

## Разработка и апробация методики сбора данных для формирования нормативной базы биомеханических параметров двигательной активности человека

И. А. Сакун<sup>1,2✉</sup>, Д. Б. Попов<sup>1,2</sup>, Е. М. Скребова<sup>2</sup>, М. Д. Самароков<sup>2</sup>,  
Т. В. Тюлькина<sup>2</sup>, В. В. Кравченко<sup>3</sup>, А. С. Мулык<sup>3</sup>, А. В. Губин<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup> Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

✉ [sakunia@infran.ru](mailto:sakunia@infran.ru)

### Аннотация

**Введение.** Формирование обоснованных нормативных диапазонов биомеханических параметров движений человека критически важно для диагностики нарушений, планирования оперативного и консервативного лечения в травматологии-ортопедии, контроля реабилитации и разработки реабилитационных устройств. Разработка методики сбора и анализа данных является приоритетной задачей для создания такой базы.

**Цель работы.** Разработка и апробация методики сбора и анализа биомеханических параметров основных двигательных активностей (ходьба, приседания, выпады, наклоны туловища) с использованием современных средств регистрации для создания нормативной базы пространственно-временных, угловых и электромиографических характеристик.

**Материалы и методы.** Использованы: система захвата движения Qualisys, динамометрические платформы Kistler, система беспроводной поверхностной электромиографии (ЭМГ) Delsys Trigno. В исследовании участвовали 8 здоровых добровольцев. Данные собирались в научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Предобработка данных включала интерполяцию траекторий маркеров, сглаживание ЭМГ-сигналов и удаление выбросов. Нормативные диапазоны рассчитывались на основе средних значений и стандартных отклонений.

**Результаты.** Разработана и апробирована методика сбора биомеханических данных для четырех движений. Получены усредненные значения и предварительные нормативные диапазоны кинематических, кинетических и ЭМГ-параметров, отражающие паттерны движений и мышечной активации у здоровых лиц. Результаты показали, что предложенная методика эффективна для комплексного сбора и анализа биомеханических данных. Использование систем Qualisys и Delsys Trigno обеспечило точную регистрацию параметров движения. Разработанные предварительные нормативные диапазоны демонстрируют потенциал методики для применения в задачах диагностики двигательных отклонений, реабилитации и инженерного проектирования.

**Заключение.** Полученные нормативные данные служат основой для дальнейшего расширения выборки и формирования полноценной базы, необходимой в клинической практике и инженерных разработках в области коррекции движений.

**Ключевые слова:** биомеханика, нормативная база, методика, сбор данных, кинематика, кинетика, электромиография, ходьба, приседания, выпады, наклоны

**Для цитирования:** Разработка и апробация методики сбора данных для формирования нормативной базы биомеханических параметров двигательной активности человека / И. А. Сакун, Д. Б. Попов, Е. М. Скребова, М. Д. Самароков, Т. В. Тюлькина, В. В. Кравченко, А. С. Мулык, А. В. Губин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2026. Т. 29, № 2. С. 104–118.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-104-118

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности.** Работы выполнены с использованием оборудования научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" СПбГЭТУ "ЛЭТИ".

Статья поступила в редакцию 17.07.2025; принята к публикации после рецензирования 03.03.2026; опубликована онлайн 30.04.2026

## Development and Testing of a Data Collection Methodology for Compiling a Normative Database of Biomechanical Parameters of Human Motor Activity

Ivan A. Sakun<sup>1,2✉</sup>, Dmitry B. Popov<sup>1,2</sup>, Elena M. Skrebova<sup>2</sup>, Mikhail D. Samarokov<sup>2</sup>, Tatyana V. Tyulkina<sup>2</sup>, Vladimir V. Kravchenko<sup>3</sup>, Anzhela S. Mulyk<sup>3</sup>, Alexander V. Gubin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, St Petersburg, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Saint Petersburg State University, St Petersburg, Russia

✉ sakunia@infran.ru

### Abstract

**Introduction.** The determination of normative ranges for the biomechanical parameters of human motor activity is a relevant task for disorder diagnostics, orthopedic treatment planning, rehabilitation monitoring, and development of assistive devices. The creation of such a database requires a validated methodology for data collection and analysis.

**Aim.** To develop and test a methodology for collecting and analyzing the biomechanical parameters of fundamental motor activities (walking, squats, lunges, torso bends) using modern motion capture systems with the purpose of compiling a normative database of spatiotemporal, angular, and electromyographic (EMG) characteristics.

**Materials and methods.** The Qualisys motion capture system (kinematics), Kistler force plates (kinetics), and the Delsys Trigno EMG system (activity of key lower limb muscles) were used. Data was collected from eight healthy volunteers in a laboratory setting following a standard protocol. Preprocessing included marker trajectory interpolation, EMG signal smoothing, and outlier removal (based on IQR). Normative ranges ( $\pm 1$  SD) were calculated based on mean values and standard deviations.

**Results.** A methodology for collecting biomechanical data for four types of motor activity (walking, squats, lunges, torso bends) was developed and tested. The average values and preliminary normative ranges for spatiotemporal, angular, and EMG parameters were obtained, reflecting characteristic movement patterns and muscle activation in healthy individuals. According to the results obtained, the proposed methodology is effective for comprehensive collection and analysis of biomechanical data. The use of Qualisys and Delsys Trigno systems ensured accurate recording of kinematic, kinetic, and EMG movement parameters. The developed preliminary normative ranges indicate the potential of the methodology for diagnosing movement disorders, rehabilitation, and engineering design (exoskeletons, prosthetics).

**Conclusion.** The proposed methodology represents a reliable tool for an objective functional assessment of human motor activity. The obtained preliminary normative data serves as a foundation for further sample expansion and formation of a comprehensive database essential for clinical practice (diagnosis, treatment monitoring, rehabilitation) and engineering applications in movement correction.

**Keywords:** biomechanics, normative database, methodology, data collection, kinematics, kinetics, electromyography, walking, squats, lunges, torso bends

**For citation:** Sakun I. A., Popov D. B., Skrebova E. M., Samarokov M. D., Tyulkina T. V., Kravchenko V. V., Mulyk A. S., Gubin A. V. Development and Testing of a Data Collection Methodology for Compiling a Normative Database of Biomechanical Parameters of Human Motor Activity. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2026, vol. 29, no. 2, pp. 104–118.

doi: 10.32603/1993-8985-2026-29-2-104-118

**Conflict of interest.** The authors declare no conflicts of interest.

**Acknowledgements.** The work was performed using the equipment of the research laboratory "Motion Capture and Modelling Systems" of Saint Petersburg Electrotechnical University.

Submitted 17.07.2025; accepted 03.03.2026; published online 30.04.2026

**Введение.** Современная биомеханика основана на применении точных инструментальных методов, позволяющих получить количественные характеристики движения: кинематические, пространственно-временные, кинетические и с помощью электромиографии (ЭМГ). Исследо-

Разработка и апробация методики сбора данных для формирования нормативной базы биомеханических параметров двигательной активности человека

Development and Testing of a Data Collection Methodology for Compiling a Normative Database of Biomechanical Parameters of Human Motor Activity

вание биомеханики важно для обследования и лечения пациентов травматолого-ортопедического профиля, например при остеоартрозе или различных заболеваниях позвоночника [1, 2]. Данные кинематики и пространственно-временные параметры движения можно получить с помощью метода маркерного видеонализа, силовые (кинетические) и постуральные параметры движения оцениваются с помощью динамометрических платформ. Самым современным методом оценки работы мышц во время движения является беспроводная поверхностная ЭМГ. Все эти методы по отдельности дают лишь частичное понимание биомеханики движения. Чтобы получить полноценный анализ, все вышеперечисленные параметры необходимо оценивать в едином временном интервале, а их регистрация должна выполняться синхронно и сохраняться в единый файл. Такой подход обеспечивают современные системы захвата и моделирования движения, объединяющие систему высокоточных камер с силовыми платформами и системой ЭМГ в одном программном модуле. При этом актуальной задачей остается формирование и наличие обоснованных нормативных диапазонов биомеханических параметров для различных движений человека. Это необходимо для оценки отклонений от физиологической нормы, в том числе в задачах диагностики функциональных нарушений, планировании оперативного лечения и реабилитации в послеоперационном периоде, разработки экзоскелетных и реабилитационных устройств.

