

EDN: VPXWSG  
УДК 796.012

## Experimental and Analytical Determination of the Coordinates of the Common Center of Gravity of the Athlete's Body in Competitive Exercises

Valery I. Zagrevskiy<sup>a, c</sup>, Oleg I. Zagrevskiy<sup>b, c</sup>,  
Dmitry A. Lavshuk<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>*Mogilev State A. Kuleshov University  
Mogilev, Belarus*

<sup>b</sup>*Tyumen State University  
Tyumen, Russian Federation*

<sup>c</sup>*National Research Tomsk State University  
Tomsk, Russian Federation*

Received 24.05.2022, received in revised form 03.11.2022, accepted 17.11.2022

**Abstract.** The purpose of the performed research is to develop a methodology for experimentally and analytically determining the coordinates of the common center of gravity of the athlete's body. The following methods were used in the study: the method of theoretical analysis, the method of weighing, the method of mathematical modeling, the method of computational experiment on a computer.

An experimental and analytical method has been developed for determining the coordinates of the common center of gravity of the athlete's body with an arbitrary angle value in the athlete's shoulder, hip and knee joints when performing sports exercises. The method differs from analogs by the minimum number of weighings, the absence of force measuring devices as part of the measuring circuit, and the minimization of computational procedures in a mathematical model of the coordinates of the general center of gravity of a biomechanical system.

The step-by-step work made it possible to develop an original methodology for determining the coordinates of the common center of gravity of the athlete's body at arbitrary, anatomically permissible inter-link angles. The technique allows you to quickly obtain biomechanical information about the trajectory of the common center of mass of the athlete's body, when performing sports exercises, based on the measurement of optical registration of movements, taking into account the mass-inertial characteristics of the links of the biomechanical system.

**Keywords:** biomechanical system, coordinates of the common center of gravity, mathematical model, exercise technique, equilibrium parameters.

Research area: sport.

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: lavshuk\_da@msu.by

ORCID: 0000-0002-2128-6066 (V.I. Zagrevskiy); 0000-0002-1758-6592(O.I. Zagrevskiy); 0000-0002-3201-6838 (Lavshuk)

Citation: Zagrevskiy V.I., Zagrevskiy O.I., Lavshuk D.A. Experimental and analytical determination of the coordinates of the common center of gravity of the athlete's body in competitive exercises. In: *J. Sib. Fed. Univ. Humanit. soc. sci.*, 2023, 16(2), 217–226. EDN: VPXWSG (online 2022)



## Экспериментально-аналитическое определение координат общего центра тяжести тела спортсмена в соревновательных упражнениях

**В.И. Загревский<sup>а,в</sup>, О.И. Загревский<sup>б,в</sup>, Д.А. Лавшук<sup>а</sup>**

<sup>а</sup>Могилевский государственный университет имени А. А. Кулешова  
Республика Беларусь, Могилев

<sup>б</sup>Тюменский государственный университет  
Российская Федерация, Тюмень

<sup>в</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет,  
Российская Федерация, Томск

**Аннотация.** Цель выполненного исследования – разработать методику экспериментально-аналитического определения координат общего центра тяжести тела спортсмена.

Здесь были применены следующие методы: теоретического анализа, взвешивания, математического моделирования, вычислительного эксперимента на компьютере. Разработан экспериментально-аналитический метод определения координат общего центра тяжести тела спортсмена с произвольным значением угла в плечевых, тазобедренных и коленных суставах атлета при выполнении спортивных упражнений. Метод отличается от аналогов минимальным количеством взвешиваний, отсутствием силоизмерительных средств в составе измерительной схемы, минимизацией вычислительных процедур в математической модели координат общего центра тяжести биомеханической системы.

Проведенная поэтапная работа позволила разработать оригинальную методику определения координат общего центра тяжести тела спортсмена при произвольных, анатомически допустимых межзвенных углах. Методика позволяет оперативно получить биомеханическую информацию о траектории общего центра масс тела спортсмена при выполнении им спортивных упражнений по материалам промера оптической регистрации движений с учетом масс-инерционных характеристик звеньев биомеханической системы.

**Ключевые слова:** биомеханическая система, координаты общего центра тяжести, математическая модель, техника упражнения, параметры равновесия.

Научная специальность: 5.8.5 – теория и методика спорта.

