

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2021.3.05

УДК 531/534: [57+61]

ОБ ИССЛЕДОВАНИИ КИНЕМАТИКИ ДВИЖЕНИЙ ЛЫЖНИКОВ ЭЛИТНОГО УРОВНЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕХНИКИ «ДАБЛ ПОЛИНГ»

А.Е. Кубяк¹, Д.В. Паршин²

¹ Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, e-mail: kubyaka4@gmail.com

² Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Россия, 630090, Новосибирск, пр-т академика Лаврентьева 15, e-mail: danilo.skiman@gmail.com

Аннотация. Высококвалифицированные лыжники-гонщики часто отдают предпочтение технике одновременного бесшажного классического хода («дабл полинг») в силу скорости и универсальности. Данная работа направлена на разработку биомеханической модели лыжника, применяющего технику «дабл полинг». На основе видеозаписи соревнований были проанализированы экспериментальные данные восьми спортсменов элитного уровня (четырёх мужчин и четырёх женщин), которые применяли указанную технику во время прохождения дистанции. Анализ позволил определить зависимость углов движений в некоторых суставах от времени, а также оценить повторяемость движения «дабл полинг» от цикла к циклу. В результате были выявлены основные управляющие параметры, которыми лыжник регулирует темп своего перемещения по трассе и важные для моделирования геометрические характеристики. Показаны статистически значимые различия в технике для мужчин и женщин ($P < 0,01$), что является крайне важным при разработке персонифицированных моделей передвижения. Сделанные выводы будут способствовать построению адекватных математических моделей биомеханики «дабл полинга».

Ключевые слова: биомеханика движений, «дабл полинг», интерполяция, техника лыжного хода, обработка видеоизображений.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие всё чаще в спортивных науках применяются методы численного и математического моделирования, и лыжные гонки как циклический вид спорта являются одними из наиболее вовлеченных в такие исследования. Как отечественные, так и зарубежные авторы изучают действие различных факторов на эффективность лыжников-гонщиков во время прохождения дистанции. Отдельные спортсмены, такие как Мартин Йонсруд Сундбю и Тереза Йохауг, признают абсолютную роль знания тактики прохождения трассы, полученного с помощью GPS-трекинга [2], для достижения побед (ЧМ 2019, ЧМ 2021). На данный момент особое внимание уделяется технике «дабл полинг» – одновременному бесшажному классическому ходу. Данная техника стала популярной среди высококвалифицированных спортсменов, поскольку «дабл полинг» является самым быстрым и универсальным классическим ходом, который может быть использован как в дистанционных, так и в спринтерских гонках.

Авторы были нацелены на разработку математической модели передвижения одновременным бесшажным ходом. Несмотря на то, что данному направлению в спортивной биомеханике посвящено немало работ, на сегодняшний день биомеханическая модель техники «дабл полинг» проработана недостаточно. Далее отметим ряд сопутствующих технике факторов, которым также уделяется большое внимание при разработке численных и математических моделей «дабл полинга».

Существуют работы, посвященные технике тренировки мышц и изучению влияния аэробных и анаэробных нагрузок на показатели спортсменов [1]. Значительное число исследований показало, что натренированные спортсмены могут достичь улучшения показателей выносливости только с помощью интервальных тренировок высокой интенсивности [3, 13, 17], а добавление силовых тренировок позволяет поддерживать производительность даже после длительных нагрузок [18]. Также до недавнего времени при подготовке лыжников активно использовались средства искусственной гипоксии, благодаря которым у спортсменов наблюдались положительные сдвиги в кардиореспираторной системе [5].

Используя корреляционный анализ, авторы работ [4, 8] выявили взаимосвязь соревновательной скорости с показателями специальной физической работоспособности при одновременном бесшажном ходе. Так, относительная максимальная алактатная мощность (относительная мощность на пороге анаэробного обмена) и ускорение корпуса во время отталкивания являются основными управляющими параметрами, которыми лыжник может регулировать темп своего перемещения по трассе.

Стоит отметить, что на результативность элитных спортсменов влияет не только их физическое состояние, но и внешние факторы. Например, такой фактор, как низкая температура окружающей среды, отрицательно сказывается на эффективности лыжников-гонщиков [20], т.е. соответствующая условиям экипировка играет немалую роль как в подготовке спортсмена, так и в гонке. То же можно сказать и о снаряжении. Однако анализ использования разных палок (изогнутых и прямых) лыжниками-гонщиками во время применения техники «дабл полинг» не показал значительного расхождения в измеренных параметрах [15]. При изучении техники «дабл полинг» следует обращать внимание и на наклон трассы, так как эти техники на плоской и наклонной поверхностях резко отличаются друг от друга по целому ряду показателей. Например, на наклонной поверхности частота цикла была выше и возрастала вместе со скоростью движения, в то время как длина поверхности, на которую продвигался лыжник за цикл, была меньше и не зависела от скорости движения. Также изменилось и соотношение фаз в цикле: отношение фазы отталкивания к фазе скольжения было 1:1 на плоской поверхности и 1:3 на наклонной [19].

Приведенные примеры показывают, что на эффективность биомеханической системы лыжника влияет целый комплекс характеристик, и это говорит о сложности исследуемой биомеханической системы лыжника-гонщика.

Работы, посвященные моделированию механики движений, основываются как на наблюдениях за животными [12, 14], так и на исследовании людей [10, 14, 16]. Так, например, *McMahon et al.* сформулировали основные принципы накопления и преобразования энергии во время движения конечностей при ходьбе или беге [14]. *J.B. Morrison* [16] разработал инженерный анализ, с помощью которого на основе экспериментальных данных можно рассчитать силы, передаваемые суставам нижних конечностей. Ему удалось проанализировать связи мышечного напряжения со скоростью и продолжительностью сокращения, а также энергией, вырабатываемой и расходуемой мышцами во время движения.

В некоторых работах встречается описание упрощенной механической модели мышцы [7, 16]. Первоначально эта модель была сформулирована английским физиологом А. Хиллом, и состоит она из сократительного, последовательного и параллельного упругих компонентов. Для получения общей картины структуры мышц такая модель может оказаться вполне полезной, однако она является крайне идеализированной, поскольку более точная модель имела бы гораздо более сложную структуру.

Непосредственно моделирование всего опорно-двигательного аппарата во время катания на беговых лыжах продемонстрировали шведские авторы [10]. Костно-мышечная имитационная модель была реализована в системе моделирования *AnyBody*® (коммерческая, *AnyBody Inc.*, Дания). В качестве входных данных для моделирования использовались движения и внешние силы, полученные из эксперимента со спортсменом на лыжном эргометре, который выполнял движения, имитирующие ход «дабл полинг». Во время эксперимента фиксировались силы, направленные вдоль лыжных палок, и углы в локтевом, тазобедренном и коленном суставах, а также угол между палкой и горизонтальной поверхностью. На выходе в симуляторе *AnyBody* получали внутренние мышечные силы, которые и должны были генерировать движения. Допустимое сопоставление результатов с данными из литературы не показало статистически значимых отличий. Основной вывод заключался в том, что для моделирования всего тела с большим диапазоном движений и большими ускорениями, свойственными технике «дабл полинг», можно использовать обратную динамику и статическую оптимизацию. Именно поэтому данное направление исследований является оптимальным в моделировании биомеханики лыжного хода, а также достойно быть ориентиром для настоящей работы.