Существующие в литературных источниках данные о нормативных базах содержат сведения преимущественно о походках различных возрастных групп. Данные выборки собраны с помощью различных методов и инструментов и чаще всего представляют собой фрагментарные и разрозненные по параметрам массивы. Например, в исследовании с участием 90 человек в возрасте от 2 до 18 лет представлены данные о нормативных кинематических и кинетических параметрах ходьбы на беговой дорожке с различной скоростью [3]. Н. J. Bennett и соавторы [4] описали сбор биомеханических параметров движений тазобедренного и коленного суставов 15 мужчин и 15 женщин. В другом исследовании, основанном на данных 1000

участников, были изучены пространственно-временные параметры движения на разных типах поверхности, что дало возможность учесть индивидуальные особенности ходьбы в разных условиях [5]. Исследования биомеханики при различных физиологических процессах позволяют выявлять патологические болевые паттерны, что способствует более точной диагностике и эффективному лечению заболеваний опорно-двигательного аппарата, например при болях в поясничном отделе позвоночника [6, 7]. В работе [8], посвященной анализу походки в условиях виртуальной реальности, были получены нормативные данные 246 здоровых взрослых при ходьбе на беговой дорожке. В некоторых исследованиях применялись комплексные подходы, такие как комбинированное использование маркерных систем с датчиками силы и ЭМГ и несколько условий ходьбы [9, 10]. Однако эти данные являются закрытыми.

Отдельно стоит отметить базы нормативных параметров для разных возрастных групп, большая часть которых относится к детям. Известно о нормативной выборке ЭМГ мышц нижних конечностей при исследовании походки у 100 детей [11]. С использованием электронной беговой дорожки с участием 438 детей в возрасте от 1 до 10 лет собраны пространственно-временные параметры ходьбы [12]. Также публиковались материалы исследования, посвященного формированию нормативных показателей по высоте при выполнении прыжков на 1 ноге и параметров шага при ходьбе с нормальной скоростью, полученные от 360 детей 7–12 лет [13]. Для оценки угла наклона стопы относительно пола сформирован нормативный набор кинематических данных, полученный с помощью маркерного видеонализа с участием 120 здоровых детей при выполнении нормальной ходьбы и у 11 детей с патологией (ходьба на носочках) [14]. С помощью инерциальной системы захвата собраны пространственно-временные параметры походки 175 детей и молодых людей [15]. Существующие литературные данные включают также исследования, посвященные специфическим задачам, например ходьбе по лестнице [16, 17] и движениям верхних конечностей [18]. Тем не менее существующие базы данных ограничены

по набору движений, что делает необходимым расширение и уточнение этих данных. Нет информации о существующих нормативных базах параметров таких двигательных задач, как прыжки, приседания, наклоны, выпады на колено и прочих спортивных упражнений.

В последние годы развивается технология безмаркерного захвата движений, которая требует постоянной валидации с методом маркерного видеонализа, являющегося наиболее точным среди имеющихся. Поэтому потребность в стандартизированных наборах биомеханических параметров и спектр двигательных задач не только не уменьшаются, но и стремительно растут вместе с расширением области применения безмаркерных технологий [19]. Разрозненность подходов и фрагментарность существующих нормативных выборок затрудняют получение референсных данных о двигательной активности в полном объеме и их применение в прикладных задачах.

Текущее исследование направлено на разработку и апробацию комплексной методики формирования нормативной базы биомеханических параметров, отличительной чертой которой является использование маркерной модели всего тела, электромиографии, динамометрических платформ, а также охватывает разнообразные двигательные задачи (наклоны, приседания, выпады и ходьбу с различной скоростью). Отсутствие аналогичных комплексных разработок в российской научной практике подчеркивает актуальность и новизну предлагаемого подхода.

**Материалы и методы.** Настоящее исследование включало несколько последовательных этапов: разработку протокола синхронной регистрации кинематических, кинетических и электромиографических данных, проведение экспериментального измерения, обработку полученных сигналов и формирование предварительных нормативных диапазонов.

В исследовании приняли участие восемь здоровых добровольцев мужского пола ( $n = 8$ ) без видимых нарушений опорно-двигательного аппарата и неврологических заболеваний. Средний возраст составил  $24.71 \pm 5.38$  лет, средний рост –  $179 \pm 6.06$  см. Все участники были ознакомлены с условиями эксперимента и дали информированное согласие.

Сбор кинематических данных выполнялся в научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" СПбГЭТУ "ЛЭТИ" с использованием метрологически поверенной системы оптического захвата Qualisys (Швеция). Частота дискретизации составляла 150 Гц. На теле участников закреплялись отражающие маркеры согласно модели IOR Full Body Marker Set [20], ориентированной на анализ движений туловища и конечностей в трех анатомических плоскостях.

Кинетические параметры регистрировались двумя динамометрическими платформами Kistler (Швейцария), встроенными в пол и синхронизированными с системой Qualisys через программное обеспечение Qualisys Track Manager (QTM). Частота опроса платформ – 1000 Гц. Фиксировались векторы силы реакции опоры, на основе которых рассчитывались суставные моменты и пространственно-временные характеристики ходьбы (фазы опоры и переноса).

Мышечная активность измерялась беспроводной 16-канальной системой поверхностной электромиографии Delsys Trigno (США) с частотой дискретизации 2148 Гц. Электроды размещались в соответствии с рекомендациями SENIAM [21] на трех мышцах нижних конечностей: передней большеберцовой (*m. tibialis anterior*), медиальной головке икроножной (*m. gastrocnemius medialis*) и прямой мышце бедра (*m. rectus femoris*). Регистрация проводилась билатерально.

В работе были выбраны четыре функционально значимых движения:

- ходьба по ровной поверхности с четырьмя скоростями (1.5; 3.0; 4.5 и 6.0 км/ч);
- приседания с полной амплитудой до максимального сгибания коленных и тазобедренных суставов;
- выпады вперед на одну ногу;
- наклоны туловища вперед.

Выбор данных упражнений обусловлен способностью этих движений задействовать основные мышечные группы и суставы, что дает комплексную информацию для задач реабилитации, спорта и инженерного проектирования. Приседания активируют квадрицепсы, бицепсы бедра, ягодичные мышцы и разгибатели спины; наклоны туловища вовлекают мышцы спины и кора, позволяя оценить биомехани-

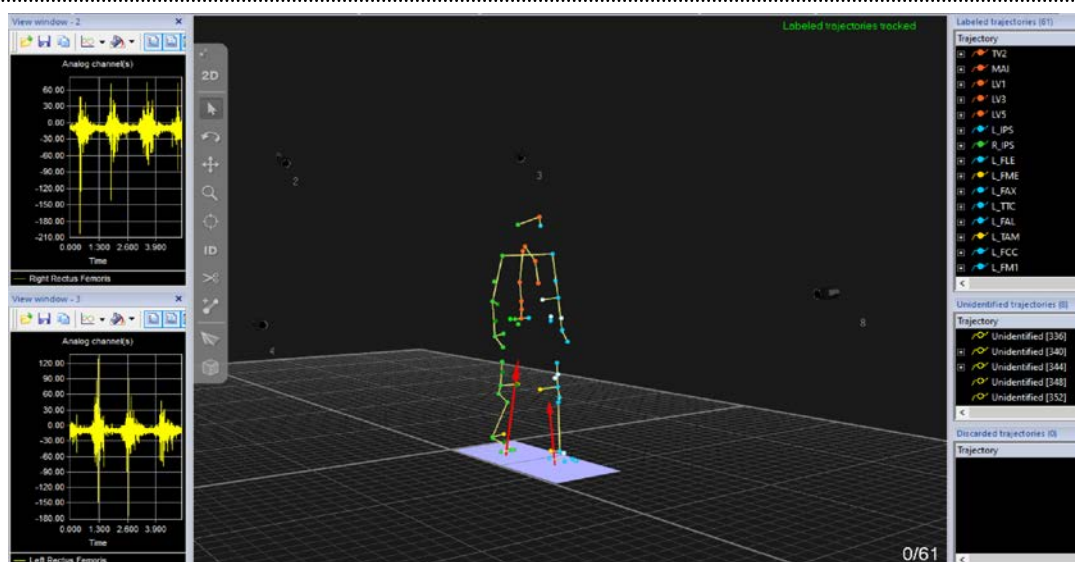


Рис. 1. Данные, обработанные в Qualisys Track Manager  
Fig. 1. Data processed in Qualisys Track Manager

ку поясничного отдела и тазобедренного сустава; выпады направлены на активацию квадрицепсов, ягодичных мышц и мышц бедра, важны для оценки стабильности нижних конечностей. Все задания выполнялись в спортивной обуви после краткого инструктажа и пробного повторения, в стандартизированной последовательности. Для каждого участника создавался индивидуальный каталог, включавший 6 динамических и одну статическую запись.

Первичная фильтрация и интерполяция траекторий маркеров, а также сглаживание ЭМГ-сигналов проводились в среде QTM. Пример обработанных данных представлен на рис. 1.

