



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomech/2023.4.09

УДК 531/534: [57+61]

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЙ СУСТАВОВ ЛЫЖНИКА-ГОНЩИКА ПРИ ДВИЖЕНИИ СПОСОБОМ ДАБЛ-ПОЛИНГ: ЭКСПЕРИМЕНТ, ОБРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ

А.М. Нургалиев¹, Д.В. Паршин²

¹ Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 08 ноября 2023
Одобрена: 09 декабря 2023
Принята к публикации: 11 декабря 2023

Ключевые слова:

Кинематика лыжного хода, нелинейный осциллятор, оцифровка движения спортсмена, дабл-полинг

АННОТАЦИЯ

В спорте высоких достижений высокие результаты являются продуктом, как правило, целого комплекса достижений. Инновации в материалах, методиках подготовки и технике позволяют выигрывать и ставить рекорды. Одним из способов улучшения результатов в циклических видах спорта, например в лыжных гонках, является использование сведений о биомеханике движений спортсменов-гонщиков. Анализ параметров движения спортсмена позволяет охарактеризовать эффективность этих движений, а также разработать тактику проведения им гонки. В настоящей работе приводится методика получения данных, разработан алгоритм их оцифровки, а также предложена математическая модель, описывающая набор данных движений лыжников-гонщиков. В ходе анализа данных математического моделирования было выявлено существенное влияние как класса лыжников, так и их пола на параметры математической модели. Результаты работы могут быть полезны для более глубокого понимания фундаментальных основ биомеханики движений спортсменов лыжников-гонщиков, а также для построения более оптимальных техник тренировок и прохождения дистанции.

© ПНИПУ

Введение

В настоящее время в спорте высших достижений разница результатов призеров настолько ничтожна, что любое законное преимущество, которое спортсмен может использовать в свою пользу, важно, даже если результат от него может находиться в рамках статистической погрешности. Если рассматривать лыжные гонки, то ближайший тому пример Олимпийские игры 2022

года, когда на классической гонке с раздельным стартом у женщин разница между победителем и вторым местом было в пределах секунды, как и разница между четвертым местом и третьим призовым местом. При общем времени гонки, превышающим 24 мин, показанная разница не превышает 0,01 %. В связи с этим становится по-настоящему важным получение любого преимущества как от инвентаря, так и от экономичности движений. Для достижения более экономичной тех-

© Нургалиев Антон Маратович – студент, e-mail: antonrnlv@gmail.com

© Паршин Даниил Васильевич – к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, e-mail: danilo.skiman@gmail.com

ID: 0000-0002-2496-3042



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

ники прохождения дистанции в настоящее время командами активно используется технический персонал, который проходит трассу до гонки и на основе собственных показателей делает выводы о наилучшей тактике прохождения дистанции. Плюсом подобной практики является то, что живой человек с его ограничениями в технике и выносливости на аналогичном инвентаре выполняет аналогичную работу, с другой стороны, существует множество факторов, которые делают сравнение с гоночными условиями не релевантными: особенности работы на рельефе [16], физиологические особенности спортсмена [42], особенности изменения внешних условий [29], отличия в технике движений [12, 31], отличия в подготовке инвентаря [7] и др. Поэтому исследования, направленные на устранение каждого из описанных компонентов крайне важны для достижения более высоких спортивных результатов.

Различные подходы, используемые для улучшения скольжения, равно как и механика скольжения по снегу и льду, описаны во многих работах [30]. Методикам подготовки лыжного инвентаря также уделено много внимания [7], поскольку при прочих равных подготовка инвентаря может оказаться критической, достаточно вспомнить проигрыш российской команды в шведском Фалуне 2019 года, когда из-за неверной тактики подготовки лыж даже лидер сборной А. Большунов проиграл победителю более одной минуты на тридцатикилометровой гонке. Что касается биомеханики лыжного хода, то в этом компоненте исследований не так много, поскольку их проведение требует наличия центра спортивной подготовки высокого уровня оснащенности, специалистов физиологов, способных контролировать адекватные нагрузки спортсменов, группу математической обработки получаемых результатов. Большая часть работ в этом направлении принадлежит скандинавским авторам [3, 4, 8, 11, 17, 19, 34, 35, 36, 38, 41, 42], а конечная продукция этих исследований применяется в национальных сборных и остается закрытой, поскольку может дать неоспоримое преимущество по сравнению с соперниками. Особую сложность представляет собой сборка качественных видеоизображений движения спортсменов для дальнейшего анализа биомеханики движений. Несмотря на то, что проблемами безмаркерного сбора данных были озабочены еще в начале 21-го столетия [24], даже последние успехи в этой области основаны в основном на машинной обработке данных нескольких камер, которые наблюдают движущийся объект в ограниченной области [27]. Что касается лыжных гонок, то еще в [15, 17] автором говорилось о существенном отличии в механике движений лыжников на тредбане (беговой дорожке для лыжероллеров) от механики движения на лыжегоночной трассе. В свою очередь качественные изображения спортсменов способны дать плодотворную почву для дальнейшего ма-

тематического анализа их движений и построения оптимизационных тренировочных и соревновательных протоколов.

В данной работе нами предложен новый способ получения экспериментальных данных о кинематике движений лыжников-гонщиков, который ранее не был представлен в литературе. Кроме того, приводится подробная методика обработки данных, начиная от обработки видео изображений и заканчивая особенностями математической модели.

Материалы и методы

В этом разделе будет дано описание методам проведения исследования, поскольку оно состоит из экспериментальной части, обработки данных эксперимента, а также математического моделирования.

Методы сбора данных

Сбор экспериментальных данных проводился с помощью а) оцифровки видео соревнований, размещенных открыто в сети Интернет, а также б) съемки с дрона спортсменов-любителей лыжников-гонщиков в ходе соревнований и контрольных тренировок на лыжероллерах (рис. 3). Обе методики подразумевали анализ техники движения типа дабл-полинг (бесшажный одно-временный классический ход).

Для обработки уже готовых видеозаписей отбирались фрагменты соревнований, в которых съемка велась параллельно движению спортсмена при условии наличия не менее 5 последовательных циклов отталкивания. Отбирались 3 цикла движений для каждого из спортсменов и не менее 9 точек на каждый из циклов движения. Более подробно обработка готовых видео изображений описана в [3], и в дальнейшем в этой работе нами проводится анализ уже полученных в этой работе результатов касаясь элитных гонщиков. Съемка спортсменов-любителей производилась с дрона *DJI mini 2* в режиме *Cine* с максимальным качеством изображения 4К. Данный режим использует максимальный уровень цифровой стабилизации изображения, однако при этом существенно снижается максимальная скорость дрона, поэтому для съемки передвижения спортсменов техникой дабл-полинг использовались участки стартового разгона для лыжников и прямой на стадионе непосредственно после поворота для спортсменов на лыжероллерах. Участие спортсменов-любителей в соревнованиях подразумевало их согласие с использованием фото-видео всех материалов соревнований. Данные по элитным спортсменам взяты из открытых банков видео. Данные по всем спортсменам анонимизированы. Исходные таблицы измерений могут быть предоставлены по запросу.