Цитирование: Загревский В. И., Загревский О. И., Лавшук Д. А. Экспериментально-аналитическое определение координат общего центра тяжести тела спортсмена в соревновательных упражнениях. *Журн. Сиб. федер. ун-та. Гуманитарные науки*, 2023, 16(2). С. 217–226. EDN: VPXWSG (онлайн 2022)

## Введение

Спортивный результат является интегральной оценкой эффективности тренировочного процесса, имеющего в структуре учебно-тренировочных занятий следующие виды подготовки: общая и специальная физическая, техническая, тактическая, психологическая, теоретическая (Arkaev, Suchilin, 1997; Suchilin, Arkaev, Savel'ev, 1996). Техническая подготовка спортсмена занимает до 80 % времени учебно-тренировочных занятий в видах спорта, связанных с искусством движений, где предметом соревновательной оценки является техника упражнений (Evseev, 1987; Gaverdovskij, 2002; Gaverdovskij, 2007; Suchilin, Savel'ev, Popov, 2000). Техника упражнений определяется биомеханически обоснованным способом решения двигательной задачи (Gaverdovskij, 2007), и одним из критериев ее эффективности является траектория общего центра тяжести (ОЦТ) тела спортсмена. В связи с этим трудно переоценить значение точного и удобного способа определения координат ОЦТ биомеханической системы с произвольной ориентацией звеньев тела спортсмена, что обусловлено как разнообразием соревновательных упражнений, так и требованиями судейского аппарата к технике упражнения. Задача подобного рода в биомеханике физических упражнений является также актуальной как для теории, так и практики спорта.

В механике для определения положения ОЦТ системы тел используется алгоритм баланса моментов сил, в систему уравнений равновесия которого включаются переменные значений веса и координат центра тяжести отдельных тел (Vlinov, 2019; Tul'ev, Myshkovec, 2013). Следовательно, формульные зависимости вычисления координат ОЦТ тела человека, к примеру на плоскости, требуют знания, во-первых, положения центра тяжести ( $X_i, Y_i$ ) отдельных звеньев ( $i=1, 2, \dots, n$ ) биомеханической системы по осям  $Ox, Oy$  в декартовой системе координат (ДСК) и, во-вторых, знания веса ( $P_i$ ) отдельных тел анализируемой системы из  $n$  тел.

В биомеханике физических упражнений разработаны способы определения параметров ( $X_i, Y_i, P_i$ ) ОЦТ тела спортсмена, основанных на методе радиоизотопного определения геометрии масс тела человека (Zaciorskij, Aruin, Seluyanov, 1981), средне-статистических данных (Braune, Fischer, 1889) и сопряженного метода, базирующегося на совместном использовании данных экспериментально-аналитического способа определения коэффициентов момента сил для отдельных звеньев системы и средне-статистических данных (Ippolitov, 1969).

Каждый из методов обладает определенными недостатками, которые или ограничивают их использование в учебно-тренировочном процессе спортсменов в силу необходимости применения специальной аппаратуры (радиоизотопный метод), сложности вычислительных процедур и применимости их только к трехзвенной модели опорно-двигательного аппарата тела человека (экспериментально-аналитический метод), или не учитывают индивидуальные анатомические и биомеханические особенности опорно-двигательного аппарата тела атлета (метод среднестатистических данных).

Наиболее продуктивным с позиций учета индивидуальных масс-инерционных характеристик звеньев тела спортсмена является метод определения положения ОЦТ тела человека, разработанный Ю. А. Ипполитовым (Ippolitov, 1969). Однако он ограничен в практическом использовании на уровне трехзвенной модели опорно-двигательного аппарата (ОДА) тела спортсмена, что не всегда имеет место в спортивных упражнениях. В методе Ю. А. Ипполитова рассматривается трехзвенная модель ОДА тела спортсмена, в которой сгибательно-разгибательные движения осуществляются в двух суставных сочленениях: плечевых и тазобедренных. В то же время, например в спортивной гимнастике, достаточно большое количество соревновательных упражнений выполняется не только с изменением угла в плечевых и тазобедренных суставах, но и одновременно с изменением угла в локтевых или коленных суставах, что требует

применения в биомеханических исследованиях уже не трехзвенной математической модели опорно-двигательного аппарата тела человека, а как минимум четырехзвенной модели.

Сформулируем тезисные обобщения:

- Аналитические методы определения координат ОЦТ тела спортсмена, основанные на среднестатистических данных масс-инерционных характеристик (МИХ) сегментов тела человека и уравнениях множественной регрессии, не отражают индивидуальных антропометрических и масс-инерционных особенностей испытуемых.