Целью данной работы является разработка подхода к описанию механики бесшажного классического лыжного хода. Для достижения этой цели в нашей работе приводятся сама методика, ее верификация с помощью компьютерного алгоритма и результаты экспериментальных измерений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измеряемые величины

На данном этапе исследований рассматривается упрощенная плоская биомеханическая модель лыжника-гонщика с палкой (рис. 1), который находится в положении под углом α к трассе и имеет угол φ_0 в плечевом суставе, угол φ_1

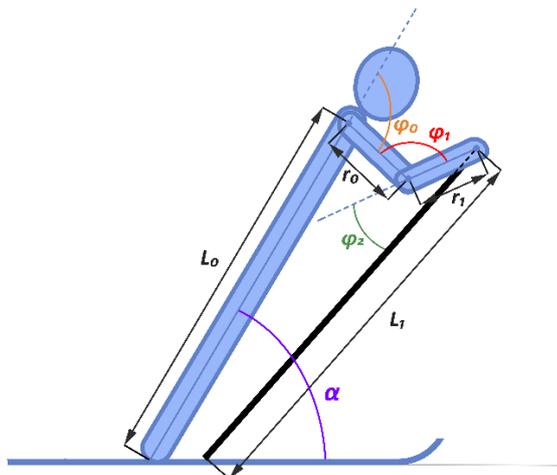


Рис. 1. Биомеханическая модель лыжника-гонщика

в локтевом суставе и угол φ_2 между предплечьем и палкой. Постоянные величины: длина туловища и ног – L_0 , длина палки – L_1 , часть руки от плечевого до локтевого сустава – r_0 , часть руки от локтевого сустава до запястья – r_1 .

Для дальнейших рассуждений отметим, что в цикле хода различают две фазы: свободное скольжение на двух лыжах и одновременное отталкивание палками. Первая фаза начинается в момент окончания отталкивания палками и заканчивается в момент постановки палок на снег после их выноса вперёд. Момент от постановки палок на снег до их отрыва относится ко второй фазе.

Сбор и подготовка экспериментальных данных

Кинематические данные восьми лыжников элитного уровня (четырёх мужчин и четырёх женщин) были получены из видеозаписей соревнований.

Ришар Жув – лыжник сборной Франции, специализируется на спринтерских гонках свободным стилем, является бронзовым призёром Олимпийских игр 2018 года в командном спринте и чемпионата мира 2019 года в эстафете. Бронзовый призёр чемпионата мира 2021 года в эстафете. Антропометрические показатели спортсмена: рост – 175 см ($L_0 \approx 153$ см, $L_1 \approx 145$ см, $r_0 \approx 31$ см, $r_1 \approx 27$ см), вес – 80 кг, возраст – 22 года (здесь и далее возраст на момент съёмки видео). Фрагмент видео – обучающая программа от лыжной школы Симона Фуркада (французский биатлонист, чемпион мира 2009 в смешанной эстафете), где Ришар Жув демонстрирует технику классического хода «дабл полинг».

Алексей Червоткин – российский лыжник, специализируется на дистанционных гонках, является серебряным призёром Олимпийских игр 2018 года в эстафете и серебряным призёром чемпионата мира 2017 и 2021 годов в эстафете, заслуженный мастер спорта России по лыжным гонкам. Антропометрические показатели спортсмена: рост – 174 см ($L_0 \approx 152$ см, $L_1 \approx 144$ см, $r_0 \approx 31$ см, $r_1 \approx 27$ см), вес – 68 кг, возраст – 21 год. Фрагмент видео – чемпионат России по лыжным гонкам 2017 года в г. Ханты-Мансийске (масс-старт 50 км, на фрагменте $\approx 47,8$ км).

Александр Большунов – российский лыжник, чемпион мира 2021 года в скиатлоне, четырёхкратный призёр Олимпийских игр 2018 года, семикратный призёр чемпионатов мира 2019 и 2021 годов, двукратный обладатель Большого хрустального глобуса (2019/20, 2020/21), двукратный победитель лыжной многодневной гонки «Тур де Ски» (2019/2020 и 2021), трёхкратный обладатель Малого хрустального глобуса в дистанционном зачёте Кубка мира (2018/19, 2019/20, 2020/21). Антропометрические показатели спортсмена: рост – 185 см ($L_0 \approx 162$ см, $L_1 \approx 153$ см, $r_0 \approx 33$ см, $r_1 \approx 29$ см), вес – 83 кг, возраст – 20 лет. Для Александра Большунова и Алексея Червоткина был использован один и тот же видефрагмент, на котором лыжники следуют друг за другом.

Сергей Устюгов – российский лыжник, двукратный чемпион мира 2017 года, победитель многодневной гонки «Тур де Ски» (2016/2017), трёхкратный чемпион мира среди молодёжи, пятикратный чемпион мира среди юниоров. Серебряный призёр чемпионата мира 2021 года в эстафете. Заслуженный мастер спорта России (2017). Универсал, успешно выступает и в спринтерских, и в дистанционных гонках. Антропометрические показатели спортсмена: рост – 184 см ($L_0 \approx 161$ см, $L_1 \approx 152$ см, $r_0 \approx 33$ см, $r_1 \approx 29$ см), вес – 80 кг, возраст – 28 лет. Видефрагмент – чемпионат мира по лыжным гонкам 2021 года в г. Оберстдорф (классический спринт 1,3 км).

Тереза Штадлобер – австрийская лыжница, участница Олимпийских игр в Сочи, чемпионка мира по скиатлону среди юниоров (2013). Антропометрические показатели спортсменки: рост – 168 см ($L_0 \approx 147$ см, $L_1 \approx 139$ см, $r_0 \approx 30$ см, $r_1 \approx 25$ см), вес – 52 кг, возраст – 24 года. Видеофрагмент – 1-й этап Кубка мира по лыжным гонкам (2017/2018) в г. Рука (интервальный старт 10 км, финиш).

Сэйди Бьорнсен – американская лыжница, бронзовый призёр чемпионата мира 2017 года в командном спринте, призёр этапов Кубка мира. Антропометрические показатели спортсменки: рост – 175 см ($L_0 \approx 153$ см, $L_1 \approx 145$ см, $r_0 \approx 32$ см, $r_1 \approx 26$ см), вес – 66 кг, возраст – 29 лет. Видеофрагмент – 2-й этап Кубка мира (2017/2018) в г. Лиллехаммер (классический спринт 1,3 км).

Наталья Непряева – лыжница российской сборной, бронзовый призёр зимних Олимпийских игр 2018 года в эстафете, двукратный бронзовый призёр чемпионата мира 2019 года в скиатлоне и эстафете, а также заслуженный мастер спорта России. Серебряный призёр чемпионата мира 2021 года в эстафете. Антропометрические показатели спортсменки: рост – 169 см ($L_0 \approx 148$ см, $L_1 \approx 140$ см, $r_0 \approx 31$ см, $r_1 \approx 25$ см), вес – 63 кг, возраст – 23 года. Видеофрагмент – 2-й этап Кубка мира (2017/2018) в г. Лиллехаммер (классический спринт 1,3 км).

Тереза Йохауг – норвежская лыжница, олимпийская чемпионка 2010 года в эстафете, 14-кратная чемпионка мира, трёхкратная обладательница Кубка мира в общем зачёте. Специализируется в дистанционных видах. Чемпионка Норвегии по лёгкой атлетике 2019 года в беге на 10 000 метров. 8-кратная победительница (по времени прохождения дистанции) гонки в гору Альпе Чермис на 9 километров (заключительный этап «Тур де Ски»). Антропометрические показатели спортсменки: рост – 162 см ($L_0 \approx 142$ см, $L_1 \approx 134$ см, $r_0 \approx 30$ см, $r_1 \approx 24$ см), вес – 46 кг, возраст – 32 года. Видеофрагмент – чемпионат мира по лыжным гонкам 2021 в г. Оберстдорф (гонка 10 км, старт).