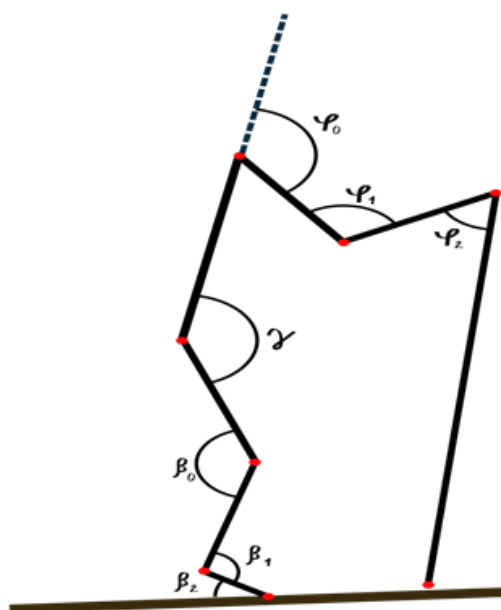


Рис. 1. Принципиальная модель спортсмена лыжника-гонщика. Опорные точки красного цвета и образованные сочленениями скелета углы

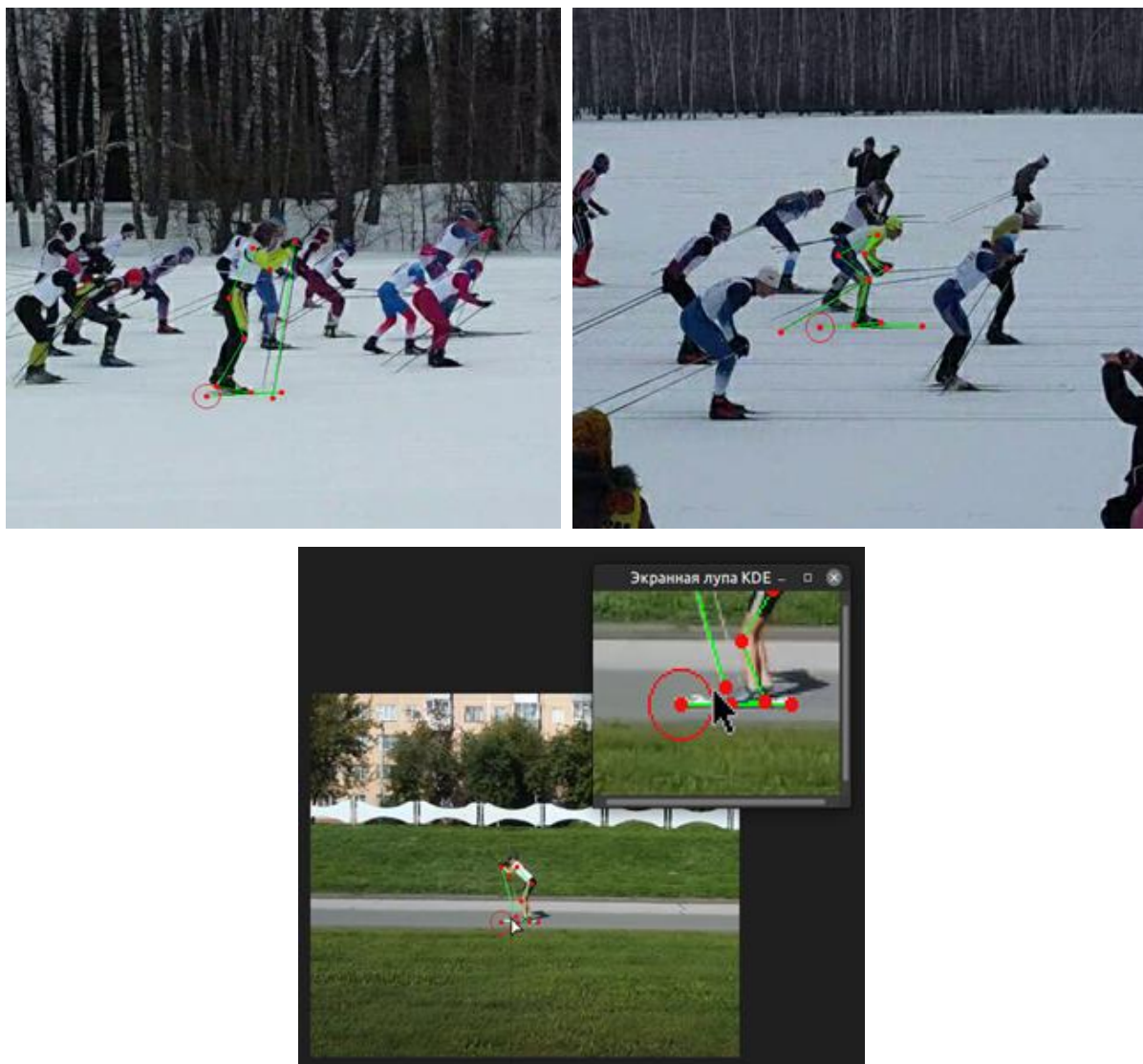


Рис. 2. Демонстрация работы в программе обработки изображений записи движения спортсменов с квадрокоптера (сверху – соревнования по беговым лыжам, снизу – контрольная тренировка на лыжероллерах)



Рис. 3. Квадрокоптер, который использовался в исследовании, в момент передачи данных на персональный компьютер (для масштаба приведены компьютерная мышь и переходник для *mini SD* карты памяти)