- Экспериментальные методы – учитывают индивидуальные росто-весовые особенности испытуемых, однако в настоящее время разработаны в применении к трехзвенной модели тела спортсмена.

- В спортивной гимнастике, прыжковой акробатике, упражнениях на батуте существует множество групп спортивных упражнений с использованием сгибания ног в коленных суставах: сальто назад и вперед в группировке в соскоках с гимнастических снарядов и в акробатических элементах, большие обороты назад на параллельных брусьях в стойку на руках и в упор на руки и т.п. Аналогичным образом можно выделить группу, например, гимнастических упражнений со сгибанием рук в локтевых суставах спортсмена: спад из упора на руках на брусья в упор на плечах, большим махом вперед переворот в упор на кольцах или в стойку на руках и т.п. С целью биомеханического анализа выполняемых групп упражнений уже необходимо использовать четырехзвенную модель опорно-двигательного аппарата тела гимнаста, а если для анализа траектории ОЦТ тела спортсмена ориентироваться на уточненный экспериментальный метод определения МИХ звеньев тела, то необходимый для расчетов механико-математический аппарат следует разработать.

Учитывая вышеотмеченные ограничения на применение методов прижизненного определения координат ОЦТ тела в структуре учебно-тренировочного процесса спортсменов, мы сформулиро-

вали цель исследования – разработать метод экспериментально-аналитического определения координат общего центра тяжести тела человека, доступный в практической реализации в условиях учебно-тренировочного процесса спортсменов.

### Материалы и методы

Разработанный метод определения координат ОЦТ тела человека распространяется на четырехзвенную модель биомеханической системы и включает следующие этапы проведения измерений и вычислений:

- 1) определение силы реакции опоры для доски, расположенной горизонтально на медицинских весах и опорной поверхности без размещения испытуемого на доске;

- 2) определение силы реакции опоры для доски, расположенной горизонтально на медицинских весах и опорной поверхности с размещением испытуемого в 4-х различных положениях;

- 3) внесение зафиксированных значений силы реакции опоры (этапы 1–2) в математическую модель «Координаты ОЦТ тела человека»;

- 4) компьютерная реализация расчета коэффициентов масс-инерционных характеристик звеньев биомеханической системы.

При реализации двух первых этапов измерений мы использовали метод взвешивания на медицинских весах, обеспечивающий высокую и достаточную для биомеханических исследований точность регистрации экспериментальных показателей. В основе математической модели, используемой на третьем этапе измерений и вычислений, положены уравнения равновесия системы тел (Blinov, 2019; Tul'ev, Myshkovec, 2013). Компьютерная модель, применяемая на третьем и четвертом этапах измерений и вычислений, призвана автоматизировать процедуру расчета искомых характеристик математической модели и обеспечить минимизацию трудоемкости выполняемых расчетных операций.

### Результаты исследования

Первый блок проблем, связанных с разработкой методики определения ко-

ординат ОЦТ тела спортсмена, включал задачи механико-математической формулировки (формализации) смысловой (вербальной) постановки направлений исследования в виде разработки математической модели определения координат ОЦТ биомеханической системы в форме функциональной связи ее масс-инерционных характеристик и обобщенных координат объекта движения.

Второй блок проблем определялся непосредственно разработкой формульных выражений расчета коэффициентов масс-инерционных характеристик ОЦТ четырехзвенной биомеханической системы и их связи с экспериментальными значениями взвешивания в различных положениях испытуемого на экспериментальной площадке.

Математическая модель координат общего центра масс четырехзвенной биомеханической системы базируется на формульном представлении координат центра тяжести системы тел в инерциальной системе отсчета, представленной в виде декартовой системы координат (ДСК) и их взаимосвязи с обобщенными координатами биомеханической системы, за которые приняты углы наклона ( $\varphi_i$ ) звеньев системы к оси Ох ДСК (рис. 1).

Для модели биомеханической системы (рис. 1) приняты обозначения:  $N$  – количество звеньев модели;  $i$  – буквенный индекс, для обозначения номера элемента модели ( $i=1, 2, 3, \dots, N$ );  $L_i$  – длина  $i$ -го звена модели;  $S_i$  – расстояние от оси вращения до центра тяжести  $i$ -го звена модели;  $X_i, Y_i$  – координата центра

масс  $i$ -го звена модели по осям Ох, Оу ДСК;  $\varphi_i$  – обобщенная координата  $i$ -го звена модели;  $P_i$  – вес  $i$ -го звена модели;  $P$  – вес системы (вес тела человека).