Далее данные экспортировались в программу Visual3D, где строилась биомеханическая модель испытуемого и вычислялись угловые, линейные и энергетические параметры движений. Для каждого участка формировался отчет.

Для обеспечения сопоставимости данных между испытуемыми и мышцами проводилась амплитудная нормализация: значения огибающей каждого канала ЭМГ делились на максимальное значение, зарегистрированное при выполнении данного двигательного задания (для ходьбы – на максимум в цикле шага, для приседаний, выпадов и наклонов – на пик в цикле действия). Для унификации анализа все временные ряды (углы, моменты, ЭМГ) приводились к единой временной шкале. При ходьбе использовалась нормировка на цикл шага, определяемый интервалом между двумя последователь-

ными касаниями пятки одной ноги (0–100 %). Для приседаний, выпадов и наклонов применялась нормировка на цикл действия – от момента начала движения из исходного вертикального положения (0 %) до возврата в него (100 %).

Заключительный этап исследования посвящен формированию нормативной базы. Для этого данные экспортировались в формат, пригодный для анализа с помощью пользовательских скриптов, реализованных в среде Python. Алгоритмы обработки включали этапы нормализации, усреднения данных по участникам и вычисления диапазонов нормативных значений. Для построения нормативной базы рассчитывались средние значения и стандартные отклонения по каждому из биомеханических параметров, а нормативный интервал определялся как диапазон, ограниченный границами стандартного отклонения от среднего значения. Алгоритм, реализованный в пользовательском скрипте, предусматривал автоматическую обработку большого массива данных, с выделением ключевых пространственно-временных, угловых, кинетических и электромиографических параметров. В качестве исходных параметров нормативной базы рассматривались следующие группы характеристик: кинематические (суставные углы, траектории движения сегментов, амплитуды движений), кинетические (силы реакции опоры, моменты силы в суставах, мощность), а также ЭМГ.

**Результаты.** Получены экспериментальные данные, характеризующие биомеханику движений нижних и верхних конечностей у 8 здоровых добровольцев. Проведен анализ угловых параметров тазобедренного, коленного, голеностопного, плечевого и локтевого суставов, а

также положения грудного отдела позвоночника относительно лабораторных координат в трех плоскостях движения. В сагиттальной плоскости рассчитаны суставные моменты и мощности для указанных суставов. Полученные значения были усреднены и использованы

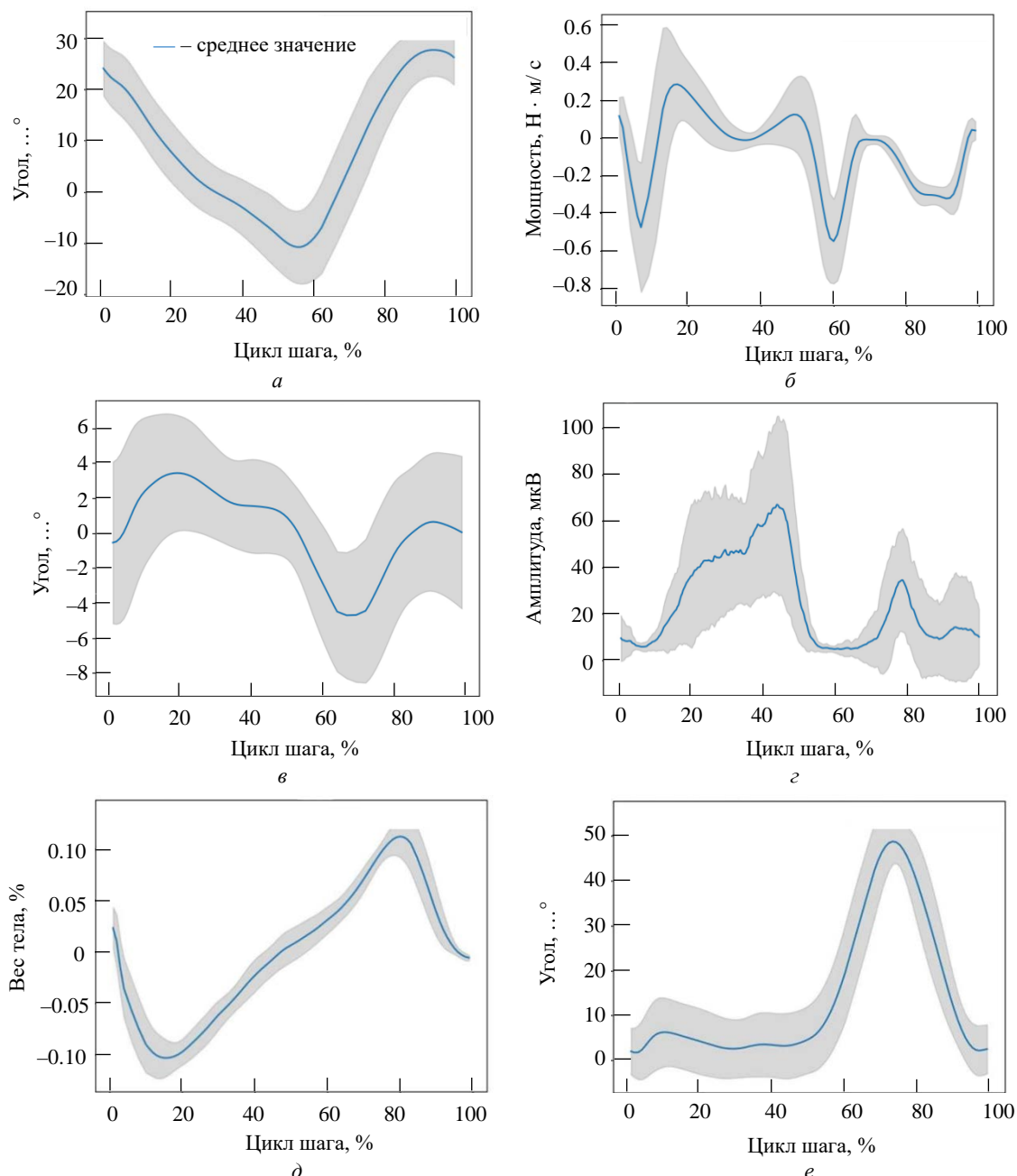


Рис. 2. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при ходьбе со скоростью 3 км/ч: *a* – угол сгибания правого бедра в сагиттальной плоскости; *б* – генерируемая в правом колене мощность в сагиттальной плоскости; *в* – угол сгибания правого бедра во фронтальной плоскости; *г* – ЭМГ левой медиальной головки икроножной мышцы; *д* – сила реакции опоры во фронтальной плоскости; *е* – угол сгибания правого колена в сагиттальной плоскости

Fig. 2. Normative ranges of biomechanical parameters values during walking at a speed of 3 km/h: *a* – angle of flexion of the right hip in the sagittal plane; *б* – power generated in the right knee in the sagittal plane; *в* – angle of flexion of the right hip in the frontal plane; *г* – EMG of the left medial head of the calf muscle; *д* – reaction force in the frontal plane; *е* – angle of flexion of the right knee in the sagittal plane