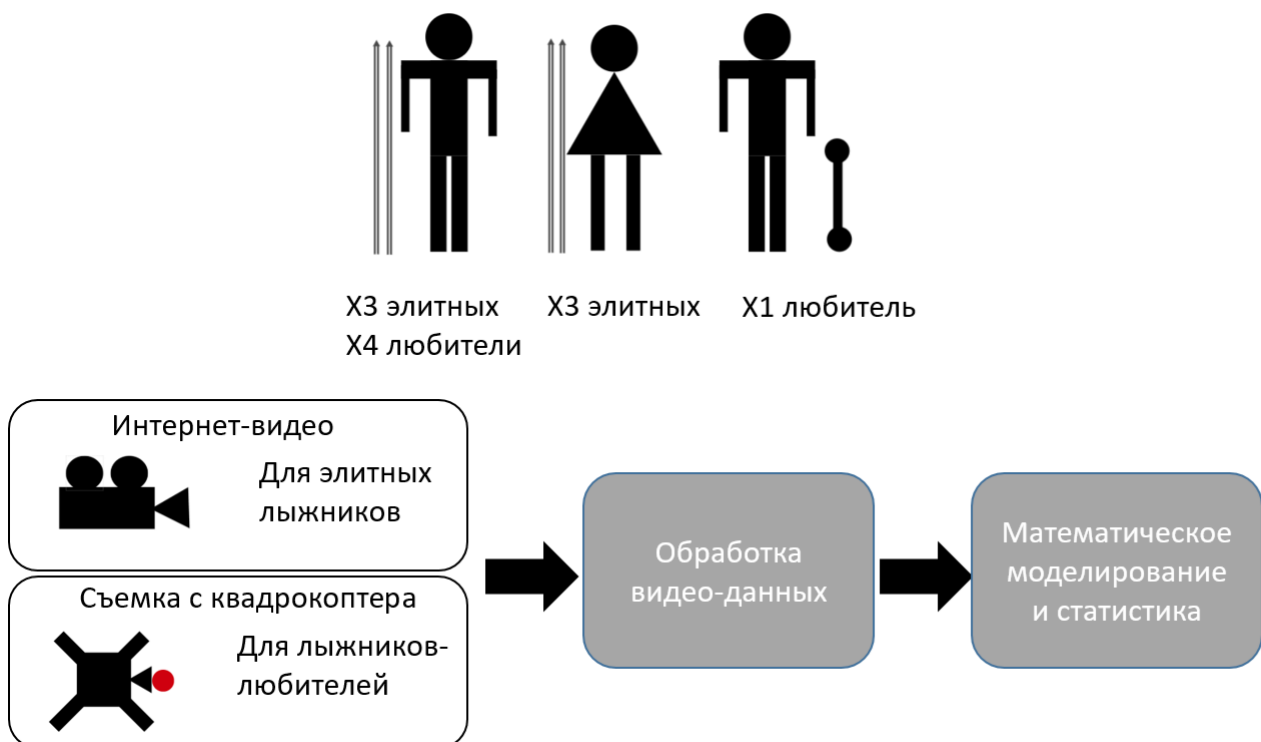


Рис. 4. Схема исследования

Обработка видео изображений, снятых с дрона

Биомеханическая модель лыжника-гонщика строилась по 10 опорным точкам (ещё две точки – это начало и конец лыжи), что позволяло проанализировать 7 углов рис. 1.

Для получения данных для подобных моделей, как правило, используются метки, которые различаются при обработке видеоизображений автоматически [15]. Однако принципиальным отличием представленной технологии является съёмка в максимально естественных условиях, когда отсутствуют какие-либо явные метки на комбинезонах исследованных лыжников (рис. 4). В свою очередь размещение таких меток и исследование изображений с такими метками на «тредбанах» (аналоги беговых дорожек для движения на лыжероллерах) не дает полной картины движений в естественных условиях, поскольку доказано [15, 17], что техника передвижения на них, хотя и схожа с техникой передвижения по трассе – все же статистически значимо отличается от нее. В итоге для записи опорных точек движения была реализована программа на языке *julia* с использованием бесплатной свободной библиотеки *GameZero*. Общая методика работы в программе состоит в следующем:

а) выбранный фрагмент видео был предварительно разделен на кадры с использованием консольной версии программы *ffmpeg* и команды: *ffmpeg -i cycles.mpeg -vf fps=30 frame % d.png*;

б) пользователь размечает опорные точки модели для каждого кадра видео (рис. 2) согласно схеме, изображенной на рис. 1. Для помощи в установке опорных точек использовалась интерактивная экранная лупа (см. рис. 2). Величина угла между опорными точками вычисляется с помощью скалярного произведения направляющих векторов для размеченных сегментов скелета. После того как были получены величины углов, был проанализирован уровень повторяемости циклов (рис. 5) движений для спортсменов-любителей по методике, представленной в [3] и аналогичной [40].

Математическая модель

Для описания полученных данных использовалась математическая модель типа нелинейного осциллятора. Описывались зависимости углов $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$.

$$\ddot{\varphi}_0 + P_2^0(\varphi_0)\dot{\varphi}_0 + Q_3^0(\varphi_0) = k_1\varphi_1 \quad (1)$$

$$\ddot{\varphi}_2 + P_2^2(\varphi_2)\dot{\varphi}_2 + Q_3^2(\varphi_2) = k_2\varphi_1 \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2) персонализированными являются константы в полиномах P, Q : $a_0, a_1, a_2, b_1, b_2, b_3$, которые подразумевались квадратичными функциями своих аргументов. Дискретизация уравнений осуществляется

путем замены производных их приближенными значениями по формулам конечных разностей ($j = 0, 2$):

$$\dot{\varphi}_j(t_i) = \frac{\varphi_j^{(i+1)} - \varphi_j^{(i)}}{\Delta t}, \quad (3)$$

$$\ddot{\varphi}_j(t_i) = \frac{\varphi_j^{(i+1)} - 2\varphi_j^{(i)} + \varphi_j^{(i-1)}}{\Delta t^2}. \quad (4)$$

Далее уравнения (1), (2) были приведены к системе вида (5):

$$A \cdot B = C, \quad (5)$$

где A, B и C представлены в приложении и были введены новые переменные:

$$x_0 = \frac{1}{k\Delta t^2},$$

$$x_1 = \frac{1}{k} \left(b_1 - \frac{a_0}{\Delta t} - \frac{2}{\Delta t^2} \right),$$

$$x_2 = \frac{1}{k} \left(b_2 - \frac{a_1}{\Delta t} \right),$$

$$x_3 = \frac{1}{k} \left(b_3 - \frac{a_2}{\Delta t} \right),$$

$$x_4 = \frac{a_1}{k\Delta t},$$

$$x_5 = \frac{a_2}{k\Delta t},$$

$$x_6 = \frac{1}{k} \left(\frac{a_0}{\Delta t} + \frac{1}{\Delta t^2} \right).$$

В системе (5) число $i+k=l-2$, где $l > 18$ – это количество строк в формуле 5. В силу данного условия система (5) является переопределенной и задача нахождения коэффициентов исходных полиномов – это обратная задача, которая сводится к задаче минимизации невязки [2]:

$$r(\vec{x}) = \sum_{m=1}^l ((\vec{v}_m, \vec{x}) - b_m)^2 \rightarrow \min, \quad (6)$$

