



Научная статья

DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2023.4.12

УДК 531/534: [57+61]

БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СТАТИКИ И ПОХОДКИ ПАЦИЕНТОВ С ПАТЕЛЛОФЕМОРАЛЬНЫМ БОЛЕВЫМ СИНДРОМОМ

В.О. Сушин¹, Н.Н. Рукина¹, А.Н. Кузнецов¹, А.Н. Белова¹, О.В. Воробьева¹,
А.Д. Бутченко¹, Е.А. Дудоров²

¹ Приволжский исследовательский медицинский университет, Нижний Новгород, Россия

² «Научно-производственное объединение «Андроидная техника», Москва, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 22 сентября 2023

Одобрена: 03 декабря 2023

Принята к публикации: 05 декабря 2023

Ключевые слова:

пателлофemorальный болевой синдром, биомеханика, ходьба, реабилитация

АННОТАЦИЯ

Пателлофemorальный болевой синдром (ПФБС) – это патология в области коленного сустава, которая часто наблюдается у молодых спортсменов и проявляется болью в области колена и периартикулярных тканей при исключении внутрисуставной патологии коленного сустава. В статье представлены результаты биомеханического исследования статики и ходьбы 47 пациентов с ПФБС и 34 здоровых лиц. Выявлены достоверные различия ряда гониометрических показателей у пациентов и у здоровых лиц при ходьбе. Продемонстрировано, что при ПФБС нарушения биомеханики касаются обеих нижних конечностей. Показано, что выраженность биомеханических нарушений при ходьбе может служить предиктором эффективности консервативной терапии ПФБС.

© ПНИПУ

Введение

Пателлофemorальный болевой синдром (ПФБС) характеризуется наличием боли в области колена и периартикулярных тканей при исключении внутрисуставной патологии коленного сустава [15, 20, 32, 35, 36]. ПФБС является наиболее частой причиной боли в области коленного сустава у физически активных молодых людей

и значительно нарушает их жизнедеятельность [7, 10, 18–21, 23, 33, 34, 41]. Оптимальная стратегия управления болью при ПФБС напрямую зависит от изменений кинематики туловища и нижних конечностей, возникающих при ПФБС [4–6, 8, 11, 23, 29, 39, 42]. Однако, несмотря на многочисленность биомеханических исследований, их результаты носят в основном описательный характер; остается неясным, присутствуют ли данные нарушения

© Сушин Вильям Олегович – ассистент кафедры медицинской реабилитации, врач физической и реабилитационной медицины отделения ранней медицинской реабилитации, e-mail: sushin.nn@mail.ru ID: 0000-0003-2346-7810

© Рукина Наталья Николаевна – к.м.н., старший научный сотрудник отделения функциональной диагностики, e-mail: rukinann@mail.ru ID: 0000-0002-0719-3402

© Кузнецов Алексей Николаевич – младший научный сотрудник отделения функциональной диагностики, e-mail: metall.su@mail.ru ID: 0000-0003-1889-1297

© Белова Анна Наумовна – д.м.н., профессор, заведующая кафедрой медицинской реабилитации, e-mail: anbelova@mail.ru ID: 0000-0001-9719-6772

© Воробьева Ольга Викторовна – младший научный сотрудник отделения функциональной диагностики, e-mail: olgvyshka1@yandex.ru ID: 0000-0001-7225-8842

© Бутченко Артем Дмитриевич – лаборант отделения функциональной диагностики, e-mail: Ya@abutchenko.ru

© Дудоров Евгений Александрович – к.т.н., исполнительный директор, e-mail: dudorov@npo-at.ru



еще до появления ПФБС, становясь причиной его развития, либо являются следствием болевого синдрома [6, 14, 16, 17, 24, 25]. Возможно, это связано с ограничениями исследований, в том числе, с небольшими размерами выборок, редким использованием методики видеозахвата движений [6]. В итоге остаются неучтенными те функциональные факторы, которые могут влиять на эффективность реабилитации и устойчивость ее результатов [9, 22, 27, 30, 31, 37]. Современные технологии биомеханического анализа движений открывают новые возможности изучения двигательных нарушений при ПФБС [1, 12, 26, 38].