Запишем значения переменных  $X_i, Y_i$  через длины звеньев модели ( $L_i$ ), расстояния от шарниров до центра тяжести звеньев ( $S_i$ ) и обобщенные координаты звеньев ( $\varphi_i$ )

$$\begin{aligned} X_1 &= S_1 \cos \varphi_1, \\ Y_1 &= S_1 \sin \varphi_1, \\ X_2 &= L_1 \cos \varphi_1 + S_2 \cos \varphi_2, \\ Y_2 &= L_1 \sin \varphi_1 + S_2 \sin \varphi_2, \\ X_3 &= L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos \varphi_2 + S_3 \cos \varphi_3, \\ Y_3 &= L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin \varphi_2 + S_3 \sin \varphi_3, \\ X_4 &= L_1 \cos \varphi_1 + L_2 \cos \varphi_2 + L_3 \cos \varphi_3 + S_4 \cos \varphi_4, \\ Y_4 &= L_1 \sin \varphi_1 + L_2 \sin \varphi_2 + L_3 \sin \varphi_3 + S_4 \sin \varphi_4. \end{aligned} \quad (1)$$

Формульные выражения для определения координат общего центра тяжести ( $Cx, Cy$ ) системы четырех тел на числовых осях Ох ( $Cx$ ), Оу ( $Cy$ ) ДСК имеют вид:

$$\begin{aligned} Cx &= \frac{P_1 X_1 + P_2 X_2 + P_3 X_3 + P_4 X_4}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}, \\ Cy &= \frac{P_1 Y_1 + P_2 Y_2 + P_3 Y_3 + P_4 Y_4}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставим уравнения (1) в систему (2), приведем подобные члены при тригонометрических функциях и получим развернутую запись математической модели координат

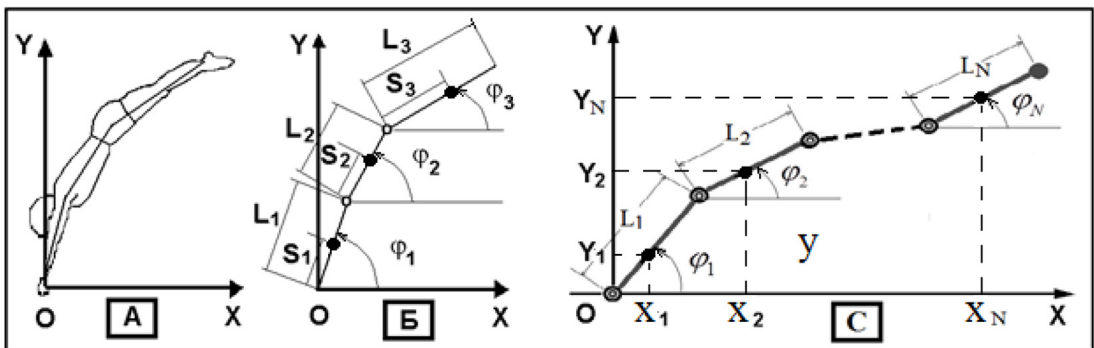


Рис. 1. Кинематическая схема трехзвенной (А, Б) и многозвенной (С) модели биомеханической системы

Fig. 1. Kinematic scheme of three-link (A, B) and multi-link (C) models of a biomechanical system

ОЦТ неразветвленной четырехзвенной биомеханической системы

$$\begin{aligned} Cx &= A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2 + A_3 \cos \varphi_3 + A_4 \cos \varphi_4, \\ Cy &= A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2 + A_3 \sin \varphi_3 + A_4 \sin \varphi_4. \end{aligned} \quad (3)$$

Коэффициенты  $A_i$  при тригонометрических функциях находятся из выражений:

$$\begin{aligned} A_1 &= (P_1 S_1 + P_2 L_1 + P_3 L_1 + P_4 L_1) / P, \\ A_2 &= (P_2 S_2 + P_3 L_2 + P_4 L_2) / P, \\ A_3 &= (P_3 S_3 + P_4 L_3) / P, \\ A_4 &= (P_4 S_4) / P. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь следует отметить, что особенно ценным в уравнениях (3–4) являются два обстоятельства:

Если каким-либо образом будут известны значения коэффициентов  $A_i$ , то нет необходимости знать вес каждого звена и положение его центра тяжести в структуре уравнений (4) и, следовательно, координаты ОЦТ тела спортсмена в уравнениях (3) определяются по данным экспериментальных значений коэффициентов  $A_i$  (система уравнений 4).