$v_m - m$ -я строка матрицы Φ_j ; $b_m - m$ -й элемент вектора $\vec{\varphi}_1$. Поиск вектора $\vec{x} = (x_0, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6)^T$ был реализован на языке *Python*. Приближенное решение методом наименьших квадратов было найдено как точное решение уравнения

$$\Phi_j^T \Phi_j \vec{x} = \Phi_j^T \vec{\varphi}_1.$$

Обратная коэффициентная задача, вообще говоря, не является корректной, так как в силу переопределенности системы (5) нарушается первое условие корректности – существование точного решения

Решение прямой задачи

Для нахождения численного решения уравнений (1), (2), правая часть должна являться непре-

рывной функцией. Так, правая часть $\bar{\phi}_1$ уравнений (1), (2) была аппроксимирована гармониками $a \cdot \sin(bx+c)+d \cdot \cos(ex+f)$ в программе *Wolfram Mathematica*. Погрешность аппроксимации рассчитывалась по формуле:

$$\Delta_i^1 = \frac{\sqrt{n_i \sum_{j=1}^{n_i} ((\phi_1)_{ij}^{exp} - (\phi_1)_{ij}^{teor})^2}}{\left| \sum_{j=1}^{n_i} (\phi_1)_{ij}^{teor} \right|} \quad (7)$$

Δ_i^1 – стандартное нормальное отклонение экспериментальных значений ϕ_1 от теоретических для i -го цикла n_i - число точек в i -ом цикле, $i = 1, 2, 3$ (для каждого спортсмена данные представлены для трёх циклов отталкивания);

$(\phi_1)_{ij}^{exp}$ – экспериментальное значение ϕ_1 в i -м цикле в j -й момент времени

$(\phi_1)_{ij}^{teor}$ – теоретическое значение ϕ_1 в i -м цикле в j -й момент времени. Пример подобной аппроксимации представлен на рис. 6.

Полученные коэффициенты сравнивались для мужчин и для женщин спортсменов элитного уровня, а также сравнивались параметры модели типа осциллятора для мужчин элитного уровня и мужчин спортсменов-любителей.

Результаты и обсуждение

В результате получения и обработки данных нами были найдены коэффициенты уравнения (табл. 1), связывающего углы в плечевом суставе и в кисти (см. рис. 1). При внимательном анализе коэффициентов мы можем заметить существенное отличие коэффициентов a_i и b_i для мужчин и для женщин. Это не просто говорит о принципиально различной технике дабл-полинга для мужчин и для женщин, что уже отмечалось в литературе [18], но и о том, что для мужчин сама структура уравнений (1; 2) может иметь принципиально другой характер и быть, например, уравнениями с релаксационными колебаниями [22]. Наличие более стабильных колебательных процессов в женском организме видится более предпочтительным, чем в мужском, ввиду физиологических особенностей строения организма мужчин и женщин [32].

Анализируя результаты моделирования для спортсменов-любителей можно отметить, что коэффициент вариации для коэффициентов a_0 и b_1 , осуществляющих основной вклад в нелинейность модели осциллятора сильно превосходит стандартное отклонение этих коэффициентов для элитных спортсменов:

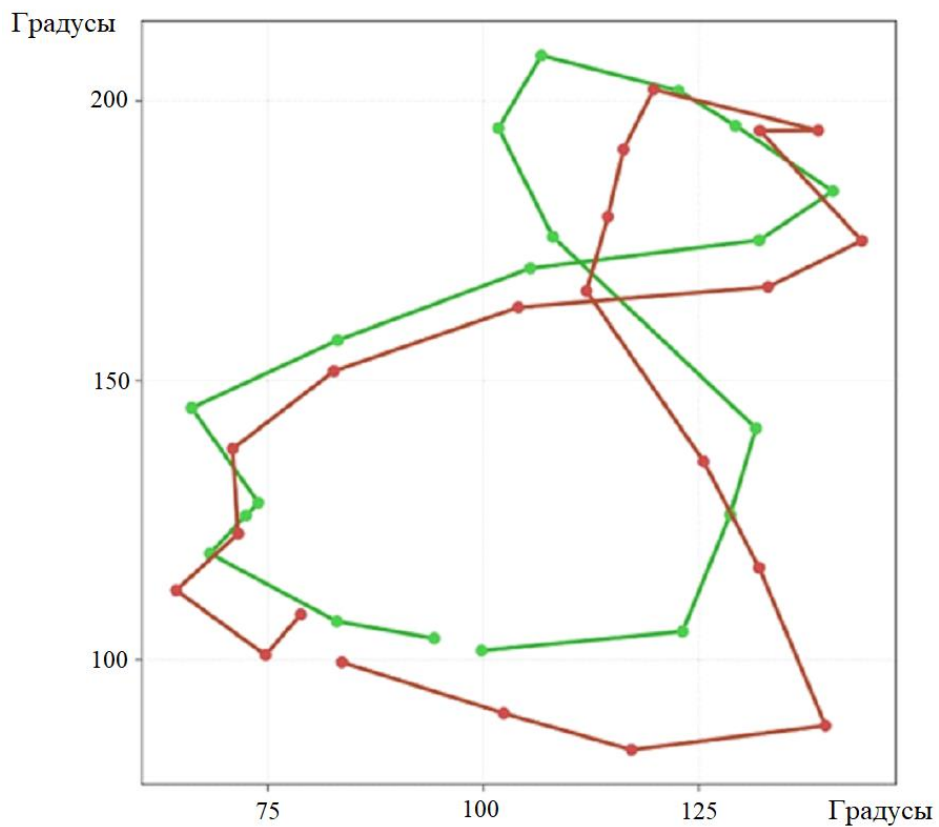
$$CV_{a_0}^{элит} = 3,87\%, CV_{a_0}^{люб} = 45,03\%$$