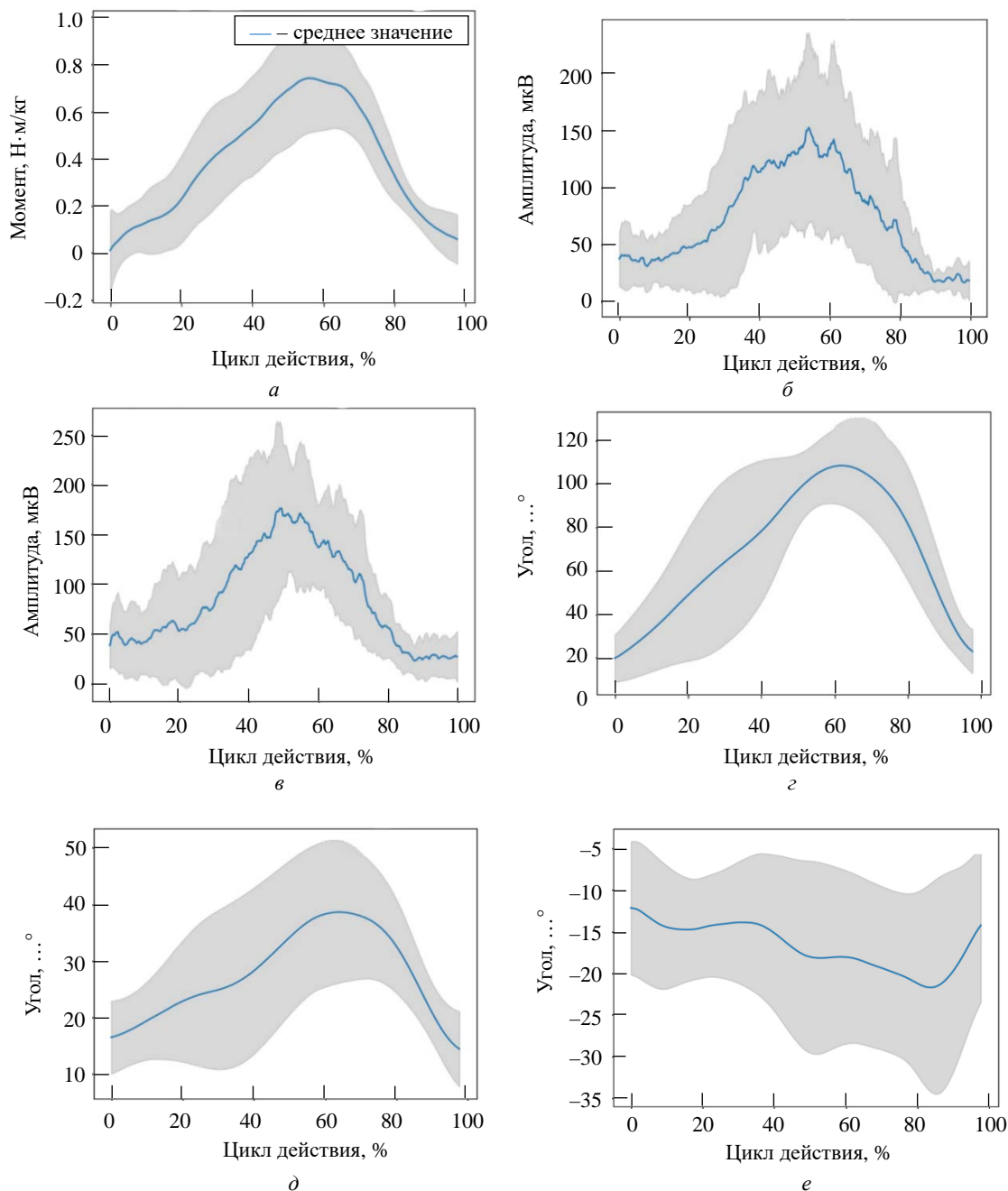


Рис. 3. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при приседаниях: *a* – момент силы в левом бедре в сагиттальной плоскости; *б* – ЭМГ левой передней большеберцовой мышцы; *в* – ЭМГ правой передней большеберцовой мышцы; *г* – угол сгибания правого плеча в сагиттальной плоскости; *д* – угол наклона туловища в сагиттальной плоскости; *е* – угол сгибания правого плеча во фронтальной плоскости

Fig. 3. Normative ranges of biomechanical parameters during squats: *a* – moment of force in the left hip in the sagittal plane; *б* – EMG of the left anterior tibial muscle; *в* – EMG of the right anterior tibial muscle; *г* – angle of flexion of the right shoulder in the sagittal plane; *д* – angle of inclination of the trunk in the sagittal plane; *е* – angle of flexion of the right shoulder in the frontal plane

для построения нормативных диапазонов биомеханических параметров. Примеры графиков нормативных диапазонов значений биомеханических параметров для ходьбы, приседаний, выпадов на ногу и наклонов туловища вперед представлены на рис. 2–5 соответственно.

На рис. 6 и 7 представлены нормативные диапазоны ( $M \pm SD$ ) углов сгибания в коленном и голеностопном суставах, полученные для четырех различных скоростей ходьбы. Визуальный анализ графиков позволяет проследить характерные изменения амплитуды и времен-

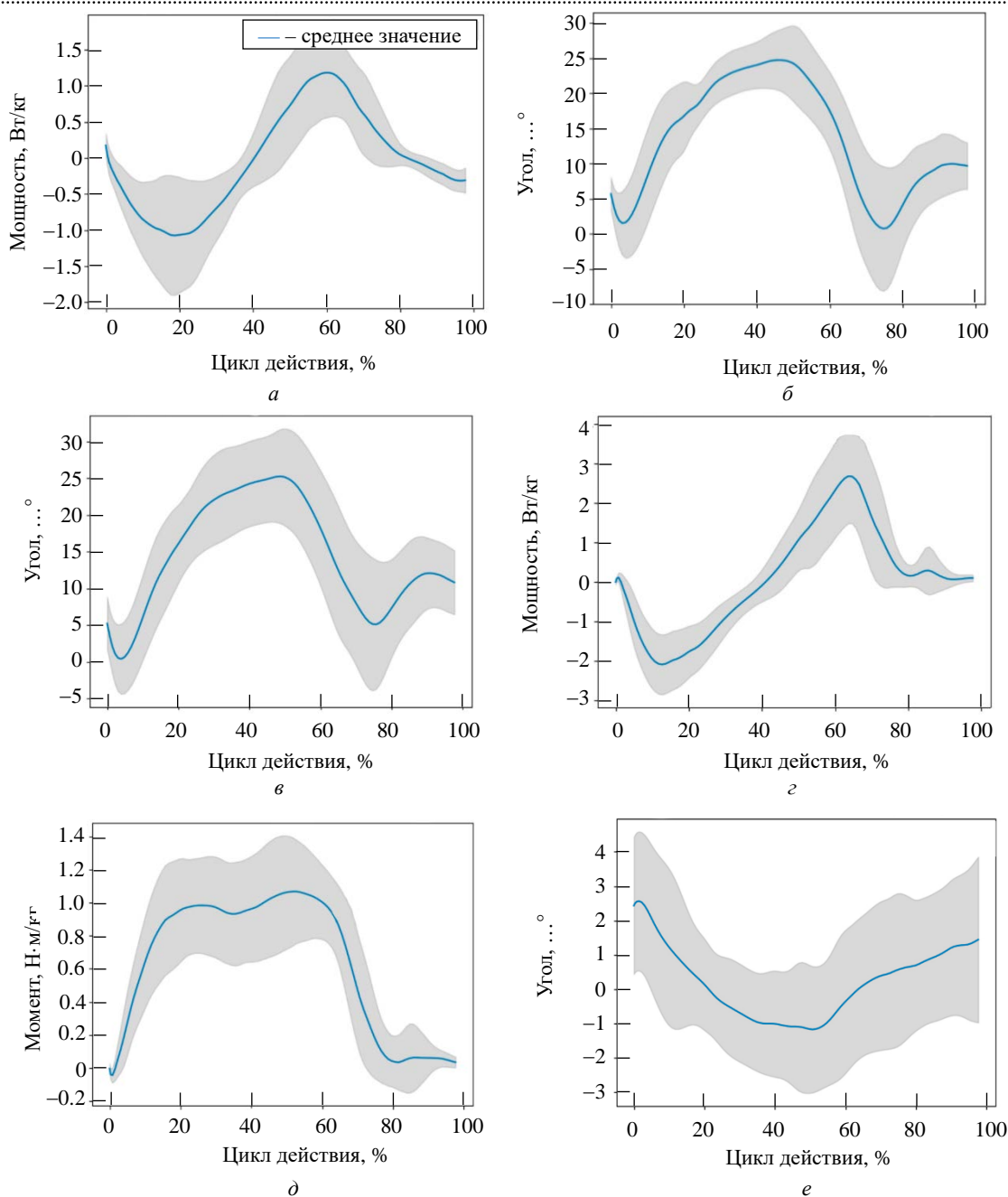


Рис. 4. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при выпадах на ногу: *a* – генерируемая в левом бедре мощность в сагиттальной плоскости; *b* – угол сгибания правого голеностопа в сагиттальной плоскости; *v* – угол сгибания левого голеностопа в сагиттальной плоскости; *z* – генерируемая в левом колене мощность в сагиттальной плоскости; *d* – момент силы в левом колене в сагиттальной плоскости; *e* – угол вращения туловища в горизонтальной плоскости

Fig. 4. Normative ranges of biomechanical parameters during single-leg lunges: *a* – power generated in the left hip in the sagittal plane; *b* – angle of right ankle flexion in the sagittal plane; *v* – angle of left ankle flexion in the sagittal plane; *z* – power generated in the left knee in the sagittal plane; *d* – moment of force in the left knee in the sagittal plane; *e* – angle of trunk rotation in the horizontal plane

ной структуры суставных движений по мере увеличения темпа ходьбы.

