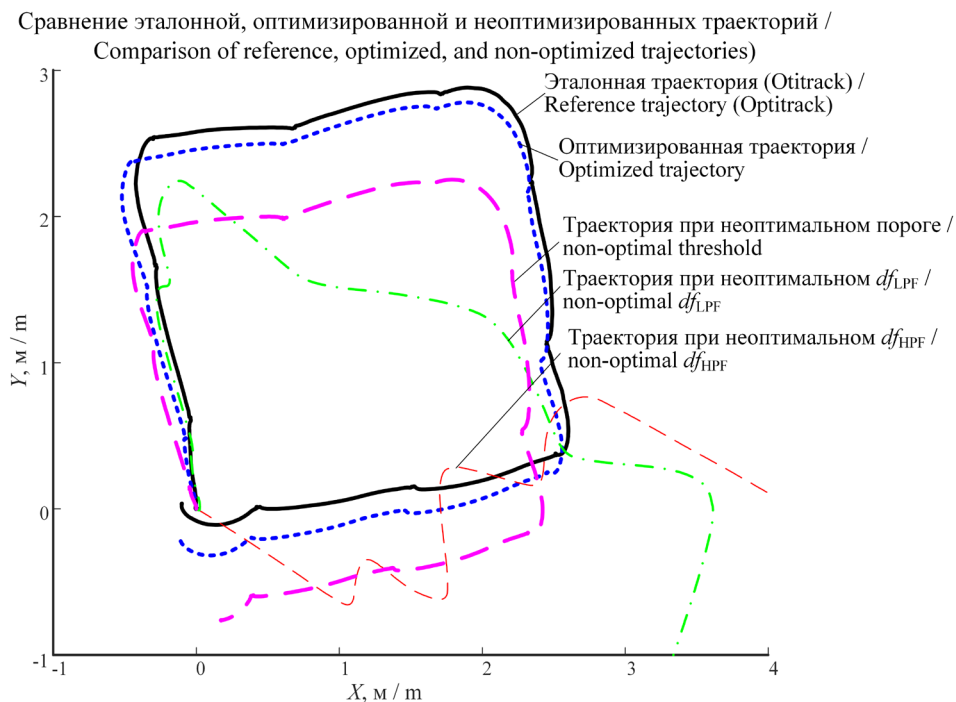


Рисунок 9 – Пример оптимизированной и эталонной траектории

Figure 9 – Example of optimized and reference trajectory

Совпадение оптимизированной и эталонной траекторий (рисунок 9) подтверждает высокую точность автоматизированного метода и его практическую применимость для задач реконструкции походки и других видов локомоции по данным инерциальных модулей. Проведенные эксперименты показали, что интеграция эволюционного алгоритма искусственного интеллекта с оптической системой существенно повышает точность восстановления траекторий, обеспечивая минимальные расхождения даже на сложных участках маршрута. Полученные результаты подтверждают перспективность метода для активной реабилитации, нейроинженерии, мониторинга двигательной активности и делают его универсальным инструментом для задач биомеханики и медицины движения.

Заключение

Разработана и экспериментально апробирована система автоматической оптимизации параметров фильтрации и обнаружения фаз шага по данным трёхосевого акселерометра, закреплённого на стопе. Ключевым элементом подхода стало использование эволюционного алгоритма искусственного интеллекта, обеспечивающего автоматизированный подбор уровня порога и частотных параметров на основе сравнения восстановленных траекторий с эталонными данными, полученными с помощью оптической системы захвата движений OptiTrack. Результаты показали, что внедрение эволюционного поиска существенно снижает ошибку восстановления траекторий шагов по данным инерциальных измерительных модулей, повышает точность обнаружения шага и обеспечивает быструю сходимость алгоритма к оптимальным решениям.

К основным преимуществам метода относятся: высокая точность и устойчивость благодаря автоматической адаптации параметров фильтрации и обнаружения фаз шага, что позволяет снижать погрешности; воспроизводимость за счёт исключения ручного подбора параметров; гибкость – алгоритм адаптируется к разным типам устройств.