$$CV_{b_1}^{элит} = 2,16\%, CV_{b_1}^{люб} = 25,11\%$$

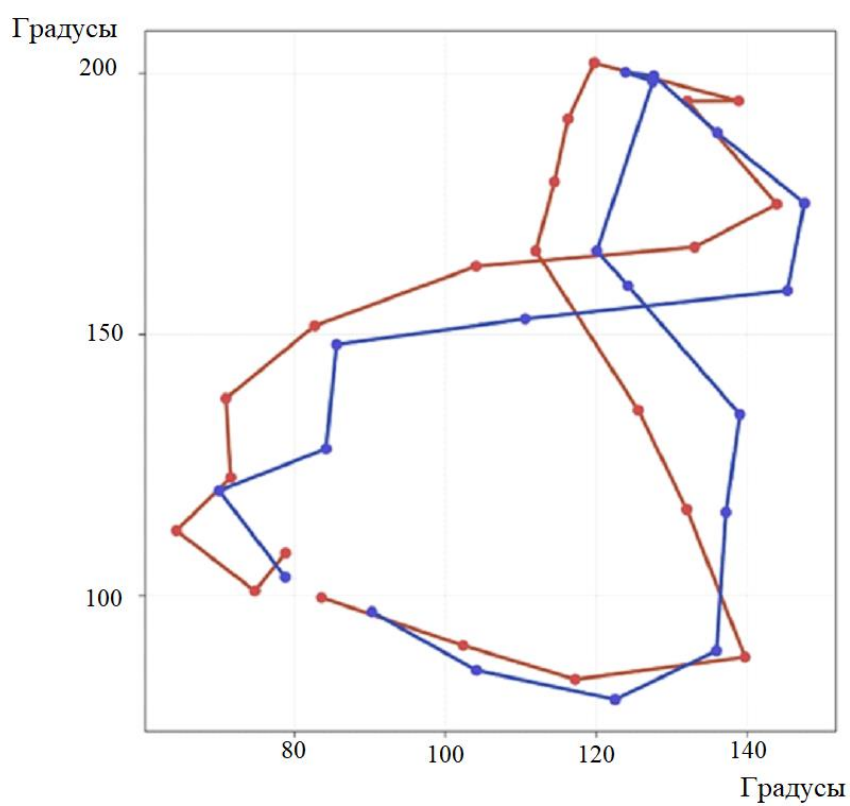
Данный факт не удивителен, поскольку повторяемость циклов спортсменов-любителей значительно уступает повторяемости у элитных спортсменов. Подобные характеристики уже оценивались в литературе для гребли [1]. Кроме того, коэффициенты уравнения (2) были рассчитаны (таб.3) для спортсмена лыжника, передвигающегося на лыжероллерах.

Сравнивая коэффициенты уравнения спортсменов-любителей, передвигающихся на лыжероллерах и лыжах, мы можем наблюдать существенные отличия для всех коэффициентов.

Выбранный подход к исследованию имеет как ряд преимуществ, так и ряд недостатков. К преимуществам, несомненно, стоит отнести фиксирование параметров биомеханики движений реальных спортсменов в ходе реальных соревнований, что представлено в очень ограниченном круге исследований [22]. Кроме того, был разработан механизм получения параметров движения спортсменов, а также выбрана более продвинутая математическая модель (по сравнению с аналогами из литературы), которая неплохо описывает такие движения. К недостаткам и ограничениям данного исследования стоит отнести различные техники измерений: открытый пакет против домашнего кода; а также различные источники видеоданных: видеозаписи из открытых источников против съемки с дрона. Однако, представленные различные техники представляют эволюцию возможностей команды настоящего исследования и может являться для других исследований примером для качественного роста используемых технологий. Слежение за отдельными конечностями без нанесения особых меток, выполненное в исследовании, является одной из сложнейших задач компьютерного зрения [20]. Однако подход, который был использован все же имеет свою необходимость, поскольку подходы, опирающиеся на слежение за центром масс [4, 25] не могут в достаточной степени характеризовать технику движений, и полученный в данной работе результат о качественной разности в дисперсии коэффициентов в математической модели осциллятора для профессионалов и любителей просто неприменим. В этой связи мы можем выдвинуть гипотезу о том, что математические модели типа нелинейного осциллятора для мужчин и для женщин вне зависимости от их класса скорее всего должны иметь различные структуры динамической системы. Так, если для женщин хорошо применима описанная система (1), то для мужчин, по нашей гипотезе, стоит использовать динамическую систему, содержащую быстро-медленные движения типа [13]. Подобные динамические системы широко