Цель нашего исследования – выявление специфических биомеханических паттернов изменения статики и походки у пациентов с ПФБС и их влияния на эффективность медицинской реабилитации.

Материалы и методы исследования

На базе Университетской клиники ФГБОУ ВО «ПИМУ» Минздрава России (г. Н. Новгород) было обследовано 47 профессиональных спортсменов и спортсменов-любителей с пателлофemorальным болевым синдромом (ПФБС), среди них 20 юношей и 27 девушек (медиана возраста 16 {14,5; 17}), а также 34 здоровых человека (14 юношей и 20 девушек, медиана возраста 17 {16, 17}), составивших группу сравнения.

В группу пациентов включались лишь те лица, у которых диагноз ПФБС был установлен на основании клинической картины и ортопедического обследования, выраженность боли по визуальной аналоговой шкале боли (ВАШ) составляла ≥ 3 баллов, имелись функциональные нарушения в виде ограничений способности к бегу, прыжкам, ходьбе по лестнице. Критериями исключения из исследования являлось наличие на протяжении предшествующих 6 месяцев любого заболевания, способного вызывать схожие с ПФБС симптомы (значимые повреждение менисков, связок сустава, повреждение межпозвоночных дисков, переломы костей нижних конечностей, другие травмы и переломы нижних конечностей, включая оперативные вмешательства на коленном суставе в анамнезе, и т.д.). Поражение правого коленного сустава наблюдался у 23, левого – у 24 человек. Давность заболевания у пациентов с ПФБС составляла от 2 до 72 месяцев (медиана составила 18 {10,5; 24}). Степень выраженности болевого синдрома варьировала от 3 до 10 баллов по шкале ВАШ (медиана составила 7 {6; 8}).

Курс двухнедельной реабилитации проводился в амбулаторных условиях и включал индивидуальные занятия кинезотерапией, процедуры фонофореза с гидрокортизоном на область пораженного сустава и сеансы мио-релаксирующего массажа. Затем пациенты продолжали ежедневные занятия лечебной физкультурой в домашних условиях, согласно рекомендациям лечащего врача. Результат реабилитации оценивали спустя 3 месяца после начала медицинской реабилитации. Критериями эффективной реабилитации являлись полный регресс

болевого синдрома и восстановление мобильности, отсутствие рецидива на протяжении периода катamnестического наблюдения.

Пациентам с ПФБС до начала реабилитационных мероприятий и здоровым лицам из группы сравнения проводилось биомеханическое обследование опорно-двигательного аппарата при стоянии и ходьбе на системе *DIERS Formetric 4D motion Lab High Performance*, которая благодаря комбинации измерительных модулей позволяет одновременно регистрировать давление стоп на опорную поверхность и движения позвоночника, таза и нижних конечностей в различных плоскостях [13]. Для проведения обследования обследуемому предлагалось раздеться до трусов и носков. На тело в проекции анатомических образований наклеивались маркеры, отражавшие инфракрасный свет. Далее обследуемый вставал на специальную дорожку, где производилось исследование стоя и во время ходьбы.

Во время статической диагностики обследуемый стоял, стараясь распределять вес равномерно на обе ноги на стабилметрической платформе, расстояние между стопами составляет 10–15 см. В этом положении проводились стабилметрия и видеонализ движений с боковых и задней камер. Оценивались следующие параметры: положение общего центра массы стоящего человека и его микродвижения во фронтальной и сагитальной плоскостях при стоянии, углы сгибания/разгибания в тазобедренных, коленных и голеностопных суставах, угол вальгусного/варусного положения коленного сустава, наклон таза. После статического исследования обследуемый отдыхал в положении сидя в течение 5 минут.