Обработка видео была выполнена в программе *Movavi Video Suite*®. Из полноценных записей соревнований были вырезаны фрагменты видео, подходящие для анализа (спортсмен изображен в сагиттальной плоскости и совершает 3 цикла одновременного бесшажного хода подряд). Для того чтобы фиксировать данные каждого цикла каждую 0,04 с, скорость воспроизведения видеофрагментов была уменьшена в 10 раз.

Углы φ_0 , φ_1 , φ_2 были измерены с использованием бесплатной программы *MB-Ruler*, в которой одним из инструментов является транспортир. На рис. 2 изображен процесс измерения угла в локтевом суставе лыжника. Например, чтобы получить

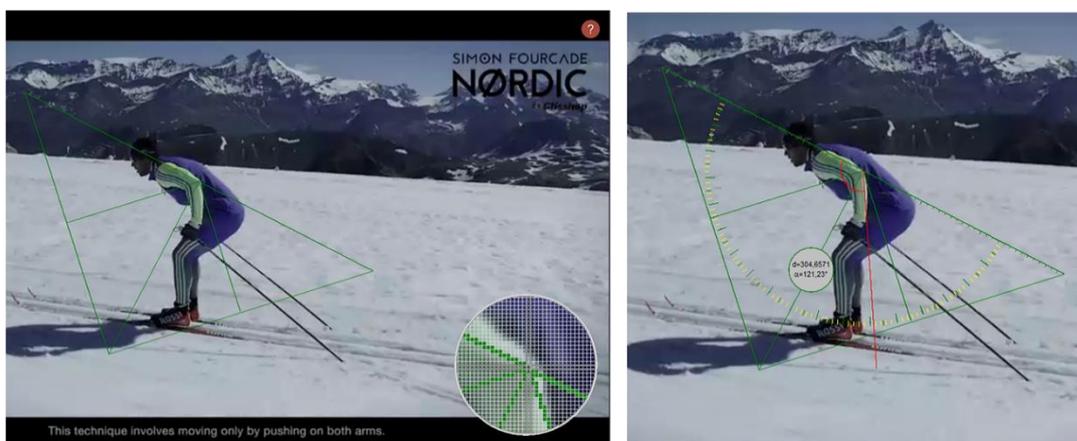


Рис. 2. Снимок экрана компьютера с использованием приложения *MB-Ruler* во время измерения углов в суставах тела спортсмена

значение угла φ_0 , каждый кадр из серии цикла «дабл полинга» обрабатывается по следующему принципу: основание транспорта устанавливается параллельно плечу, а центр транспорта в центр сустава, затем красный луч располагается параллельно предплечью, и необходимое значение полученного угла появляется в окне приложения.

Верификация методики измерения

Для верификации методики измерения в программном пакете *Wolfram Mathematica*® была построена плоская численная модель лыжника (рис. 3), который совершает половину цикла движений типа «дабл полинг» (только фаза толчка). Непосредственно движение этой модели можно увидеть, перейдя по ссылке [6]. Модель включает в себя туловище с ногами, плечо и предплечье, длины которых L_0 , r_0 и r_1 соответственно. Таким образом, существует возможность использовать теоретический закон изменения углов φ_0 и φ_1 со временем.

С помощью χ^2 -критерия была проверена значимость расхождения эмпирических (наблюдаемых) и теоретических (ожидаемых, которые определялись по заданному закону) данных. Данные были получены для трёх различных значений тройки L_0 , r_0 и r_1 . Визуальная разница между эмпирическими и теоретическими данными представлена на рис. 4.

Значения χ^2 -критерия можно вычислить следующим образом:

$$\chi_i^2 = \sum \frac{(\varphi_i^{\text{Э}} - \varphi_i^{\text{T}})^2}{\varphi_i^{\text{T}}}, \quad (1)$$

где $\varphi_i^{\text{Э}}$ – эмпирическое значение для i -го угла; φ_i^{T} – теоретическое значение для i -го угла, $i = 0, 1$. Полученные значения критерия для каждого случая приведены в табл. 1. Таким образом, при уровне значимости $p = 0,01$ основная гипотеза H_0 о незначимости расхождений между эмпирическими и теоретическими значениями выполняется, так как все вычисленные значения критерия не превышают табличного критического значения.

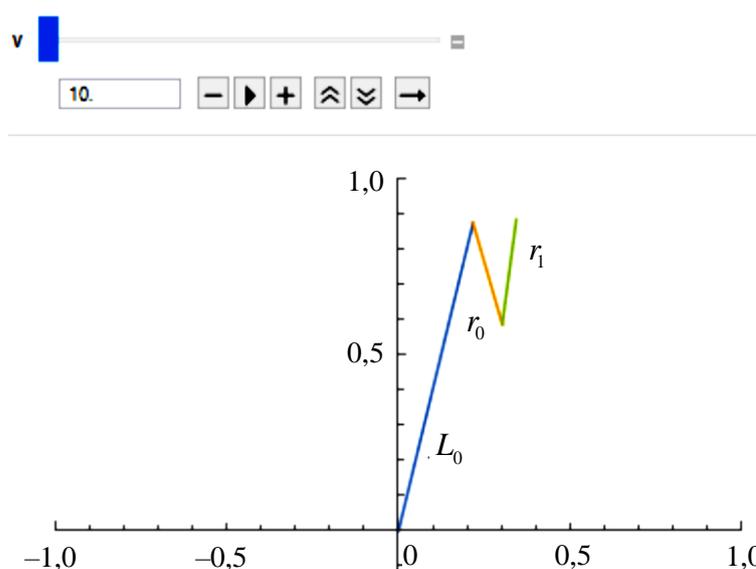


Рис. 3. Плоская численная модель лыжника, которая включает в себя туловище с ногами длиной L_0 , плечо длиной r_0 и предплечье длиной r_1

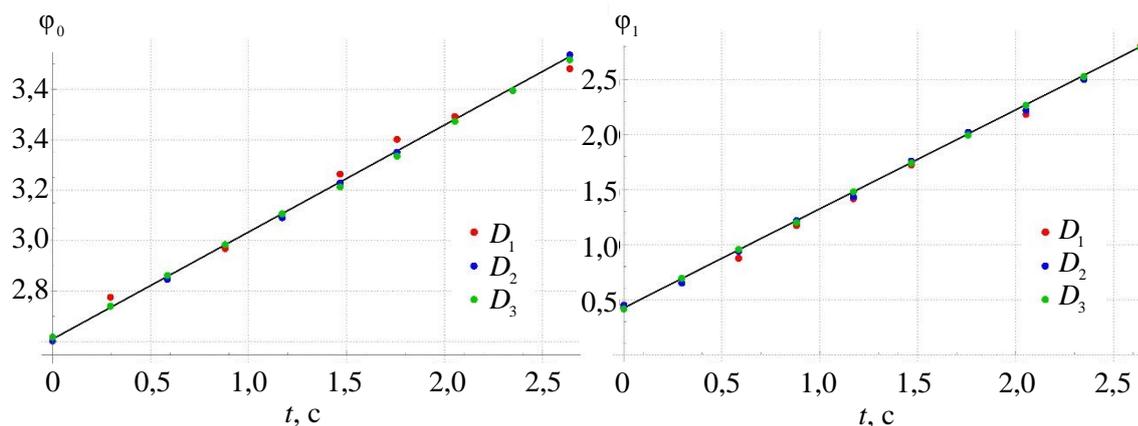


Рис. 4. Графики зависимости углов φ_0 и φ_1 от времени в течение фазы толчка цикла «дабл полинга»; прямая линия обозначает теоретический закон изменения углов со временем, взятый из плоской численной модели, построенной в программном пакете *Wolfram Mathematica*®; точки – эмпирические данные, соответствующие трём различным значениям длин (в см) туловища, предплечья и плеча; $D_1 = \{1,3; 0,433; 0,433\}$, $D_2 = \{2,6; 0,867; 0,867\}$, $D_3 = \{3,9; 1,3; 1,3\}$

Таблица 1

Значимость расхождения эмпирических и теоретических данных

L_0	r_0	r_1	$\chi_0^2 = \chi^2(\varphi_0)$	$\chi_1^2 = \chi^2(\varphi_1)$
1,3	0,43	0,43	$2,35 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-2}$
2,6	0,87	0,87	$2,84 \cdot 10^{-4}$	$8,85 \cdot 10^{-3}$
3,9	1,3	1,3	$4,15 \cdot 10^{-4}$	$6,23 \cdot 10^{-3}$

Погрешность проведенных измерений оценивается в 1,93%, что является вполне допустимой величиной, находящейся в пределах статистической погрешности для рассматриваемой выборки данных.

Обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных проводилась в программном пакете *Wolfram Mathematica* (коммерческое ПО, лицензия Новосибирского государственного университета). Были построены графики изменения углов φ_0 , φ_1 , φ_2 со временем на протяжении трёх циклов «дабл полинга» для каждого гонщика. С целью выяснения значимости того или иного угла, а также оценки повторяемости движений были построены графики зависимости одного угла от другого ($\varphi_0 = \varphi_0(\varphi_1)$, $\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_1)$). На графиках для $\varphi_0(\varphi_1)$ и $\varphi_2(\varphi_1)$ изображены точки, соединённые прямыми (для 1-го и 3-го циклов) и кривыми второго порядка (в случае 2-го цикла).

Для того чтобы иметь возможность сравнивать циклы между собой, с помощью сплайнов второго и первого порядков по точкам 2-го цикла были построены интерполянты $\varphi_0^{(II)} = \varphi_0^{(II)}(\varphi_1)$ и $\varphi_2^{(II)} = \varphi_2^{(II)}(\varphi_1)$ (рис. 5). Интерполяция также была выполнена в программе *Wolfram Mathematica*. Полученной точности достаточно для того, чтобы сравнить и установить процент повторяемости циклов.

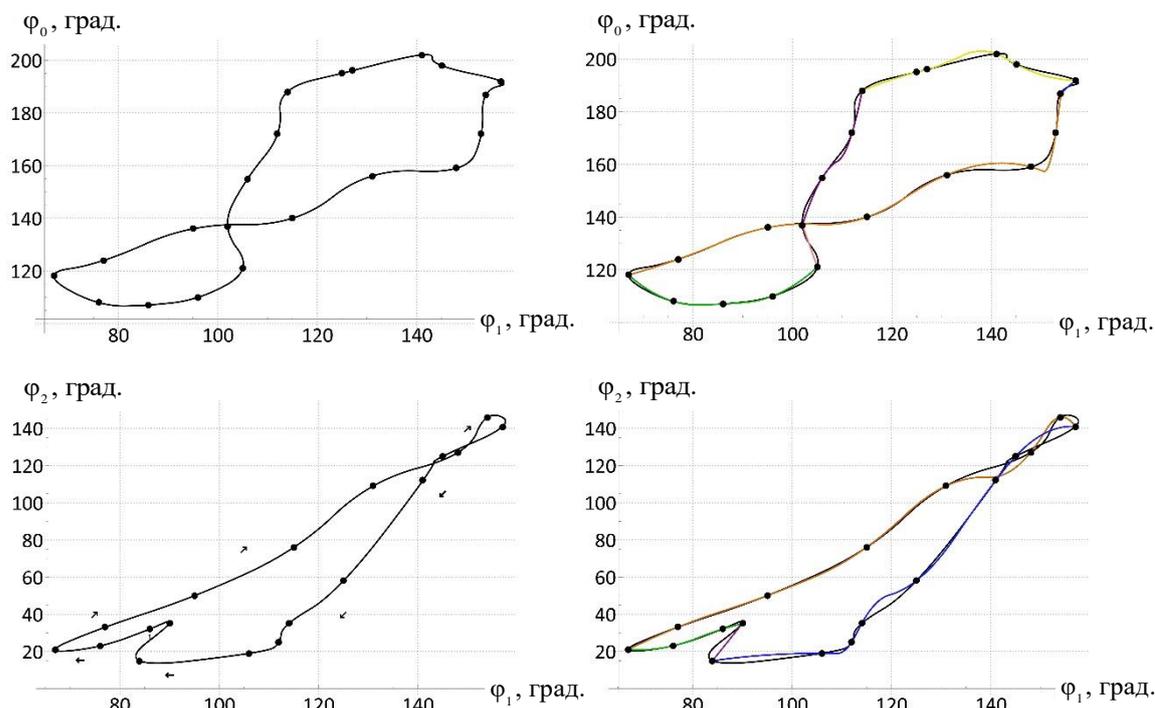


Рис. 5. Графики зависимости углов φ_0 и φ_2 от угла φ_1 во втором цикле «дабл полинга»: слева – точки, соединенные кривыми второго порядка, справа – по точкам построены интерполянты $\varphi_0^{(II)}(\varphi_1)$ и $\varphi_2^{(II)}(\varphi_1)$; разные цвета кусочно-гладких интерполирующих функций соответствуют разным участкам однозначности на кривой цикла

Данная процедура необходима для понимания того, какие геометрические характеристики жёстко связаны друг с другом и в какой степени.

С целью получения интерполянтов $\varphi_0^{(II)}$ и $\varphi_2^{(II)}$ данные для второго цикла были разбиты на участки однозначности. На каждом из участков однозначности была построена своя интерполирующая функция с использованием сплайнов второго и первого порядков.

Таким образом, полученные интерполянты $\varphi_0^{(II)} = \varphi_0^{(II)}(\varphi_1)$ и $\varphi_2^{(II)} = \varphi_2^{(II)}(\varphi_1)$ представляют собой кусочно-гладкие функции, определенные на интервале $[\varphi_{1min}, \varphi_{1max}]$, где φ_{1min} и φ_{1max} – это наименьшее и наибольшее значения угла φ_1 во 2-м цикле соответственно.

Статистический анализ

Численная разница между циклами рассчитывалась по формулам

$$\Delta_i^0 = \frac{\sqrt{N_i \sum_{j=1}^{N_i} (\varphi_{0(j)}^{(i)} - \varphi_0^{(II)})^2}}{\left| \sum_{j=1}^{N_i} \varphi_0^{(II)} \right|}; \quad (2)$$

$$\Delta_i^2 = \frac{\sqrt{N_i \sum_{j=1}^{N_i} (\varphi_{2(j)}^{(i)} - \varphi_2^{(H)})^2}}{\left| \sum_{j=1}^{N_i} \varphi_2^{(H)} \right|}, \quad (3)$$

где Δ_i^0 – стандартное нормальное отклонение 2-го цикла от i -го для угла $\varphi_0 = \varphi_0(\varphi_1)$; N_i – количество точек в i -м цикле; $\varphi_0^{(H)} = \varphi_0^{(H)}(\varphi_1) = \varphi_0^{(H)}\left(\varphi_1^{(i)}\right)$ – значение интерполирующей функции $\varphi_0^{(H)}$ в точке $\varphi_1^{(i)}$, т.е. в j -й точке i -го цикла; $j = 1, \dots, N_i$; $i = 1$ и 3 . Аналогично для второй формулы Δ_i^2 – стандартное нормальное отклонение 2-го цикла от i -го для угла $\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_1)$; N_i – количество точек в i -м цикле; $\varphi_2^{(H)} = \varphi_2^{(H)}(\varphi_1) = \varphi_2^{(H)}\left(\varphi_1^{(i)}\right)$ – значение интерполирующей функции $\varphi_2^{(H)}$ в точке $\varphi_1^{(i)}$, т.е. в j -й точке i -го цикла; $j = 1, \dots, N_i$; $i = 1$ и 3 .