Научная новизна исследования заключается во внедрении полностью автоматизированного процесса оптимизации параметров обнаружения фаз шага с применением эволюционного

искусственного интеллекта, что позволяет надёжно решать задачи мониторинга двигательной активности и объективной оценки параметров походки вне лабораторных условий. Полученные результаты открывают новые возможности для интеграции технологии в системы индивидуальной реабилитации, дистанционного контроля состояния, спорта, а также значительно расширяют потенциал носимых сенсорных систем и интеллектуальных медицинских костюмов для биомедицинских и прикладных исследований.

References /

Список использованных источников

1. Winter DA, Thomas SJ, Zeni JA. Winter's Biomechanics and Motor Control of Human Movement. Fifth Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2023;384 p.
2. Yang CC, Hsu YL. A review of accelerometry-based wearable motion detectors for physical activity monitoring. *Sensors*. 2010;10:7772-7788. DOI: 10.3390/s100807772
3. Ortega-Bastidas P, Malagelada J, Vera-Garcia FJ, Prat-González S, Navarro-Flores E, Segura-Ortí E. Instrumented Timed Up and Go Test (iTUG) – More Than Assessing Time to Predict Falls: A Systematic Review. *Gait & Posture*. 2023;104:57-66. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2023.02.016
4. Jung S, Rauter G, Blöchliger M, Dietz N, Jeker R, Wolf P. A Machine Learning Pipeline for Gait Analysis in a Semi Free-Living Environment with Foot-Mounted IMUs. *Sensors*. 2023;23(8):20. DOI: 10.3390/s23084000
5. Dijkstra B, Zijlstra W, Scherder E. [et al.]. Detection of walking periods and number of steps in older adults and patients with Parkinson's disease: accuracy of a pedometer and an accelerometry-based method. *Age and Ageing*. 2008;37:436-441. DOI: 10.1093/ageing/afn097
6. Chen M, Zhang S, Liu Y, Guo Y, Zhu Q, Bai Y, Lin Y, Wei C, Zhang Y. A Systematic Review of Wearable Sensor-Based Technologies for Fall Risk Assessment in Community-Dwelling Older Adults. *Sensors*. 2022;22(18):6752. DOI: 10.3390/s22186752
7. Banos O, Galvez JM, Damas M. [et al.]. Window Size Impact in Human Activity Recognition. *Sensors*. 2014;14:6474-6499. DOI: 10.3390/s140406474
8. Song Z, Ou J, Shu L, Hu G, Wu S, Xu X, Chen Z. Fall Risk Assessment for the Elderly Based on Weak Foot Features of Wearable Plantar Pressure. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2022;30:1060-1070. DOI: 10.1109/TNSRE.2022.3167473

9. Xu L, Yang F, Li J, Mu Z, Xiao Z. Wearable Continuous Gait Phase Estimation During Walking, Running, Turning, Stairs, and Over Uneven Terrain. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*. 2024;6:1135-1146.

DOI: 10.1109/TMRB.2024.3407366

10. Bet P, Castro PC, Ponti MA. Foreseeing Future Falls with Accelerometer Features in Active Community-Dwelling Older Persons with No Recent History of Falls. *Experimental Gerontology*. 2021;143:111139.

DOI: 10.1016/j.exger.2020.111139

11. Wang Z, Zhao H, Qiu S. [et al.]. Stance-Phase Detection for ZUPT-Aided Foot-Mounted Pedestrian

Navigation System. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2015;20:2661-2669.

DOI: 10.1109/TMECH.2015.2430357

12. Хмарский П.А., Голубева С.А., Губкин С.В., Лемешко Е.В. Использование в медицинских исследованиях тактильного костюма Teslasuit с системой инерциального захвата движения // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2024. – № 2. – С. 41–52.

12. Khmarskiy PA, Golubeva SA, Gubkin SV, Lemeshko EV. Use of a Teslasuit tactile suit with an inertial motion capture system in medical research. *Nondestructive Testing and Diagnostics*. 2024;2:41-52. (In Russ.).