**Обсуждение.** На основе экспериментальных данных, полученных с применением маркерной системы Qualisys, платформ

Kistler и ЭМГ системы Delsys Trigno, разработана методика сбора и формирования первичной нормативной базы биомеханических параметров для четырех базовых двигательных активностей: ходьба при разных скоро-

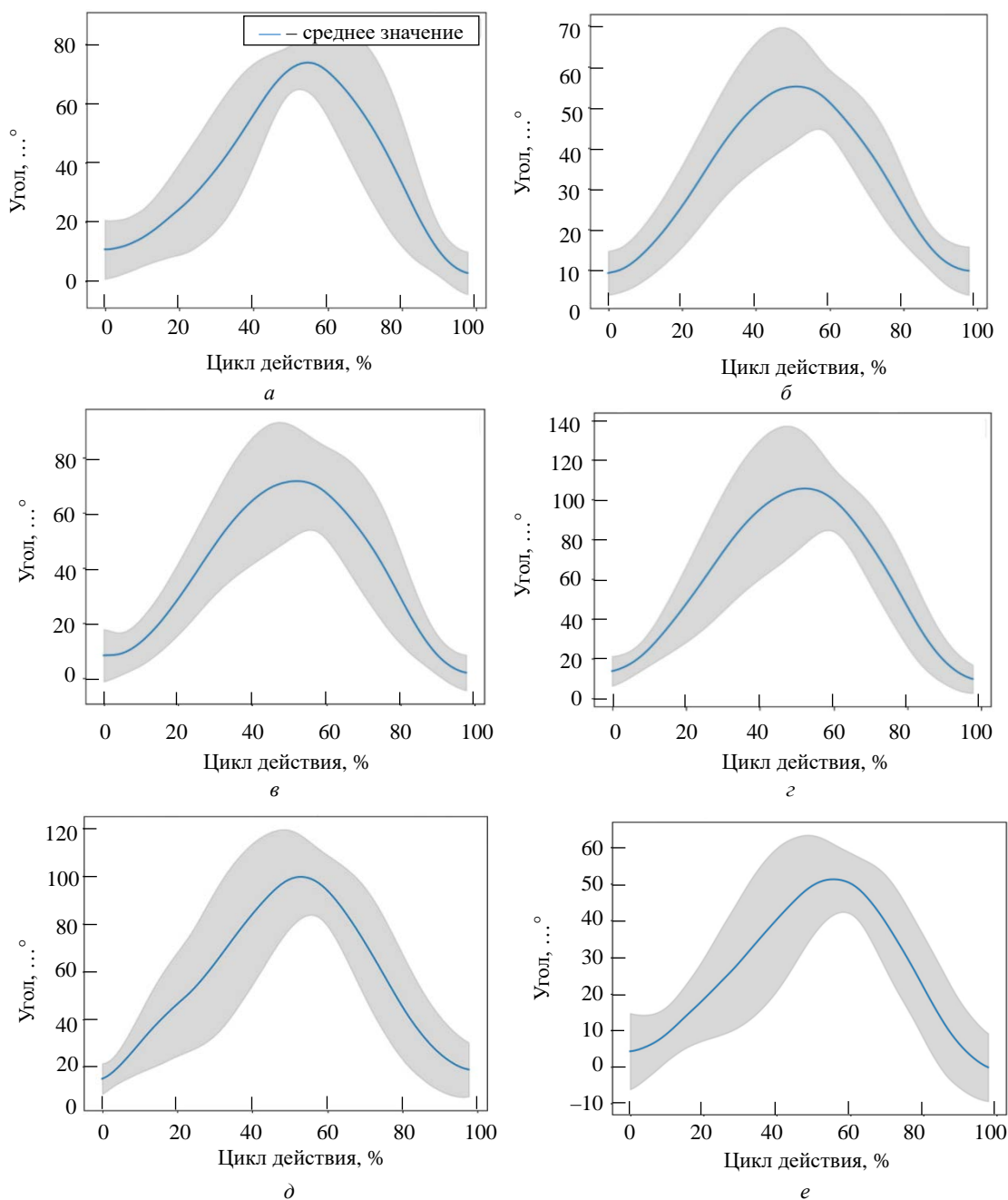


Рис. 5. Нормативные диапазоны значений биомеханических параметров при наклонах туловища вперед: *a* – угол сгибания правого бедра в сагиттальной плоскости; *б* – угол наклона левой стороны таза в сагиттальной плоскости; *в* – угол сгибания левого бедра в сагиттальной плоскости; *г* – угол наклона левой стороны туловища относительно лабораторной системы координат в сагиттальной плоскости; *д* – угол сгибания правого плеча в сагиттальной плоскости; *е* – угол наклона туловища в сагиттальной плоскости

Fig. 5. Normative ranges of biomechanical parameters when the trunk is tilted forward: *a* – the angle of the right thigh flexion in the sagittal plane; *б* – the angle of the left side of the pelvis tilt in the sagittal plane; *в* – the angle of the left thigh flexion in the sagittal plane; *г* – the angle of the left side of the trunk tilt relative to the laboratory coordinate system in the sagittal plane; *д* – the angle of the right shoulder flexion in the sagittal plane; *е* – the angle of the trunk tilt in the sagittal plane

стях, приседания, выпады и наклоны. Методика продемонстрировала свою эффективность при оценке двигательной активности здоровых людей.

Результаты показали, что разработанный протокол позволяет получать воспроизводимые биомеханические параметры, характеризующие выполнение типичных двигательных заданий

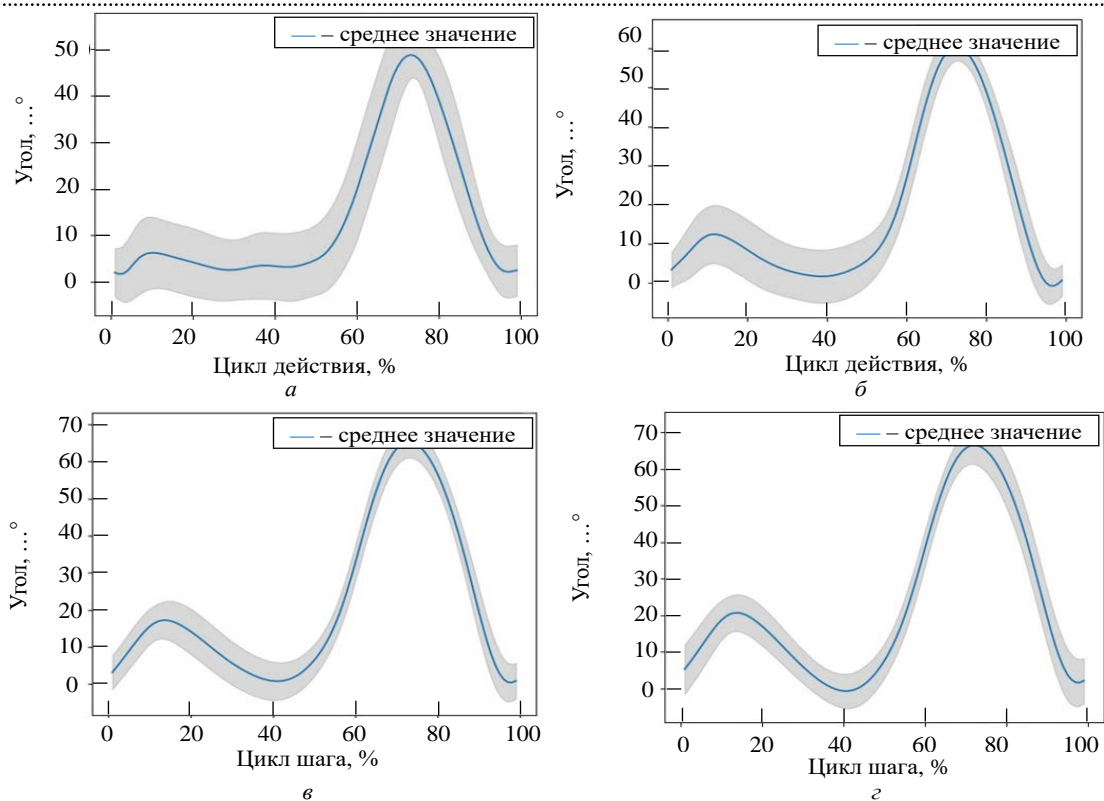


Рис. 6. Нормативные диапазоны угла сгибания правого колена в сагиттальной плоскости при разной скорости ходьбы [км/ч]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

Fig. 6. Normative ranges of the right knee flexion angle in the sagittal plane at different walking speeds [km/h]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