Структура системы уравнений (3) позволяет вычислить координаты ОЦТ тела спортсмена при произвольных, анатомически допустимых углах между звеньями тела, что делает целесообразным их использование в исследованиях техники спортивных упражнений.

Развивая метод экспериментального определения положения ОЦТ тела спортсмена, предложенный для трехзвенной модели в работе Ю. А. Ипполитова (Ippolitov, 1969), мы предлагаем следующую технологию экспериментального определения коэффициентов  $A_i$  для четырехзвенной модели биомеханической системы.

Экспериментальное определение коэффициентов  $A_i$ , необходимых для построения математической модели координат общего центра тяжести тела человека при произвольных, анатомически обусловленных углах между звеньями тела, состоит из нескольких этапов.

Первоначально определяется опорная сила реакции ( $R_0$ ) призмы (Б), расположенной на медицинских весах (рис. 2).

Доска расположена горизонтально на вершинах двух трехгранных призм, одна из которых находится на медицинских весах (рис. 2 Б), вторая – на опорной поверхности (рис. 2 А). Расстояние между призмами равно  $L_0$ , вес доски –  $P_0$ , расстояние от опоры А до центра тяжести доски –  $S_0$  (рис. 2).

В соответствии с уравнением равновесия (баланс моментов), относительно опорных призм, расположенных на полу и (А) на медицинских весах (Б), имеем формульные зависимости

$$L_0 R_0 - S_0 P_0 = 0, \quad L_0 R - (L_0 - S_0) P_0 = 0. \quad (5)$$

За положительное направление момента принято направление, противоположное движению часовой стрелки. Отсюда, при известном значении  $R_0$ , координата центра тяжести ( $S_0$ ), ( $L_0 - S_0$ ) доски и опорная реакция ( $R$ ) призмы (А) находятся по одной из формул:

$$\begin{aligned} S_0 &= \frac{L_0 R_0}{P_0}, \quad R = \frac{(L_0 - S_0) P_0}{L_0}, \\ L_0 - S_0 &= \frac{L_0 R}{P_0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Уравнения (5, 6) неявным образом используются в дальнейшей схеме расчетных операций и измерений. Для принятой четы-

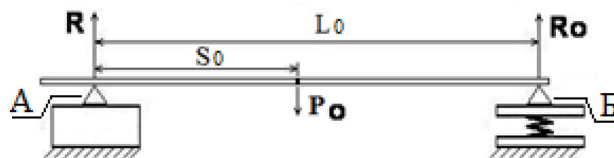


Рис. 2. Экспериментально-аналитическое определение центра тяжести доски методом взвешивания  
Fig. 2. Experimental and analytical determination of the center of gravity of the board by weighing

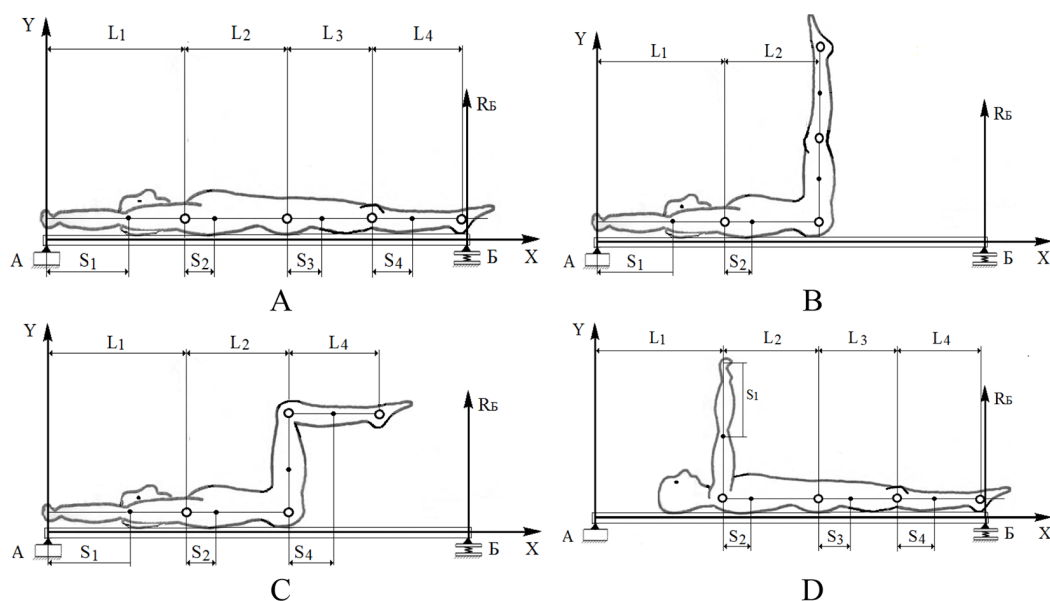


Рис. 3. Технологическая схема экспериментального определения координат общего центра тяжести тела четырехзвенной модели биомеханической системы методом взвешивания