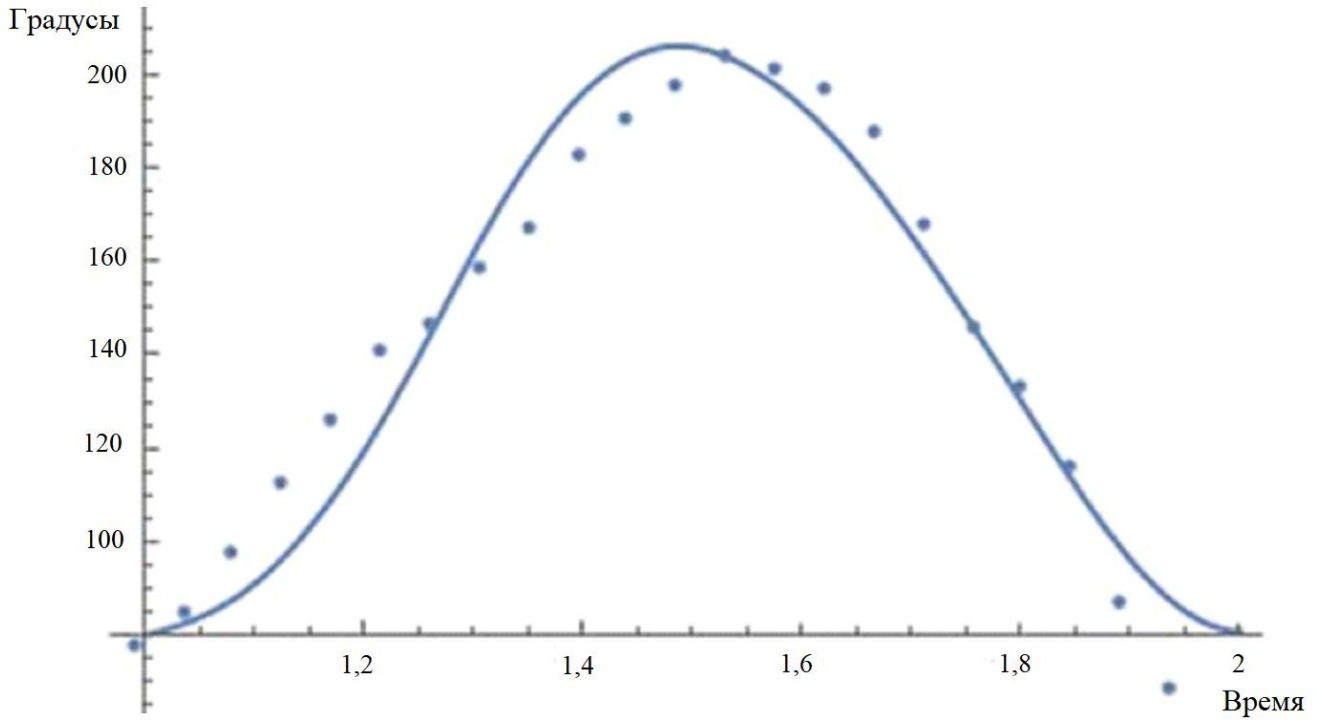


a

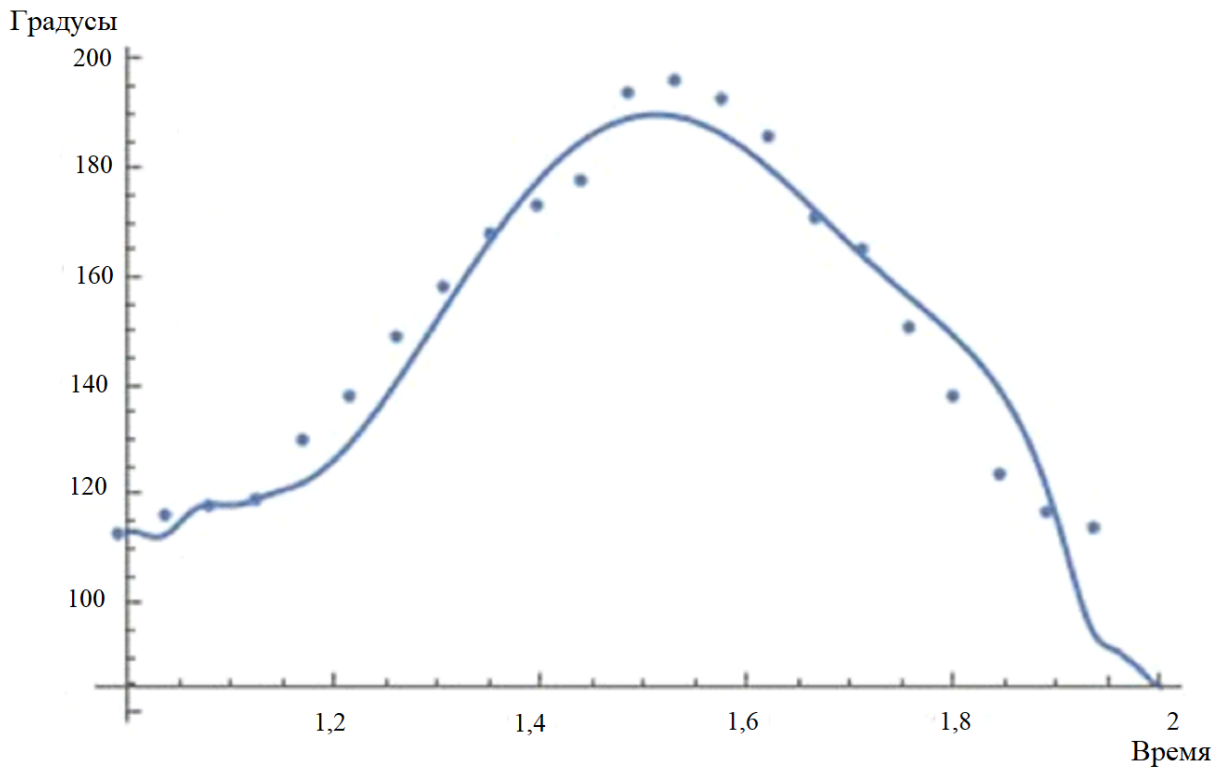


б

Рис. 5. Результаты обработки видеозаписей трех циклов движений для одного из спортсменов (угол φ_0): *a* – сравнение первого и второго циклов; *б* – сравнение второго и третьего циклов (зеленый – первый цикл, красный – второй цикл, синий – третий цикл движения).



a



б

Рис. 6. Пример аппроксимации правой части уравнения (2) для элитных спортсменов: *a* – Ж1; *б* – М1

Таблица 1

Найденные коэффициенты для уравнения (2), построенного для элитных лыжников

ID спортсмена	Коэффициенты						
	a_0	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	k
M1	1607	-31	0,15	26475	-205	0,7	17246
M2	1724	-30	0,14	26553	-204	0,7	18947
M3	1639	20	0,15	26389	-204	0,7	16183
M4	1741	-30	0,13	25347	-206	0,75	19119
Ж1	0,5	-0,005	0,0003	85,5	-0,46	0,0014	64,82
Ж2	72,4	-0,91	0,003	416	-3,49	0,013	250,1

Таблица 2

Найденные коэффициенты для уравнения (2), построенного для лыжников любителей

ID спортсмена	Коэффициенты						
	a_0	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	K
ЛМ1	230,93	-4,86	0,02	3911,54	-40,17	0,12	1023,96
ЛМ2	217,75	-3,94	0,01	3123,25	-33,51	0,10	835,24
ЛМ3	528,71	-8,30	0,03	3536,37	-37,42	0,11	825,33
ЛМ4	302,22	-5,76	0,02	2072,61	-18,69	0,06	779,60

Таблица 3

Найденные коэффициенты для уравнения (2), построенного для лыжника, передвигающегося на лыжероллерах

ID спортсмена	Коэффициенты						
	a_0	a_1	a_2	b_1	b_2	b_3	K
ЛМ5	131,48	-1,38	0,00	-1331,75	11,87	-0,03	-497,42

распространены при моделировании в области физики электричества [6], а дальнейшее развитие предельных циклов и особых точек, в том числе «сложных» получило в цикле работ [9].

Расположение датчиков на элитных спортсменах [21] практически невозможно в условиях гонок, когда они стараются минимизировать вес, включая инвентарь, до граммов. Поэтому, единственным действенным методом для снятия параметров «натуральных» движений является компьютерное зрение, в ходе которого придется обучить модели нейронных сетей различать детали в комбине зонах различных производителей, расцветок, логотипы спонсоров и прочее [26].

Проблема выбора целевой функции в задачах оптимизации является краеугольной не только в промышленности, но и в спорте [5]. Построенная модель биомеханики движений по типу нелинейного осциллятора может использоваться в связке с глобальным моделированием, подобно [17], когда данные о перемещениях передаются в мышечно-скелетную модель и вычисляется работа отдельных блоков мышц спортсмена, а затем, построенные энергетические функционалы применялись бы к

моделям центра масс [14] и далее, как в подходах [37, 39], где расход энергии вычисляется по профилю всей дистанции. Подобный подход к прогнозированию затрат энергии на гонки. Подход может быть новаторским (и скорее всего, уже применяется в упрощенном виде наиболее прогрессивными скандинавскими командами).

Заключение

В настоящей работе приведена методика сбора, анализа экспериментальных данных и построения математической модели биомеханики движений спортсмена-лыжника при движении дабл-полингом. Проведенный анализ показал различия как между спортсменами-любителями и элитными лыжниками, так и между элитными лыжниками в зависимости от пола. Полученные результаты и критические замечания могут быть основой для разработки более полнофункциональной модели, позволяющей решать оптимизационную задачу минимизации энергии при прохождении лыже-гоночной трассы.