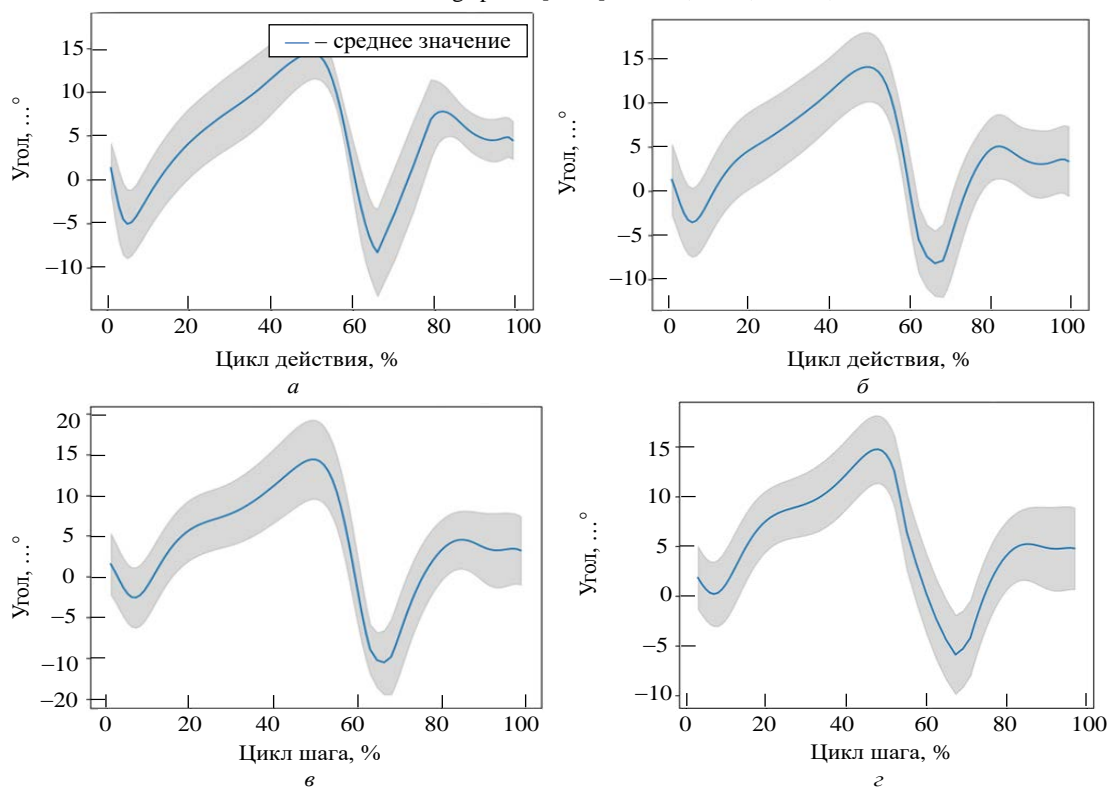


Рис. 7. Нормативные диапазоны угла сгибания правого голеностопа в сагиттальной плоскости при разной скорости ходьбы [км/ч]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

Fig. 7. Normative ranges of the angle of flexion of the right ankle in the sagittal plane at different walking speeds [km/h]: а – 1.5; б – 3; в – 4.5; г – 6

(в частности, ходьбы в стандартных условиях). На основе этих данных были определены ориентировочные диапазоны ключевых биомеханических параметров, отражающих особенности физиологически нормального двигательного стереотипа. Полученные профили биомеханических параметров при ходьбе с разными скоростями совпадают с результатами, опубликованными в зарубежных исследованиях [9, 17]. Следует подчеркнуть, что в рамках данной статьи речь идет не о формировании окончательной нормативной базы, а об апробации подхода к ее построению. Полученные результаты носят пилотный характер и не претендуют на статистическую репрезентативность в силу ограниченного объема выборки. Тем не менее разработанная методика закладывает основу

для дальнейшего масштабного сбора данных, направленного на формирование полноценных нормативных справочников, пригодных для использования в клинической практике, реабилитации, спортивной медицине и инженерных приложениях – таких как проектирование ортопедических изделий и систем протезирования.

**Заключение.** Предложенная методика сбора и анализа биомеханической информации представляет собой перспективный инструмент для объективной функциональной оценки двигательной активности человека и может быть адаптирована для широкого спектра практических задач. Такой подход позволяет сформировать контрольно-отправные точки для исследования, диагностики и лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата.

#### Авторский вклад

**Сакун Иван Антонович** – сбор данных; разработка и реализация алгоритма; написание статьи.  
**Попов Дмитрий Борисович** – обработка данных; разработка и реализация алгоритма; написание статьи.  
**Скребова Елена Михайловна** – обработка и анализ данных; реализация алгоритма; написание статьи.  
**Самароков Михаил Дмитриевич** – сбор данных; обработка данных; реализация алгоритма.  
**Тюлькина Татьяна Владимировна** – сбор данных; обработка данных.  
**Кравченко Владимир Владимирович** – редактирование статьи.  
**Мулык Анжела Сергеевна** – редактирование статьи.  
**Губин Александр Вадимович** – редактирование статьи.

#### Author's contribution

**Ivan A. Sakun**, data collection, processing and analysis; development and implementation of the algorithm; writing the article.  
**Dmitry B. Popov**, data processing; development and implementation of the algorithm; writing the article.  
**Elena M. Skrebova**, data processing and analysis; implementation of the algorithm; writing the article.  
**Mikhail D. Samarokov**, data collection; data processing; implementation of the algorithm.  
**Tatyana V. Tyulkina**, data collection; data processing.  
**Vladimir V. Kravchenko**, editing the article.  
**Angela S. Mulyk**, editing the article.  
**Alexander V. Gubin**, editing the article.

#### Список литературы

1. Osteoarthritis year in review 2024: Biomechanics / A. Mündermann, C. Nüesch, H. Ewald, I. Jonkers // *Osteoarthritis Cartilage*. 2024. Vol. 32, № 12. P. 1530–1541. doi: 10.1016/j.joca.2024.09.011
2. Когельников А. О., Рябых С. О., Бурцев А. В. "Hip-spine" синдром – взгляд на проблему с точки зрения биомеханики // *Гений ортопедии*. 2019. Т. 25, № 4. С. 541–549. doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-541-549
3. How normal is normal: Consequences of stride to stride variability, treadmill walking and age when using normative paediatric gait data / L. M. Oudenhoven, A. T. C. Booth, A. I. Buizer, J. Harlaar, M. M. van der Krogt // *Gait & Posture*. 2019. Vol. 70. P. 289–297. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.03.011
4. Bennett H. J., Fleenor K., Weinhandl J. T. A normative database of hip and knee joint biomechanics during dynamic tasks using anatomical regression prediction methods // *J. of Biomechanics*. 2018. Vol. 81. P. 122–131. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.10.003
5. Adhaye A. M., Jolhe D. A. GAIT measurement methods: systematic review and comparative studies // *J. of Mechanics in Medicine and Biology*. 2024. Vol. 24, № 01. Art. № 2330002. doi: 10.1142/S0219519423300028
6. Not all movements are equal: Differences in the variability of trunk motor behavior between people with and without low back pain – A systematic review with descriptive synthesis / F. Abu Bakar, J. B. Staal, R. van Cingel, H. Saito, R. Ostelo, J. H. van Dieën // *PLoS One*. 2023. Vol. 18, № 9. Art. № e0286895.

doi: 10.1371/journal.pone.0286895

7. Walking, Cycling, and Swimming for Nonspecific Low Back Pain: A Systematic Review with Meta-analysis / N. C. Pocovi, T. F. de Campos, C. W. Christine Lin, D. Merom, A. Tiedemann, M. J. Hancock // *J. of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2022. Vol. 52, № 2. P. 85–99.

doi: 10.2519/jospt.2022.10612

8. Normative 3D gait data of healthy adults walking at three different speeds on an instrumented treadmill in virtual reality / R. Senden, R. Marcellis, P. Willems, M. Witlox, K. Meijer // *Data in Brief*. 2024. Vol. 53. Art. № 110230.

doi: 10.1016/j.dib.2024.110230

9. A multiple-task gait analysis approach: kinematic, kinetic and EMG reference data for healthy young and adult subjects / G. Bovi, M. Rabuffetti, P. Mazzoleni, M. Ferrarin // *Gait & Posture*. 2011. Vol. 33, № 1. P. 6–13.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.08.009

10. Synchronised Video, Motion Capture and Force Plate Dataset for Validating Markerless Human Movement Analysis / M. Evans, L. Needham, L. Wade, M. Parsons, S. Colyer, P. McGuigan, J. Bilzon, D. Cosker // *Scientific Data*. 2024. Vol. 11. Art. № 1300.

doi: 10.1038/s41597-024-04077-3

11. Normative EMG activation patterns of school-age children during gait / V. Agostini, A. Nascimbeni, A. Gaffuri, P. Imazio, M. G. Benedetti, M. Knaflitz // *Gait & Posture*. 2010. Vol. 32, № 3. P. 285–289.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.06.024