Fig. 3. Technological scheme of experimental determination of the coordinates of the common center of gravity of the body of a four-link model of a biomechanical system by weighing

рехзвенной модели опорно-двигательного аппарата биомеханической системы выполняют 4 измерения силы реакции опоры ( $R_B$  – медицинские весы) с доской и испытуемым на ней в четырех различных положениях (рис. 3).

*Первое измерение.* В положении лежа на спине, руки вверх, кисти сжатых в кулак рук проецируются на вершину трехгранной призмы ( $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 0^\circ$ ). Определяют силу реакции опоры ( $R_A$ ) методом взвешивания на медицинских весах (рис. 3 А).

*Второе измерение.* В положении лежа на спине, руки вверх, кисти сжатых в кулак рук проецируются на вершину трехгранной призмы. Поднять ноги до вертикального положения, при котором угол между ногами и туловищем составляет  $90^\circ$  ( $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ, \varphi_3 = \varphi_4 = 90^\circ$ ). Определяют силу реакции опоры ( $R_B$ ) методом взвешивания на медицинских весах (рис. 3 В).

*Третье измерение.* В положении лежа на спине, руки вверх, кисти сжатых в кулак

рук проецируются на вершину трехгранной призмы. Поднять ноги до вертикального положения, в котором угол между ногами и туловищем составляет  $90^\circ$ . Согнуть ноги в коленных суставах до угла между бедром и коленями –  $90^\circ$  ( $\varphi_1 = \varphi_2 = 0^\circ, \varphi_3 = 90^\circ, \varphi_4 = 0^\circ$ ). Определяют силу реакции опоры ( $R_C$ ) методом взвешивания на медицинских весах (рис. 3 С).

*Четвертое измерение.* В положении лежа на спине, руки вверх, кисти сжатых в кулак рук проецируются на вершину трехгранной призмы. Поднять руки из исходного положения до вертикального положения, при котором угол между руками и туловищем составляет  $90^\circ$  ( $\varphi_1 = -90^\circ, \varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 0^\circ$ ). Определяют силу реакции опоры ( $R_D$ ) методом взвешивания на медицинских весах (рис. 3 D).

**Компьютерная модель формирования алгоритма вычисления коэффициентов  $A_i$ .** Запишем уравнения, определяющие координату  $Sx_i$  модели для каждого из измерений. Имеем

$$\begin{aligned}
\text{Первое измерение.} & Cx_1 = A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2 + A_3 \cos \varphi_3 + A_4 \cos \varphi_4. \\
\text{Второе измерение.} & Cx_2 = A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2. \\
\text{Третье измерение.} & Cx_3 = A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2 + A_4 \cos \varphi_4. \\
\text{Четвертое измерение.} & Cx_4 = A_2 \cos \varphi_2 + A_3 \cos \varphi_3 + A_4 \cos \varphi_4 + L_1.
\end{aligned} \tag{7}$$

Решая систему уравнений (7), получим уравнения, определяющие численные значения коэффициентов  $A_i$ , связанных функциональной зависимостью с результатами измерений  $R_0, R_A, R_B, R_C, R_D$ :

$$\begin{aligned}
Cx_1 &= L_0(R_A - R_0) / P, & A_4 &= Cx_3 - Cx_1; \\
Cx_2 &= L_0(R_B - R_0) / P, & A_3 &= Cx_1 - Cx_3; \\
Cx_3 &= L_0(R_C - R_0) / P, & A_2 &= Cx_4 - L_1 - A_3 - A_4; \\
Cx_4 &= L_0(R_D - R_0) / P, & A_1 &= Cx_2 - A_2.
\end{aligned} \tag{8}$$

Напомним, что  $R_0$  – сила реакции опоры (медицинские весы) для доски без испытуемого;  $R_A$  – результат измерений в первом положении испытуемого на доске;  $R_B$  – результат измерений во втором положении;  $R_C$  – результат измерений в третьем положении;  $R_D$  – результат измерений в четвертом положении.