Приложение:

$$\begin{pmatrix} \varphi_j^{(i-1)} & \varphi_j^{(i)} & (\varphi_j^{(i)})^2 & (\varphi_j^{(i)})^3 & \varphi_j^{(i)}\varphi_j^{(i+1)} & (\varphi_j^{(i)})^2\varphi_j^{(i+1)} & \varphi_j^{(i+1)} \\ \varphi_j^{(i)} & \varphi_j^{(i+1)} & (\varphi_j^{(i+1)})^2 & (\varphi_j^{(i+1)})^3 & \varphi_j^{(i+1)}\varphi_j^{(i+2)} & (\varphi_j^{(i+1)})^2\varphi_j^{(i+2)} & \varphi_j^{(i+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \varphi_j^{(i+k-1)} & \varphi_j^{(i+k)} & (\varphi_j^{(i+k)})^2 & (\varphi_j^{(i+k)})^3 & \varphi_j^{(i+k)}\varphi_j^{(i+k+1)} & (\varphi_j^{(i+k)})^2\varphi_j^{(i+k+1)} & \varphi_j^{(i+k+1)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1^{(i)} \\ \varphi_1^{(i+1)} \\ \vdots \\ \varphi_1^{(i+k)} \end{pmatrix} \quad (5)$$

Список литературы

1. Васюк В.Е., Гусейнов Д.И., Давыдова Н.С., Лукашевич Д.А., Минченя А.В. Экспериментальное обоснование применения интеллектуальных сенсорных систем оценки биомеханических параметров спортивных движений // Российский журнал биомеханики. – 2020. – Т. 24, № 3. – С. 300–311.
2. Кабанихин С.И. Обратные и некорректные задачи // Сибирское научное издательство, Новосибирск. – 2009.
3. Кубяк А.Е., Паршин Д.В. Об исследовании кинематики движений лыжников элитного уровня при использовании техники «дабл полинг» // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25, № 3. – С. 285–300.
4. Рудаков Р.Н. Новый метод обработки видеозаписей движения спортсменов и спортивных снарядов // Российский журнал биомеханики. – 2004. – Т. 8, № 1. – С. 9–20.
5. Томилов В.Н. Энергетические критерии эффективности спортивных движений // Российский журнал биомеханики. – 2011. – Т. 15, № 3. – С. 79–85.
6. Abraham H., Bloch E. Measure en valeur absolue des périodes des oscillations électriques de haute fréquence. // J.Phys. Theor. Appl. – 1919. – Vol 9. – P.211-222.
7. Almqvist A., Pellegrini B., Lintzén N., Emami N., Holmberg H.-C. Larsson R. A scientific perspective on reducing ski-snow friction to improve performance in Olympic cross-country skiing, the biathlon and Nordic combined // Frontiers in Sports and Active Living. – 2022. – Vol. 4. – P. 844883.
8. Andersson E.P., Hämborg I., Salvador P.C D.N., McGawley K. Physiological responses and cycle characteristics during double-pole versus diagonal-stride roller-skiing in junior cross-country skiers // European Journal of Applied Physiology. – 2021.

9. Arnold V.I., Afrajmovich V.S., Il'yashenko Yu.S., Shil'nikov L.P. Relaxation oscillations // *Dynamical Systems V: Bifurcation theory and Catastrophe theory*. Springer–Verlag Berlin Heidelberg. – 1994. – P.154–192.
10. Bilodeau B., Rundell K.W., Roy B., Boulay M.R. Kinematics of cross-country ski racing. // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 1996. – Vol. 28, No. 1. – P. 128–138.
11. Bonet C. Novel slow–fast behaviour in an oscillator driven by a frequency-switching force // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*. – 2023. – Vol. 118. – P. 107032.
12. Carlsson T., Fjordell W., Wedholm L., Swarén M., Carlsson M. The modern double-poling technique is not more energy efficient than the old-fashioned double-poling technique at a submaximal work intensity // *Frontiers in Sports and Active Living*. – 2022. – Vol. 4.
13. Ginoux, J.-M., etellier, Van der pol and the history of relaxation oscillations: toward the emergence of a concept. // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. AIP Publishing. – 2012. – Vol. 22. – P. 023120
14. Göpfert C., Pohjola M.V., Linnamo V., Ohtonen O., Rapp W. Lindinger S.J. Forward acceleration of the centre of mass during ski skating calculated from force and motion capture data // *Sports Engineering*. – 2016. – Vol. 20, No. 2. – P. 141–153
15. Holmberg H.-C., Lindinger S., Stoggl T., Eitzmair E., Muller E. Biomechanical analysis of double poling in elite cross-country skiers // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 2005. – Vol. 37, No. 5. – P. 807–818.
16. Holmberg H.-C., Stoggl T. Double-poling biomechanics of elite crosscountry skiers: flat versus uphill terrain // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 2016. – Vol. 48, No 8. – P. 1580–1589.
17. Holmberg L.J., Lund A.M. A musculoskeletal full-body simulation of cross-country skiing // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part P Journal of Sports Engineering and Technology*. – 2008. – Vol. 222, No. 1. – P. 11–22.
18. Jonsson M., Welde B., Stöggl T.L. Biomechanical differences in double poling between sexes and level of performance during a classical cross-country skiing competition // *Journal of sports sciences*. – 2019. – Vol. 37, No. 14. – P. 1582–1590.
19. Losnegard T., Myklebust H., Øyvind Skattebo, Stadheim H. K., Øyvind Sandbakk, Hallén J. The Influence of Pole Length on Performance, O2 Cost, and Kinematics in Double Poling // *International Journal of Sports Physiology and Performance*. – 2017. – Vol. 12, No. 2. – P. 211–217.
20. Ma R., Zhang Z. Chen E. Human Motion Gesture Recognition Based on Computer Vision // *Complexity* – 2021. – P. 1–11.
21. Marsland, F., Mackintosh, C., Anson, J., Lyons, K., Waddington, G., Chapman, D. W. Using micro-sensor data to quantify macro kinematics of classical cross-country skiing during on-snow training // *Sports Biomech. Int. Soc. Biomech. Sports*. – 2015. – Vol. 14. – P. 435–47.
22. Marsland, F., Mackintosh, C., Holmberg, H. C., Anson, J., Waddington, G., Lyons, K. Full course macro-kinematic analysis of a 10 km classical cross-country skiing competition // *PLoS ONE* – 2017. – Vol. 12, No. 8. – P. e0182262.
23. Mende E., Schwirtz A., Paternoster F. K. The relationship between general upper-body strength and pole force measurements, and their predictive power regarding double poling sprint performance // *Journal of Sports science & Medicine*. – 2019. – Vol. 18, No. 4. – P. 798.
24. Mündermann L., Corazza S., Andriacchi T. P. The evolution of methods for the capture of human movement leading to markerless motion capture for biomechanical applications // *Journal of neuroengineering and rehabilitation*. – 2006. – Vol. 3, No. 1. – P. 1–11.
25. Myklebust, H., Gløersen, Ø., and Hallén, J. Validity of ski skating center-of-mass displacement measured by a single inertial measurement unit // *J. Appl. Biomech*. – 2015. – Vol. 31. P. 492–498.
26. Naik B.T., Hashmi M.F. Bokde N.D. A Comprehensive Review of Computer Vision in Sports: Open Issues, Future Trends and Research Directions // *Applied Sciences*. – 2022. – Vol. 12, No. 9. – P. 4429.
27. Nakano N., Sakura T., Ueda K., Omura L., Kimura A., Iino Y., Fukushima S. Yoshioka S. Evaluation of 3D markerless motion capture accuracy using OpenPose with multiple video cameras // *Frontiers in sports and active living*. – 2020. – Vol. 2. – P. 50.
28. Ohtonen O., Lindinger S., Linnamo V. Effects of gliding properties of cross-country skis on the force production during skating technique in elite cross-country skiers // *International Journal of Sports Science & Coaching*. – 2013. – Vol. 8, No. 2. – P. 407–416.
29. Ohtonen O., Lindinger S., Linnamo V. Effects of gliding properties of cross-country skis on the force production during skating technique in elite cross-country skiers // *International Journal of Sports Science & Coaching*. – 2013. – Vol. 8, No. 2. – P. 407–416.
30. Parshin, D.V., Gaifutdinov R.A., Koptyug, A.V., Chupakhin, A.P. Mechanics of ski sliding on snow: current status and prospects // *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. – 2023. – Vol. 64, No. 4. – P. – 693–706.
31. Sasadai J. Maeda N. Morikawa M. Komiya M. Shimizu R. Fukui K. Yoshimi M. Kono Y. Urabe Y. Biomechanics of Double Poling in Paralympic Cross-Country Skiing—A Cross-Sectional Study Comparing the Standing and Sitting Positions in Healthy Male Subjects // *Medicina*. – 2022. – Vol. 58, No. 2. – P. 201
32. Shi H., Seeley R. J., Clegg D. J. Sexual differences in the control of energy homeostasis // *Frontiers in neuroendocrinology*. – 2009. – Vol. 30, No. 3. – P. 396–404.
33. Skattebo Ø., Losnegard, T. Stadheim H.K. Double-Poling Physiology and Kinematics of Elite Cross-Country Skiers: Specialized Long-Distance Versus All-Round Skiers // *International Journal of Sports Physiology and Performance*. – 2019. – Vol. 14, No. 9. – P. 1190–1199.
34. Smith G. A., Fewster J. B., Braudt S. M. Double poling kinematics and performance in cross-country skiing // *Journal of Applied Biomechanics*. – 1996. – Vol. 12, No. 1. – P. 88–103.
35. Stöggl R., Müller E., Stöggl T. Do Maximal Roller Skiing Speed and Double Poling Performance Predict Youth Cross-Country Skiing Performance? // *Journal of Sports Science and Medicine*. – 2017. – Vol. 16. – P. 383–390.
36. Stöggl T., Müller E., Lindinger S. Biomechanical comparison of the double-push technique and the conventional skate skiing technique in cross-country sprint