12. Dusing S. C., Thorpe D. E. A normative sample of temporal and spatial gait parameters in children using the GAITRite® electronic walkway // *Gait & Posture*. 2007. Vol. 25, № 1. P. 135c139.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.06.003

13. A normative sample of gait and hopping on one leg parameters in children 7–12 years of age / I. Holm, A. T. Tveter, P. M. Fredriksen, N. Vøllestad // *Gait & Posture*. 2009. Vol. 29, № 2. P. 317–321.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2008.09.016

14. The utility of normative foot floor angle data in assessing toe-walking / A. H. Vette, J. M. Watt, J. Lewicke, B. Watkins, L. M. Burkholder, J. Andersen, G. S. Jhangri, S. Dulai // *The Foot*. 2018. Vol. 37. P. 65–70.

doi: 10.1016/j.foot.2018.07.003

15. Normative database of spatiotemporal gait parameters using inertial sensors in typically developing children and young adults / S. Voss, J. Joyce, A. Biskis, M. Parulekar, N. Armijo, C. Zampieri, R. Tracy, A. S. Palmer, M. Fefferman, B. Ouyang, Y. Liu, E. Berry-Kravis, J. A. O'Keefe // *Gait & Posture*. 2020. Vol. 80. P. 206–213.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.010

16. Development of stratified normative data and reference equations for the timed up and down stairs test for healthy children 6–14 years of age / T. del Corral, J. Vivas-Mateos, M. Castillo-Pelaz, S. Aguilar-Zafra, I. López-de-Uralde-Villanueva // *Physiotherapy*. 2021. Vol. 112. P. 31–40.

doi: 10.1016/j.physio.2021.03.002

17. Human kinematic, kinetic and EMG data during different walking and stair ascending and descending tasks / T. Lencioni, I. Carpinella, M. Rabuffetti, A. Marzegan, M. Ferrarin // *Scientific Data*. 2019. Vol. 6. Art. № 309.

doi: 10.1038/s41597-019-0323-z

18. Upper Extremity Performance Test for the Elderly (TEMPA): Normative Data for Young Adults / B. Nedelec, K. Dion, J. A. Correa, J. Desrosiers // *J. of Hand Therapy*. 2011. Vol. 24, № 1. P. 31–43.

doi: 10.1016/j.jht.2010.09.001

19. Validation of automated countermovement vertical jump analysis: markerless pose estimation vs. 3D marker-based motion capture system / J. Aleksic, D. Kanevsky, D. Mesaros, O. M. Knezevic, D. Cabarkapa, B. Bozovic, D. M. Mirkov // *Sensors*. 2024. Vol. 24, № 20. Art. № 6624.

doi: 10.3390/s24206624

20. A new anatomically based protocol for gait analysis in children / A. Leardini, Z. Sawacha, G. Paolini, S. Ingrassio, R. Nativo, M. G. Benedetti // *Gait & Posture*. 2007. Vol. 26. P. 560–571.

doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.12.018

21. Stegeman D. F., Hermens H. J. Standards for surface electromyography: the European project "Surface EMG for non-invasive assessment of muscles (SENIAM)". 2007. P. 108–112. URL: [https://www.researchgate.net/publication/228486725\\_Standards\\_for\\_surface\\_electromyography\\_The\\_European\\_project\\_Surface\\_EMG\\_for\\_non-invasive\\_assessment\\_of\\_muscles\\_SENIAM#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/228486725_Standards_for_surface_electromyography_The_European_project_Surface_EMG_for_non-invasive_assessment_of_muscles_SENIAM#fullTextFileContent) (дата обращения: 18.03.2025).

## Информация об авторах

**Сакун Иван Антонович** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), младший научный сотрудник лаборатории физиологии движения Института физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук (Санкт-Петербург); младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения", аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 16 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; биомеханика физических упражнений; системы захвата движений; персональная навигация; обработка данных. Адрес: Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, наб. Макарова, д. 6, Санкт-Петербург, 199034, Россия  
E-mail: sakunia@infran.ru

<https://orcid.org/0009-0003-7810-8396>

**Попов Дмитрий Борисович** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), младший научный сотрудник лаборатории физиологии зрения Института физиологии им. И. П. Павлова Российской академии наук (Санкт-

Санкт-Петербург); младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения", аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 9 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; лечебная физическая культура; виртуальная реальность; дополненная реальность; Unreal Engine; геймификация; персональная навигация; обработка данных.

Адрес: Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, наб. Макарова, д. 6, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: db.popov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4270-2349>

**Скребова Елена Михайловна** – специалист по направлению "Инженерное дело в медико-биологической практике" (2015, Национальный минерально-сырьевой университет "Горный"), начальник научно-исследовательской лаборатории "Системы захвата и моделирования движения" на базе Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; анализ движений; системы захвата движения; машинное обучение; персональная навигация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: emskrebova@etu.ru

**Самароков Михаил Дмитриевич** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирант кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер 3-й категории бюро расчета надежности АО «НПП "Радар ммс"». Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – биомеханика; биомеханика физических упражнений; системы захвата движений; персональная навигация; обработка данных.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: michael.sam120900@gmail.com

**Тюлькина Татьяна Владимировна** – магистр по направлению "Приборостроение" (2024, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)), аспирантка кафедры лазерных измерительных и навигационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Инженер-конструктор 2-й категории ООО "Альянс ПРОФИТ". Автор 8 научных публикаций. Сфера научных интересов – моделирование изделий; биомеханика, системы захвата движений; обработка данных

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

E-mail: tatyanyul@mail.ru

**Кравченко Владимир Владимирович** – врач травматолог-ортопед (2025, Санкт-Петербургский государственный университет) Клиники высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета. Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – травматология; ортопедия; коленный и тазобедренный сустав.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: dr.vkravchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-4104-8405>

**Мулык Анжела Сергеевна** – врач травматолог-ортопед (2020, Санкт-Петербургский государственный университет) Клиники высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета. Автор 5 научных публикаций. Сфера научных интересов – травматология; ортопедия; опорно-двигательный аппарат.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: md.amulyk@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-5041-1915>

**Губин Александр Вадимович** – доктор медицинских наук (2009), профессор (2010), заведующий кафедрой травматологии и ортопедии Санкт-Петербургского государственного университета. Первый заместитель главного врача, врач травматолог-ортопед Клиники высоких медицинских технологий им. Н. И. Пирогова Санкт-Петербургского государственного университета. Автор 198 научных работ. Сфера научных интересов – травматология; ортопедия; позвоночник; пороки развития и деформации позвоночника у детей и взрослых.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный университет, Университетская набережная, д. 7–9, Санкт-Петербург, 199034, Россия

E-mail: shugul9@gubin.spb.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3234-8936>