Расчет в системе уравнений (8) начинается последовательным вычислением элементов  $Cx_1, Cx_2, Cx_3, Cx_4$ , а затем также последовательно вычисляют искомые коэффициенты  $A_i$ , но уже начиная с последнего:  $A_4, A_3, A_2, A_1$ .

Вычисленные индивидуально для отдельного спортсмена коэффициенты  $A_i$  не изменяются на всей траектории биосистемы, и вычислив их однократно, можно в дальнейшем использовать значения этих переменных в качестве константных величин в процедуре (3) расчета траектории координат ОЦТ спортсмена в спортивных упражнениях. Однако здесь следует учесть, что вторичное использование коэффициентов  $A_i$  возможно, если вес спортсмена не изменяется. При изменении веса спортсмена следует выполнить дополнительное экспериментально-аналитическое определение координат ОЦТ тела спортсмена в четырех различных положениях и перерасчет искомых коэффициентов  $A_i$ .

**Преимущество** предложенного экспериментально-аналитического мето-

да определения координат ОЦТ тела спортсмена заключается в нескольких позициях: во-первых, в учете индивидуальных особенностей МИХ звеньев тела исполнителя на уровне четырехзвенной модели биомеханической системы, что существенно расширяет количественный состав упражнений, доступных для уточненного биомеханического анализа координат ОЦТ атлета; во-вторых, однократно вычисленные коэффициенты  $A_i$  могут в дальнейшем использоваться многократно для расчета как по всей траектории движения, так и в других спортивных упражнениях, выполняемых этим спортсменом, в том числе основанных на двухзвенной или трехзвенной модели биомеханической системы.

Следует также отметить, что разработанный метод определения координат центра тяжести тела спортсмена для четырехзвенной модели биомеханической системы не требует использования силоизмерительных устройств в составе измерительной схемы и позволяет рассчитать искомые характеристики при произвольной конфигурации биосистемы.

**Сфера применения** определяется возможностью использования метода в научно-исследовательской работе магистрантов, аспирантов, докторантов, заинтересованных лиц, изучающих кинематические и динамические особенности техники спортивных упражнений с использованием данных о траектории ОЦТ биомеханической системы в исследуемом упражнении; сопряженный со средствами компьютерной техники метод может быть применен непосредственно в учебно-тренировочном процессе атлетов для получения оперативной информации о перемещении ОЦТ тела спортсмена в изучаемом спортивном упражнении; метод может быть использован в ортопедии и протезостроении для расшифровки условий сохранения телом



человека равновесия в различных двигательных действиях.

### Заключение

В рамках выполненного исследования было выделено два основных блока проблем:

- проблемы индивидуального, доступного и точного определения биомеханических характеристик движения спортсмена, связанных с технологией компьютерного расчета общего центра тяжести системы тел;
- проблемы построения математической и компьютерной модели расчетных операций с использованием эксперимен-

тальных данных индивидуального тестирования геометрии масс тела спортсмена.

По первому блоку проблем в исследовании получены решения, основанные на построении расчетной математической модели определения координат общего центра масс четырехзвенной биомеханической системы в спортивных упражнениях.

По второму блоку проблем в исследовании получены решения, отражающие технологию экспериментально-аналитического определения координат общего центра масс тела спортсмена, свойственные индивидуальным антропометрическим и массинерционным особенностям испытуемых.

### Список литературы для русскоязычных источников

Аркаев Л.Я., Сучилин Н.Г. Методологические основы современной системы подготовки гимнастов высшего класса. *Теория и практика физической культуры*, 1997, 11, 12–16.

Блинов Л.А. Метод определения пространственного положения центра тяжести машин. *Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей»*, 2019, 2, 71–82.

Евсеев С.П. *Формирование двигательных действий в гимнастике с помощью тренажеров*. Ленинград: Изд-во ГДОИФК им. П.Ф. Лесгафта, 1987. 91 с.

Гавердовский Ю.К. *Техника гимнастических упражнений: популярное учеб. пособие*. М.: Терра-Спорт, 2002. 512 с.

Гавердовский Ю.К. *Обучение спортивным упражнениям. Биомеханика. Методология. Дидактика*. М.: Физкультура и спорт, 2007. 912 с.

Ипполитов Ю.А. *Исследование биохимических характеристик гимнастических упражнений и путей изменения их структуры: автореф. дис. ... канд. пед. наук*. М., 1969. 21 с.