Кроме того, был проведен статистический анализ с использованием непараметрического критерия Манна–Уитни для определения значимости расхождений между данными мужчин и женщин. Анализ был проведен для следующих данных: время цикла (CT – *cycle time*), относительное время фазы отталкивания (PT_{rel} – *relative poling time*) и фазы скольжения (ST_{rel} – *relative swing time*), угол φ_1 (в локтевом суставе) в момент постановки палок на снег (φ_{1pp} – φ_1 at pole plant) и в момент их отрыва (φ_{1po} – φ_1 at pole-off), минимальное значение угла φ_1 в течение фазы отталкивания (φ_{1min}), амплитуды углов $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ (углы в плечевом и локтевом суставах и угол между предплечьем и палкой соответственно). Указанный критерий использовался для сравнения двух выборок, состоящих из значений соответствующих данных для мужчин и женщин. Рассматривались два уровня значимости $p = 0,01$ и $p = 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 6 показаны изменения углов $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2$ со временем на протяжении трёх циклов «дабл полинга» для всех восьми спортсменов. Части графиков, на которых значения углов возрастают, относятся к фазе отталкивания. Далее следует фаза скольжения, во время которой значения углов уменьшаются.

Изменение углов $\varphi_0 = \varphi_0(\varphi_1)$ и $\varphi_2 = \varphi_2(\varphi_1)$ в течение трёх циклов одновременного бесшажного хода показано на рис. 7 и 8 соответственно. Эти графики позволяют наглядно оценить повторяемость циклов движения. Результаты вычисления численных разностей Δ_i^0 и Δ_i^2 между циклами, полученные по формулам (2) и (3) соответственно, представлены в табл. 2.

Так, для Александра Большунова интерполяции второго цикла одновременного бесшажного хода выполнялись по 21 точке для угла $\varphi_0(\varphi_1)$ и по 19 точкам для угла $\varphi_2(\varphi_1)$, в результате чего были получены интерполирующие функции $\varphi_0^{(H)}(\varphi_1)$ и $\varphi_2^{(H)}(\varphi_1)$ соответственно. Стандартное нормальное отклонение Δ_i^0 показало, что для угла $\varphi_0(\varphi_1)$ разница второго цикла с первым составила $\approx 11,2\%$, а с третьим $\approx 9,1\%$.

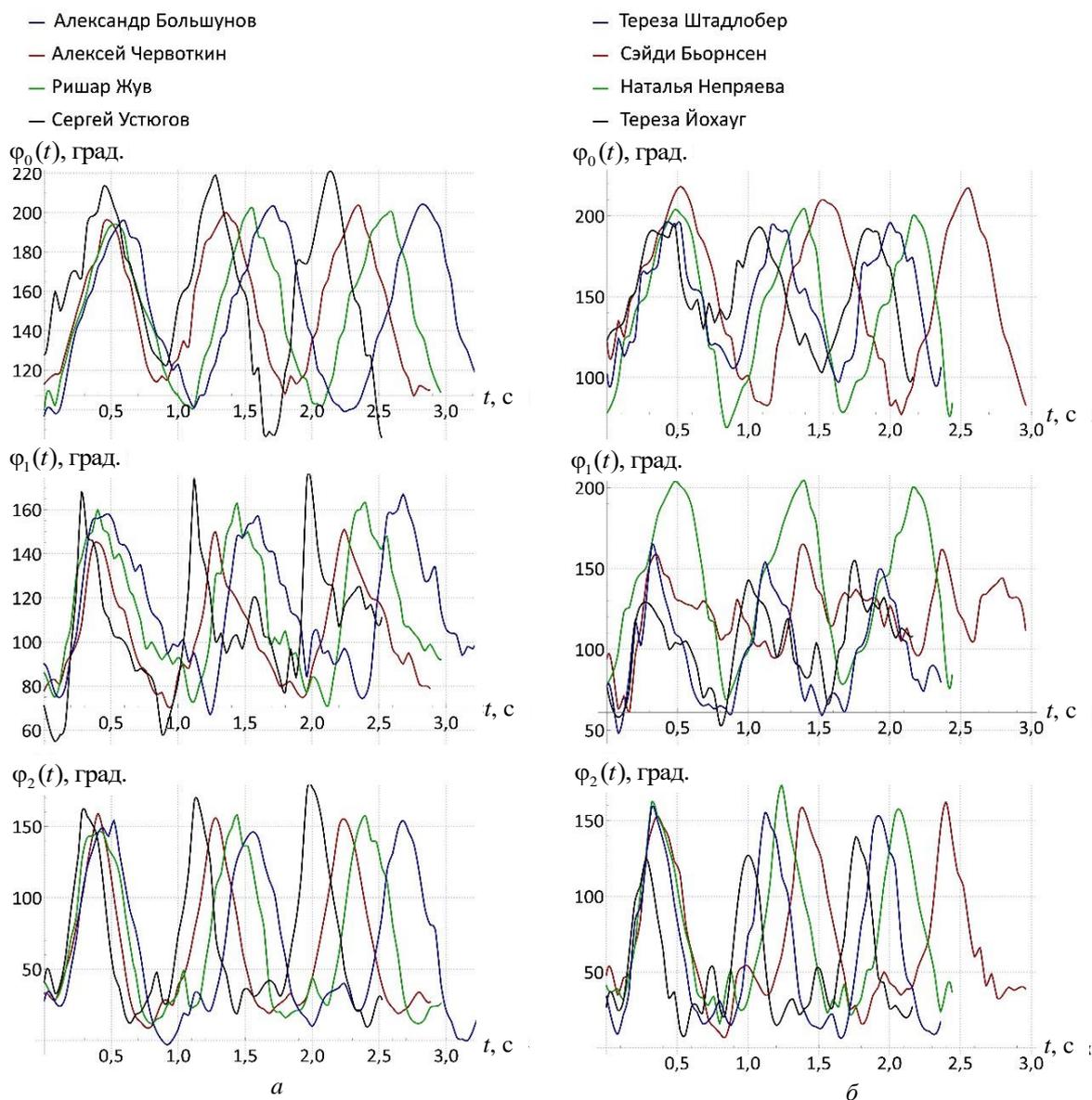


Рис. 6. Графики изменения углов φ_0 , φ_1 , φ_2 в течение трёх циклов «дабл полинга» для четырёх мужчин (а) и четырёх женщин (б)

Аналогично отклонение Δ_i^2 показало, что для угла φ_2 (φ_1) разницы второго цикла с первым и третьим составили $\approx 18,8\%$ и $\approx 19\%$ соответственно.

Что касается статистических различий между выборками данных для спортсменов мужчин и женщин, то для уровня значимости $p = 0,05$ они являются несущественными относительно данных φ_{1PP} , φ_{1PO} , φ_{1min} и амплитуд углов φ_0 , φ_1 , φ_2 ($U_{1PP_EMP} = 59,5$, $U_{1PO_EMP} = 69,5$, $U_{1min_EMP} = 58$, $U_{0EMP} = 60$, $U_{1EMP} = 71,5$, $U_{2EMP} = 43,5$, $U_{KR_0,01} = 27$, $U_{KR_0,05} = 37$). Однако для данных CT , PT_{rel} и ST_{rel} различия между выборками уже существенны для уровня значимости $p = 0,01$ ($U_{CT_EMP} = 22$, $U_{PTrel_EMP} = 21$, $U_{STrel_EMP} = 21$, $U_{KR_0,01} = 27$, $U_{KR_0,05} = 37$).