- skiing // Journal of sports sciences. – 2008. – Vol. 26, No. 11. – P. 1225–1233.
37. Stöggl T., Ohtonen O., Takeda M., Miyamoto N., Snyder C., Lemmettylä T., Linnamo V., Lindinger S. J. Comparison of Exclusive Double Poling to Classic Techniques of Cross-country Skiing // *Medicine and Science in Sports and Exercise*. – 2019. – Vol. 51, No. 4. – P. 760–772
38. Sunde A., Johansen J.-M., Gjøra M., Paulsen G., Bråten M., Helgerud J. Støren Ø. Stronger is better: The impact of upper body strength in double poling performance // *Frontiers in physiology*. – 2019. – Vol. 10. – P. 1091.
39. Tjønnås J., Seeberg T.M., Rindal O.M.H., Haugnes P. Sandbakk Ø. Assessment of Basic Motions and Technique Identification in Classical Cross-Country Skiing // *Frontiers in Psychology*. – 2019. – Vol. 10.
40. Tsilmer K.K. Comparative analysis of the technique of two-steps moving of athletes of different level of qualification // In the book: *Technical training of a skier* ed. V.V. Ermakov. Smolensk. – 1976.
41. Zoppirolli C., Holmberg H.-C., Pellegrini B., Quaglia D., Bortolan L. Schena F. The effectiveness of stretch-shortening cycling in upper-limb extensor muscles during elite cross-country skiing with the double-poling technique // *Journal of Electromyography and Kinesiology*. – 2013. – Vol. 23, No. 6. – P. 1512–1519.
42. Zoppirolli C., Pellegrini B., Bortolan L. Schena F. Energetics and biomechanics of double poling in regional and high-level cross-country skiers // *European Journal of Applied Physiology*. – 2015. – Vol. 115. – P. 969–979.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-29-01567).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Коллектив авторов благодарит СДЮШОР ФЛГР Новосибирской области за сотрудничество.

COMPREHENSIVE STUDY OF THE KINEMATICS OF DOUBLE POLING CROSS-COUNTRY SKIING: EXPERIMENT, PROCESSING AND MODELING

A.M. Nurgaliev¹, D.V. Parshin²

¹ Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

² Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 08 November 2023
Approved: 09 December 2023
Accepted for publication: 11 December 2023

Key words:

kinematics of skiing, nonlinear oscillator, digitization of athlete's movement, double-poling

ABSTRACT

In high performance sports, high results are usually the product of a whole set of achievements. Innovations in materials, training methods and techniques allow you to win and set records. One of the ways to improve results in cyclical sports, such as cross-country skiing, is to use information about the biomechanics of athletes movements. Analysis of the athlete's movement parameters allows us to characterize the effectiveness of these movements, as well as to develop tactics for conducting the race. In this paper, we present a method for obtaining data, develop an algorithm for digitizing them, and propose a mathematical model that describes a set of data on the movements of cross-country skiers. During the analysis of mathematical modeling data, a significant influence of both the class of skiers and their gender on the parameters of the mathematical model was revealed. The results of this study can be useful for a deeper understanding of the fundamental biomechanics of cross-country skier's movements, as well as for building more optimal training techniques.

© PNRPU