Сучилин Н.Г., Аркаев Л.Я., Савельев В.С. Педагогико-биомеханический анализ техники спортивных движений на основе программно-аппаратного видеоконтекста. *Теория и практика физической культуры*, 1996, 4, 12–20.

Сучилин Н.Г., Савельев В.С., Попов Г.И. *Опτικο-электронные методы измерения движений человека*. М., 2000. 126 с.

Тулев В.Д., Мышковец М.В. *Теоретическая механика. Статика*. [Электронный ресурс]. Минск, 2013. 79 с.

Зациорский В.М., Аруин А.С., Селуянов В.Н. *Биомеханика двигательного аппарата человека*. М.: Физкультура и спорт, 1981. 143 с.

Загrevский В.И., Загrevский О.И. Оценка технического мастерства спортсменов по данным биомеханических показателей движения. *Теория и практика физической культуры*, 2018, 10, 76–78.

### References

Arkaev L. Ia., Suchilin N. G. Metodologicheskie osnovy sovremennoj sistemy podgotovki gimnastov vysshego klassa [Methodological foundations of the modern system of training of gymnasts of the highest class]. In *Teoriya i praktika fizicheskoj kul'tury* [Theory and practice of physical culture], 1997, 11, 12–16.

Blinov I. A. Metod opredeleniya prostranstvennogo polozheniya centra tyazhesti mashin [Method for determining the spatial position of the center of gravity of machines]. In *Vestnik Koncerna VKO «Almaz – Antej»* [Journal of «Almaz – Antey» Air and Space Defence Corporation], 2019, 2, 71–82.

Braune W., Fischer O. Über den Schwerpunkt des menschlichen Körpers mit Rücksicht auf die Ausrüstung des deutschen Infanteristen. In *Abh Math Phys Kl Saechs Ges Wiss*, 1889, 26, 561–672.

Evseev S. P. *Formirovanie dvigatel'nyh dejstvij v gimnastike s pomoshch'yu trenazherov* [Formation of motor actions in gymnastics with the help of simulators]. Leningrad, Izd. GDOIFK im P. F. Lesgafta, 1987. 91 p.

Gavardovskij Iu. K. *Tekhnika gimnasticheskikh uprazhnenij: populyarnoe uchebnoe posobie* [Technique of gymnastic exercises: a popular textbook]. Moscow, Terra-Sport, 2002. 512 p.

Gavardovskij Iu. K. *Obuchenie sportivnym uprazhneniyam. Biomekhanika. Metodologiya. Didaktika* [Training in sports exercises. Biomechanics. Methodology. Didactics]. Moscow, Fizkul'tura i sport, 2007. 912 p.

Ippolitov Iu. A. *Issledovanie biomekhanicheskikh harakteristik gimnasticheskikh uprazhnenij i putej izmeneniya ih struktury* [Investigation of biomechanical characteristics of gymnastic exercises and ways to change their structure]. Abstract of Ph. D thesis. Moscow, 1969. 21 p.

Suchilin N. G., Arkaev L. Ia., Savel'ev V. S. *Pedagogiko-biomekhanicheskij analiz tekhniki sportivnyh dvizhenij na osnove programmno-apparatnogo videokompleksa* [Pedagogical and biomechanical analysis of the technique of sports movements on the basis of a software and hardware video complex]. In *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury* [Theory and practice of physical culture], 1996, 4, 12–20.

Suchilin N. G., Savel'ev V. S., Popov G. I. *Optiko-elektronnye metody izmereniya dvizhenij cheloveka* [Optoelectronic methods of measuring human movements]. Moscow, FON, 2000. 126 p.

Tu'ev V. D., Myshkovec M. V. *Teoreticheskaya mekhanika. Statika. Uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov dnevnoj, zaochnoj i distancionnoj form obucheniya: elektronnyj uchebnyj material* [Theoretical mechanics. Static. Educational and methodical manual for full-time, correspondence and distance learning students: electronic educational material]. Minsk, BNTU, 2013. 79 p.

Zaciorskij V. M., Aruin A. S., Seluyanov V. N. *Biomekhanika dvigatel'nogo apparata cheloveka* [Biomechanics of the human motor system]. Moscow, FiS, 1981. 143 p.

Zagrevskij V. I., Zagrevskij O. I. *Ocenka tekhnicheskogo masterstva sportsmenov po dannym biomekhanicheskikh pokazatelej dvizheniya* [Assessment of technical skill of athletes according to biomechanical indicators of movement]. In *Teoriya i praktika fizicheskoy kul'tury* [Theory and practice of physical culture], 2018, 10, 76–78.