На рис. 9 представлены диаграммы разброса, на которых отображены медиана, общий и межквартильный размах.

Таблица 2

Численная разница между циклами

Спортсмен	$\Phi_2 = \Phi_2(\Phi_1)$			$\Phi_0 = \Phi_0(\Phi_1)$		
Ришар Жув	1-й цикл	$N_1 = 21$	$\Delta_1^2 = 0,11$	1-й цикл	$N_1 = 22$	$\Delta_1^\circ = 0,06$
	2-й цикл	$N_2 = 23$		2-й цикл	$N_2 = 20$	
	3-й цикл	$N_3 = 23$	$\Delta_3^2 = 0,18$	3-й цикл	$N_3 = 25$	$\Delta_3^\circ = 0,06$
Алексей Червоткин	1-й цикл	$N_1 = 23$	$\Delta_1^2 = 0,15$	1-й цикл	$N_1 = 22$	$\Delta_1^\circ = 0,07$
	2-й цикл	$N_2 = 21$		2-й цикл	$N_2 = 17$	
	3-й цикл	$N_3 = 23$	$\Delta_3^2 = 0,13$	3-й цикл	$N_3 = 23$	$\Delta_3^\circ = 0,08$
Александр Большунов	1-й цикл	$N_1 = 26$	$\Delta_1^2 = 0,19$	1-й цикл	$N_1 = 24$	$\Delta_1^\circ = 0,11$
	2-й цикл	$N_2 = 19$		2-й цикл	$N_2 = 21$	
	3-й цикл	$N_3 = 26$	$\Delta_3^2 = 0,19$	3-й цикл	$N_3 = 26$	$\Delta_3^\circ = 0,09$
Сергей Устюгов	1-й цикл	$N_1 = 19$	$\Delta_1^2 = 0,18$	1-й цикл	$N_1 = 20$	$\Delta_1^\circ = 0,07$
	2-й цикл	$N_2 = 18$		2-й цикл	$N_2 = 21$	
	3-й цикл	$N_3 = 17$	$\Delta_3^2 = 0,13$	3-й цикл	$N_3 = 20$	$\Delta_3^\circ = 0,07$
Спортсмен	$\Phi_2 = \Phi_2(\Phi_1)$			$\Phi_0 = \Phi_0(\Phi_1)$		
Тереза Штадлобер	1-й цикл	$N_1 = 14$	$\Delta_1^2 = 0,16$	1-й цикл	$N_1 = 15$	$\Delta_1^\circ = 0,09$
	2-й цикл	$N_2 = 13$		2-й цикл	$N_2 = 14$	
	3-й цикл	$N_3 = 16$	$\Delta_3^2 = 0,15$	3-й цикл	$N_3 = 14$	$\Delta_3^\circ = 0,08$
Сэйди Бьорнсен	1-й цикл	$N_1 = 17$	$\Delta_1^2 = 0,07$	1-й цикл	$N_1 = 18$	$\Delta_1^\circ = 0,07$
	2-й цикл	$N_2 = 16$		2-й цикл	$N_2 = 16$	
	3-й цикл	$N_3 = 15$	$\Delta_3^2 = 0,12$	3-й цикл	$N_3 = 15$	$\Delta_3^\circ = 0,05$
Наталья Непряева	1-й цикл	$N_1 = 22$	$\Delta_1^2 = 0,19$	1-й цикл	$N_1 = 17$	$\Delta_1^\circ = 0,07$
	2-й цикл	$N_2 = 20$		2-й цикл	$N_2 = 19$	
	3-й цикл	$N_3 = 17$	$\Delta_3^2 = 0,14$	3-й цикл	$N_3 = 17$	$\Delta_3^\circ = 0,09$
Тереза Йохауг	1-й цикл	$N_1 = 16$	$\Delta_1^2 = 0,19$	1-й цикл	$N_1 = 16$	$\Delta_1^\circ = 0,04$
	2-й цикл	$N_2 = 14$		2-й цикл	$N_2 = 14$	
	3-й цикл	$N_3 = 16$	$\Delta_3^2 = 0,15$	3-й цикл	$N_3 = 15$	$\Delta_3^\circ = 0,08$

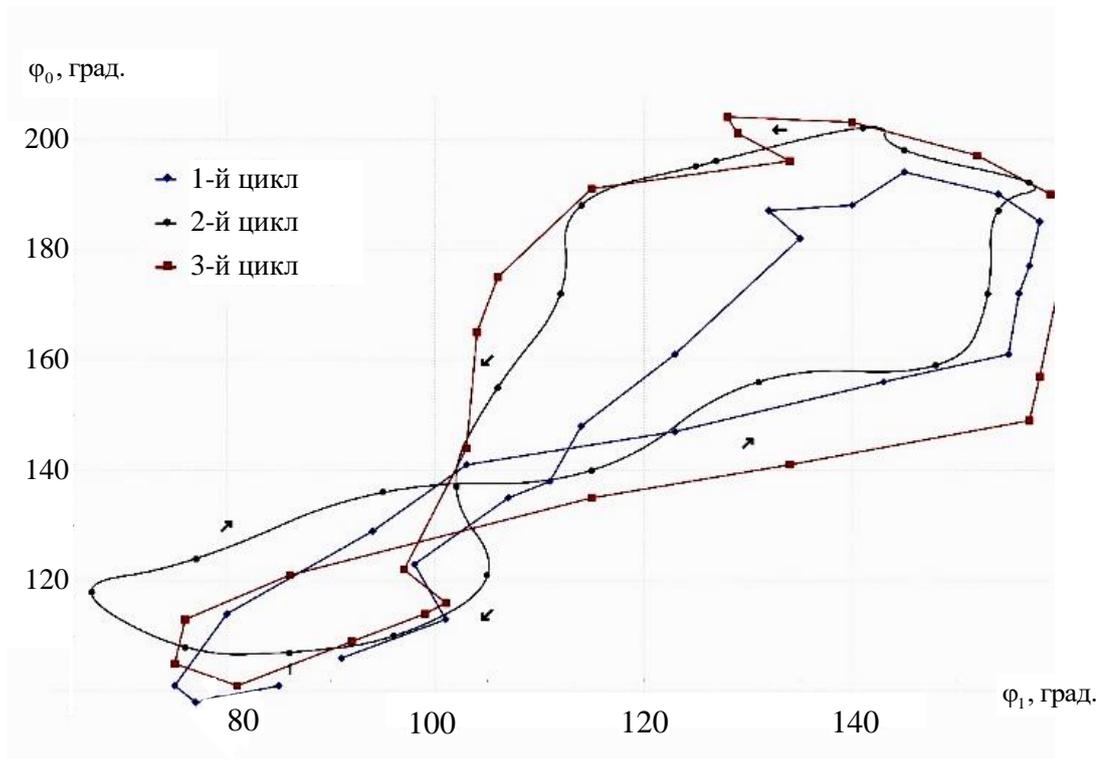


Рис. 7. График зависимости угла φ_0 от угла φ_1 на протяжении трёх циклов «дабл полинга» для одного из рассмотренных спортсменов – Александра Большунова