## References

1. Mündermann A., Nüesch C., Ewald H., Jonkers I. Osteoarthritis Year in Review 2024: Biomechanics. Osteoarthritis Cartilage. 2024, vol. 32, no. 12, pp. 1530–1541. doi: 10.1016/j.joca.2024.09.011
2. Kotelnikov A. O., Ryabykh S. O., Burtsev A. V. Hip-Spine Syndrome: the Problem from the Biomechanical Point of View. *Genij Ortopedii*. 2019, vol. 25, no. 4, pp. 541–549. (In Russ.) doi: 10.18019/1028-4427-2019-25-4-541-549
3. Oudenhoven L. M., Booth A. T. C., Buizer A. I., Harlaar J., van der Krogt M. M. How Normal Is Normal: Consequences of Stride to Stride Variability, Treadmill Walking and Age When Using Normative Paediatric Gait Data. *Gait & Posture*. 2019, vol. 70, pp. 289–297. doi: 10.1016/j.gaitpost.2019.03.011
4. Bennett H. J., Fleenor K., Weinhandl J. T. A Normative Database of Hip and Knee Joint Biomechanics During Dynamic Tasks Using Anatomical Regression Prediction Methods. *J. of Biomechanics*. 2018, vol. 81, pp. 122–131. doi: 10.1016/j.jbiomech.2018.10.003
5. Adhaya A. M., Jolhe D. A. GAIT Measurement Methods: Systematic Review and Comparative Studies. *J. of Mechanics in Medicine and Biology*. 2024, vol. 24, no. 1, art. no. 2330002. doi: 10.1142/S0219519423300028
6. Abu Bakar F., Staal J. B., van Cingel R., Saito H., Ostelo R., van Dieën J. H. Not All Movements are Equal: Differences in the Variability of Trunk Motor Behavior Between People with and Without Low Back Pain – A Systematic Review with Descriptive Synthesis. *PLoS One*. 2023, vol. 18, no. 9, art. no. e0286895. doi: 10.1371/journal.pone.0286895
7. Pocovi N. C., de Campos T. F., Christine Lin C. W., Merom D., Tiedemann A., Hancock M. J. Walking, Cycling, and Swimming for Nonspecific Low Back Pain: A Systematic Review with Meta-analysis. *J. of Orthopaedic & Sports Physical Therapy*. 2022, vol. 52, no. 2, pp. 85–99. doi: 10.2519/jospt.2022.10612
8. Senden R., Marcellis R., Willems P., Witlox M., Meijer K. Normative 3D Gait Data of Healthy Adults Walking at Three Different Speeds on an Instrumented Treadmill in Virtual Reality. *Data in Brief*. 2024, vol. 53, art. no. 110230. doi: 10.1016/j.dib.2024.110230
9. Bovi G., Rabuffetti M., Mazzoleni P., Ferrarin M. A Multiple-Task Gait Analysis Approach: Kinematic, Kinetic and EMG Reference Data for Healthy Young and Adult Subjects. *Gait & Posture*. 2011, vol. 33, no. 1, pp. 6–13. doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.08.009
10. Evans M., Needham L., Wade L., Parsons M., Colyer S., McGuigan P., Bilzon J., Cosker D. Synchronised Video, Motion Capture and Force Plate Dataset for Validating Markerless Human Movement Analysis. *Scientific Data*. 2024, vol. 11, art. no. 1300. doi: 10.1038/s41597-024-04077-3
11. Agostini V., Nascimbeni A., Gaffuri A., Imazio P., Benedetti M. G., Knaflitz M. Normative EMG Activation Patterns of School-Age Children During Gait. *Gait & Posture*. 2010, vol. 32, no. 3, pp. 285–289. doi: 10.1016/j.gaitpost.2010.06.024
12. Dusing S. C., Thorpe D. E. A Normative Sample of Temporal and Spatial Gait Parameters in Children Using the GAITRite® Electronic Walkway. *Gait & Posture*. 2007, vol. 25, no. 1, pp. 135–139. doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.06.003
13. Holm I., Tveter A. T., Fredriksen P. M., Vøllestad N. A Normative Sample of Gait and Hopping on One Leg Parameters in Children 7–12 Years of Age. *Gait & Posture*. 2009, vol. 29, no. 2, pp. 317–321. doi: 10.1016/j.gaitpost.2008.09.016
14. Vette A. H., Watt J. M., Lewicke J., Watkins B., Burkholder L. M., Andersen J., Jhangri G. S., Dulai S. The Utility of Normative Foot Floor Angle Data in Assessing Toe-Walking. *The Foot*. 2018, vol. 37, pp. 65–70. doi: 10.1016/j.foot.2018.07.003
15. Voss S., Joyce J., Biskis A., Parulekar M., Armijo N., Zampieri C., Tracy R., Palmer A. S., Fefferman M., Ouyang B., Liu Y., Berry-Kravis E., O'Keefe J. A. Normative Database of Spatiotemporal Gait Parameters Using Inertial Sensors in Typically Developing Children and Young Adults. *Gait & Posture*. 2020, vol. 80, pp. 206–213. doi: 10.1016/j.gaitpost.2020.05.010
16. del Corral T., Vivas-Mateos J., Castillo-Pelaz M., Aguilar-Zafra S., López-de-Uralde-Villanueva I. Development of Stratified Normative Data and Reference Equations for The Timed Up and Down Stairs Test for Healthy Children 6–14 Years of Age. *Physiotherapy*. 2021, vol. 112, pp. 31–40. doi: 10.1016/j.physio.2021.03.002
17. Lencioni T., Carpinella I., Rabuffetti M., Marzegan A., Ferrarin M. Human Kinematic, Kinetic and EMG Data During Different Walking and Stair Ascending and Descending Tasks. *Scientific Data*. 2019, vol. 6, art. no. 309. doi: 10.1038/s41597-019-0323-z
18. Nedelec B., Dion K., Correa J. A., Desrosiers J. Upper Extremity Performance Test for the Elderly (TEMPA): Normative Data for Young Adults. *J. of Hand Therapy*. 2011, vol. 24, no. 1, pp. 31–43. doi: 10.1016/j.jht.2010.09.001
19. Aleksic J., Kanevsky D., Mesaros D., Knezevic O. M., Cabarkapa D., Bozovic B., Mirkov D. M. Validation of Automated Countermovement Vertical Jump Analysis: Markerless Pose Estimation vs. 3D Marker-Based Motion Capture System. *Sensors*. 2024, vol. 24, no. 20, art. no. 6624. doi: 10.3390/s24206624
20. Leardini A., Sawacha Z., Paolini G., Ingrassio S., Natio R., Benedetti M. G. A new Anatomically Based Protocol for Gait Analysis in Children. *Gait & Posture*. 2007, vol. 26, pp. 560–571. doi: 10.1016/j.gaitpost.2006.12.018
21. Stegeman D. F., Hermens H. J. Standards for Surface Electromyography: the European Project "Surface EMG for Non-Invasive Assessment of Muscles (SENIAM)". 2007, pp. 108–112. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/228486725\\_Standards\\_for\\_surface\\_electromyography\\_The\\_European\\_project\\_Surface\\_EMG\\_for\\_non-invasive\\_assessment\\_of\\_muscles\\_SENIAM#fullTextFileContent](https://www.researchgate.net/publication/228486725_Standards_for_surface_electromyography_The_European_project_Surface_EMG_for_non-invasive_assessment_of_muscles_SENIAM#fullTextFileContent) (accessed: 18.03.2025).

### Information about the authors

**Ivan A. Sakun**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Junior Researcher of the Laboratory of Movement Physiology of Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences (St Petersburg); Junior Researcher of the Research Laboratory "Motion Capture and Modeling Systems", Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 16 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; biomechanics of physical exercise; motion capture systems; personal navigation; data processing.

Address: Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6, Makarova Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: sakunia@infran.ru

<https://orcid.org/0009-0003-7810-8396>

**Dmitry B. Popov**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Junior Researcher of the Laboratory of Vision Physiology of Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences (St Petersburg); Junior Researcher of the Research Laboratory "Motion Capture and Modeling Systems", Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 9 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; therapeutic physical culture; virtual reality; augmented reality; Unreal Engine; gamification; personal navigation; data processing.

Address: Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6, Makarova Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: db.popov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0008-4270-2349>

**Elena M. Skrebova**, Specialist in "Engineering in Biomedical Practice" (2015, Saint Petersburg Mining University), Head of the Research Laboratory "Motion Capture and Modeling Systems" of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 8 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; motion analysis; motion capture systems; machine learning; and personal navigation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: emskrebova@etu.ru

**Mikhail D. Samarokov**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University; Engineer 3<sup>rd</sup> Category of Reliability Calculation Bureau of JSC "NPP Radar MMS". The author of 8 scientific publications. Area of expertise: biomechanics; biomechanics of physical exercise; motion capture systems; personal navigation; data processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: michaelssam120900@gmail.com

**Tatyana V. Tyulkina**, Master's degree in Instrument Engineering (2024, Saint Petersburg Electrotechnical University), Postgraduate Student of the Department of laser measuring and navigation systems of Saint Petersburg Electrotechnical University; Design Engineer 2<sup>nd</sup> Category of LLC "Alliance PROFIT". The author of 8 scientific publications. Area of expertise: product modelling; biomechanics; motion capture systems; data processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: tatyanyatyul@mail.ru

**Vladimir V. Kravchenko**, Traumatologist-Orthopedist (2025, Saint Petersburg State University) of the Pirogov Clinic of High Medical Technologies of Saint Petersburg State University. The author of 1 scientific publications. Area of expertise: traumatology; orthopaedics; knee and hip joints.

Address: Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: dr.vkravchenko@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-4104-8405>

**Angela S. Mulyk**, Traumatologist-Orthopedist (2020, Saint Petersburg State University) of the Pirogov Clinic of High Medical Technologies of Saint Petersburg State University. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: traumatology; orthopaedics; the musculoskeletal system.

Address: Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: md.amulyk@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-5041-1915>

**Alexander V. Gubin**, Dr Sci. (Medical) (2009), Professor (2010), Head of the Department of Traumatology and Orthopedics of Saint Petersburg State University; First Deputy Chief Physician and Traumatologist-Orthopedist of the Pirogov Clinic of High Medical Technologies of Saint Petersburg State University. The author of 198 scientific publications. Area of expertise: traumatology; orthopaedics; spinal disorders; developmental defects; deformities of the spine in children and adults.

Address: Saint Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Embankment, St Petersburg 199034, Russia

E-mail: shugu19@gubin.spb.ru

<https://orcid.org/0000-0003-3234-8936>