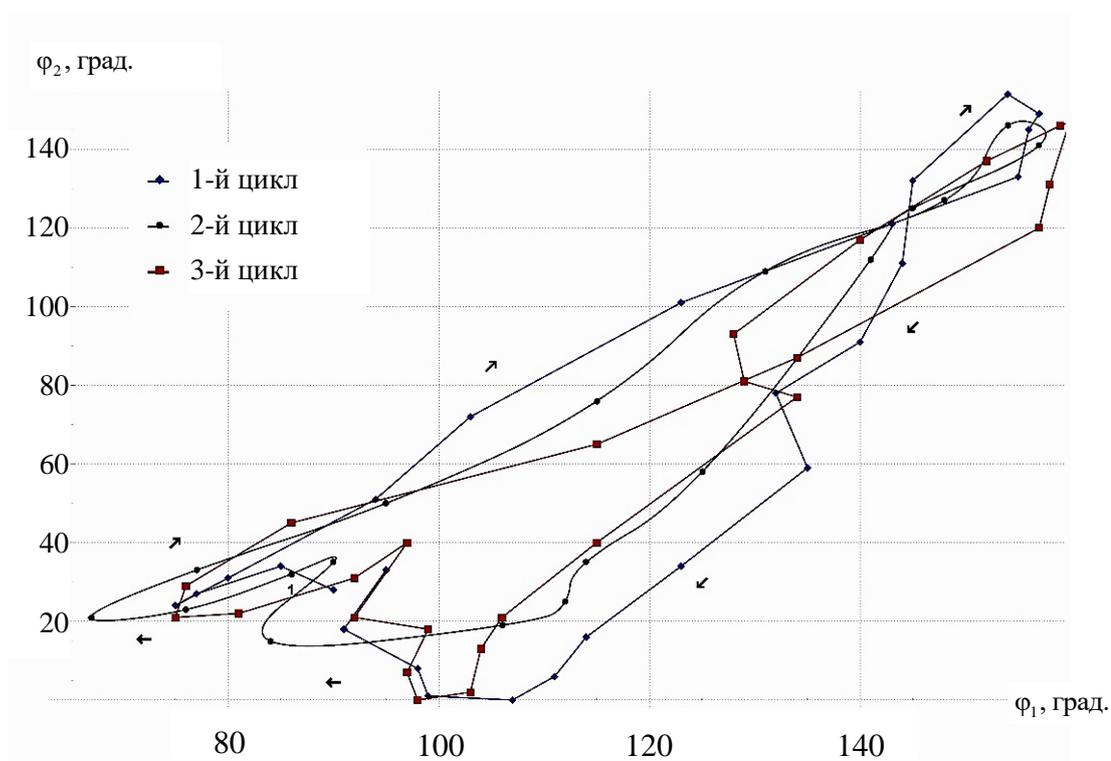


Рис. 8. График зависимости угла φ_2 от угла φ_1 на протяжении трёх циклов «дабл полинга» для одного из рассмотренных спортсменов – Александра Большунова

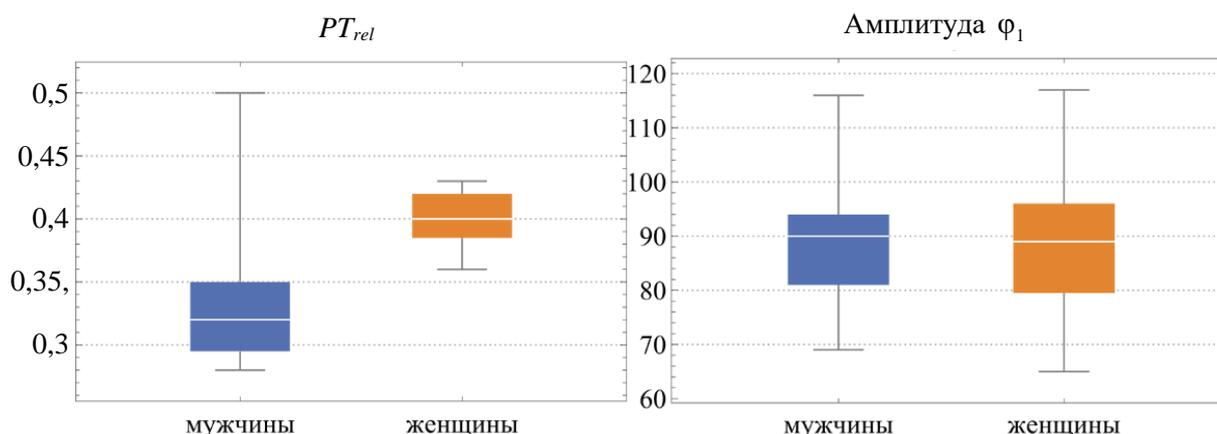


Рис. 9. Диаграммы разброса для значений амплитуды угла ϕ_1 и относительного времени фазы отталкивания PT_{rel} для лыжников мужчин и женщин, использующих технику «дабл полинг»; на диаграммах отмечены медиана, общий и межквартильный размах

ОБСУЖДЕНИЕ

У всех спортсменов разница между циклами варьируется от 4,2 до 19%. Полученный диапазон говорит об очень хорошей повторяемости траектории отдельных суставов тела спортсмена. Следует отметить, что повторяемость в пределах 20% для живых систем является очень хорошим показателем.

Графики изменения углов в суставах в течение циклов «дабл полинга», полученные в данной работе и в работах [9, 10], имеют схожий характер.

В работе [11] также проводилось сравнение техники «дабл полинг» у лыжников мужчин и женщин. Из сопоставленных результатов можно выделить то, что в работе [11] статистически значимыми оказались различия между временем цикла ($P < 0,001$), относительным временем фазы отталкивания ($P < 0,001$) и фазы скольжения ($P < 0,001$) у мужчин и женщин, что согласуется с полученными нами результатами ($P < 0,01$). Кроме того, в работе [11] статистически значимыми были признаны различия в минимуме угла в локтевом суставе в течение фазы отталкивания между мужчинами и женщинами ($P < 0,05$). В нашей работе, учитывая небольшую рассмотренную выборку, этот результат ни подтвердить, ни опровергнуть не удастся. Такое расхождение может быть связано прежде всего с разницей в размере выборок (в данной работе количество $N = 8$, мужчин и женщин 1:1; в работе [11] $N = 80$, мужчин и женщин 1:1). В целом сравнение спортсменов, проходящих различные типы дистанции, допустимо, потому что у элитных спортсменов техника хода сохраняется, как правило, до самого финиша вне зависимости от типа дистанции, однако частота движений определяется именно типом дистанции.

Следует добавить, что в работах [9, 11] лыжников, участвовавших в исследовании, классифицировали на более быстрых и более медленных, и характерные черты более успешных лыжников согласуются между собой в указанных работах. Данная работа не предусматривала подобного разделения, поскольку рассматривались исключительно лыжники элитного уровня – победители и призеры этапов Кубка мира, однако, выделив по одному более быстрому лыжнику и лыжнице, можно отследить закономерности из приведённых исследований. Так, для более быстрых мужчин характерны меньший угол в локтевом суставе во время постановки палок на снег и больший во время отрыва палок, меньшие значения минимума этого же угла во время

фазы отталкивания и более широкий амплитудный диапазон указанного угла, чем у более медленных лыжников мужчин. У более быстрых женщин наблюдаются больший угол в локтевом суставе во время постановки палок и меньший во время отрыва палок и большие значения минимума этого же угла во время фазы отталкивания, чем у более медленных девушек. Для более быстрых лыжников обоих полов характерно то, что фаза отталкивания занимает чуть меньшую часть относительно всего цикла, чем у более медленных лыжников. Эти закономерности кратко представлены в табл. 3 (знаком «+» обозначается большее значение параметра, а знаком «-» – меньшее; знаки без дополнительных меток соответствуют результатам данной работы, с одним штрихом – работе [11], с двумя штрихами – работе [9]; PT_{rel} – относительное время фазы отталкивания, ST_{rel} – относительное время фазы скольжения, φ_1 – угол в локтевом суставе, φ_{1PP} – угол φ_1 в момент постановки палок на снег, φ_{1PO} – угол φ_1 в момент отрыва палок от снега, φ_{1min} – минимальное значение угла φ_1 в течение фазы отталкивания). С результатами данной работы согласуются все закономерности, кроме двух, для более быстрых женщин.

Стоит отметить, что основные тенденции в данных, полученных в настоящей работе, хорошо согласуются с результатами, представленными в литературе.

Таблица 3

Закономерности характеристик движения

Параметр	Женщины		Мужчины	
	Более быстрые	Более медленные	Более быстрые	Более медленные
Время цикла	- -'	+ +'	- -' -''	+ +' +''
Частота цикла	+ +'	- -'	+ +' +''	- -' -''
PT_{rel}	- -'	+ +'	- -' -''	+ +' +''
ST_{rel}	+ +'	- -'	+ +' +''	- -' -''
φ_{1PP}	- +'	+ -'	- -' -''	+ +' +''
φ_{1PO}	- -'	+ +'	+ +'	- -'
φ_{1min}	- +'	+ -'	- -' -''	+ +' +''
Амплитуда φ_1	-	+	+ +''	- -''

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе проведена обработка экспериментальных данных движений плечевого пояса лыжников экспертного уровня при передвижении стилем «дабл полинг». Впервые был выполнен анализ повторяемости циклов движения лыжников относительно углов в суставах, и представлены графики рассмотренных циклов, а также показана хорошая, для биомеханической системы, повторяемость каждого из углов и их сочетаний. Кроме того, в ходе статистического анализа выявлены статистически значимые отличия спортсменов мужчин и женщин ($P < 0,01$). Полученные в ходе работы результаты помогут разработать более корректную модель цифрового двойника лыжника-гонщика, которая позволит осуществить персонафицированное виртуальное прохождение гоночных трасс с целью оптимизации передвижения и достижения высоких спортивных результатов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке гранта Правительства РФ 14.W03.31.0002.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бутков А.Д., Лысенко Е.А., Лемешева Ю.С. Аэробные и скоростно-силовые возможности лыжников в конце подготовительного и начале соревновательного периодов подготовки // Физиология человека. – 2017. – Т. 43, № 3. – С. 57–63.
2. Злит, что Норвегия правит в лыжах и биатлоне? Допинг ни при чем, помогают технологии – в том числе тренажер, о котором мечтает Большунов [Электронный ресурс]. – URL: m.sports.ru/tribuna/blogs/streamofconsciousness/2902660.html?sl=1 (дата обращения: 20.12.2020).
3. Кошмарь А.В., Воронков А.В., Никитин М.В. Использование монитора сердечного ритма в процессе подготовки квалифицированных лыжников-гонщиков // Дискурс. – 2017. – Т. 9, № 7. – С. 41–47.
4. Кузнецова И.А., Шапов Е.В. Специальная работоспособность лыжников-гонщиков 16–17 лет при одновременном бесшажном ходе // Наука и спорт: современные тенденции. – 2017. – Т. 16, № 3. – С. 27–32.
5. Малеев Д.О., Потапов В.Н., Литвин С.В. Применение средств искусственной гипоксии в подготовке лыжников-гонщиков высоких спортивных разрядов на основе индивидуализации тренировочных нагрузок // Вестник Тюменского государственного университета. Гуманитарные исследования. Humanitates. – 2017. – Т. 3, № 2. – С. 260–271.
6. Плоская численная модель лыжника [Электронный ресурс]. – URL: youtu.be/YkXhygBijq0 (дата обращения: 20.12.2020).
7. Самсонова А.В., Комиссарова Е.Н. Биомеханика мышц: учебно-методическое пособие. – СПб.: Изд-во СПбГУФК им. П. Ф. Лесгафта, 2008. – 127 с.
8. Шапов Е.В. Оценка функциональных возможностей мышц плечевого пояса лыжников с использованием *WeMeMove* // Проблемы совершенствования физической культуры, спорта и олимпизма. – 2016. – № 1. – С. 242–247.
9. Holmberg H.-C., Lindinger S., Stöggl T., Eitzmair E., Müller E. Biomechanical analysis of double poling in elite cross-country skiers // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 2005. – Vol. 37, no. 5. – P. 807–818.
10. Holmberg L.J., Lund A.M. A musculoskeletal full-body simulation of cross-country skiing // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. – 2008. – Vol. 222. – P. 11–22.
11. 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 Science*. – 2019. – Vol. 37, no. 14. – P. 1582–1590.
12. Kuroda S., Kunita I., Tanaka Y. Common mechanics of mode switching in locomotion of limbless and legged animals // *Journal of the Royal Society Interface*. – 2014. – Vol. 11. – P. 3–24.
13. Laursen P.B., Jenkins D.G., The scientific basis for high-intensity interval training // *Sports Medicine*. – 2002. – Vol. 32, no. 1. – P. 53–73.
14. McMahon T.A. Mechanics of locomotion // *The International Journal of Robotics Research*. – 1984. – Vol. 3, no. 2. – P. 4–28.
15. Mishica C. Ski economy and physiological responses while double poling: curved vs. straight poles: Master's Thesis in Exercise Physiology. – Jyväskylä, 2015. – 57 p.
16. Morrison J.B. The mechanics of muscle function in locomotion // *Journal of Biomechanics*. – 1970. – Vol. 3. – P. 431–451.
17. Nilsson J.E., Holmberg H.-C., Tveit P. Effects of 20-s and 180-s double poling interval training in cross-country skiers // *European Journal of Applied Physiology*. – 2004. – Vol. 92. – P. 121–127.
18. Øfsteng S., Sandbakk Ø., Beekvelt M.V. Strength training improves double poling performance after prolonged submaximal exercise in cross-country skiers // *Scandinavian Journal of Medicine & Science in Sports*. – 2018. – Vol. 28. – P. 893–904.
19. Stöggl T., Holmberg H.-C. Double-poling biomechanics of elite cross-country skiers: flat versus uphill terrain // *Medicine & Science in Sports & Exercise*. – 2016. – Vol. 48, no. 8. – P. 1580–1589.
20. Wiggen Ø.N. The effects of cold environments on double-poling performance and economy in male cross-country skiers wearing a standard racing suit // *International Journal of Sports Physiology and Performance*. – 2015. – Vol. 11. – P. 776–782.

STUDY OF THE DOUBLE POLING KINEMATICS OF ELITE CROSS-COUNTRY SKIERS

A.E. Kubyak, D.V. Parshin (Novosibirsk, Russian Federation)

Highly skilled cross-country skiers often prefer the double poling technique due to its speed and versatility. This work is aimed at developing a biomechanical model of a skier using the double poling technique. To do this, using video recordings of the competition, experimental data of eight elite-level athletes (four male and four female) were prepared and analyzed, who used the indicated technique while passing the distance. The analysis made it possible to determine the dependence of the angles in some joints on time, as well as to assess the repeatability of the double poling movement from cycle to cycle. As a result, the main control parameters were identified by which the skier regulates the pace of his movement along the track and the geometric characteristics important for modeling. Statistically significant differences in technique for male and female are shown ($P < 0,01$), which is extremely important in the development of personalized models of movement. The conclusions drawn will contribute to the correctness of the construction of a mathematical model of double poling biomechanics.

Key words: biomechanics of movements, double poling, interpolation, skiing technique, video processing.

Получено 24 декабря 2020