Во время *динамической диагностики* обследуемый шел по беговой дорожке с фиксированной скоростью 2,5 км/ч в течение 10 секунд (указанная скорость была выбрана эмпирическим путем как наиболее комфортная для пациентов с ПФБС). Производилась видеорегистрация движений суставов нижних конечностей и таза, регистрировалось распределение нагрузок под стопами при перемещении по опорной поверхности. Оценивались параметры подографические (скорость ходьбы, длительность цикла шага, периодов опоры и переноса, коэффициент ритмичности ходьбы, угол разворота стопы) и гониометрические (угол наклона таза, углы движений в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах, вальгусное или варусное положение коленного сустава во время ходьбы).

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием программного обеспечения *MS Excel* и *Jupyter Notebook*. Проверка нормальности распределения количественных признаков проводилась с использованием критерия Шапиро–Уилка. Для сравнения показателей группы пациентов с ПФБС и группы здоровых лиц при нормальном распределении использовался одновыборочный *t*-критерий Стюдента, при непарметрическом распределении – одновыборочный критерий Вилкоксона. Для сравнения групповых значений показателей здоровой и больной конечностей у пациентов с ПФБС в случае

нормального распределения признаков использовался *t*-критерий Стьюдента для связанных выборок, при непараметрическом распределении применялся ранговый критерий Вилкоксона для связанных выборок. Данные о центральных тенденциях представлены в формате $M \pm SD$ и $Me [Q1; Q3]$. Для определения однородных по биомеханическим показателям подгрупп пациентов использовался кластерный анализ Уорда (*Ward's method*). Для выявления связи между двумя переменными в небольшой выборке применялся точный критерий Фишера.

Результаты численных расчетов

Биомеханические параметры пациентов с ПФБС в положении стоя в сравнении со здоровыми лицами

Параметры статики пациентов с ПФБС и здоровых лиц представлены в табл. 1. Результаты, полученные у здоровых лиц, были сопоставимы с нормативными данными здоровой популяции, представленными в

литературе [3]. Статистически достоверные различия между пациентами с ПФБС и группой здоровых лиц были получены по следующим показателям: наличие вальгусного положения коленного сустава во фронтальной плоскости как у больной, так и у «здоровой» конечности, увеличение углов сгибания в тазобедренном и коленном суставах. Угол сгибания коленного сустава со стороны больной конечности был несколько большим, чем со стороны «здоровой».

У пациентов с ПФБС в сравнении со здоровыми лицами наблюдалась тенденция к уменьшению нагрузки на стопу больной конечности (без изменения распределения нагрузки на передние и задние отделы стопы), уменьшению угла сгибания в голеностопном суставе больной конечности, увеличению угла разворота стопы со стороны больной конечности, однако различия указанных показателей между группами ПФБС и группой здоровых лиц не достигли уровня статистической значимости.

Таблица 1

Сравнение биомеханических параметров здоровой и больной конечностей в группах ПФБС и здоровых лиц в положении стоя

Параметр	Группа здоровых лиц ¹ (n = 34)	Группа ПФБС, здоровая конечность (n = 47)		Группа ПФБС, больная конечность (n = 47)	
	Me {Q1; Q3}	Me {Q1; Q3}	p	Me {Q1; Q3}	p
Возраст, лет	17 {16; 17}	16 {14,5; 17}	0,01	16 {14,5; 17}	0,01
Нагрузка передних отделов стоп, % от веса	47,5 {39; 55}	43 {37; 53}	0,496	43 {37; 53}	0,496
Нагрузка задних отделов стоп, % от веса	52,5 {45; 61}	57 {47; 63}	0,496	57 {47; 63}	0,496
Боковой перекос таза, мм	2 {1; 3}	2 {1; 4}	0,929	2 {1; 4}	0,929
Движение центра масс вперед, мм	5 {3; 7}	5 {4; 7}	0,457	5 {4; 7}	0,457
Движение центра масс назад, мм	5 {4; 7,2}	5 {3,5; 7,5}	0,993	5 {3,5; 7,5}	0,993
Боковое движение центра масс, мм	3 {2; 5,25}	3 {2; 5}	0,842	4 {2; 6}	0,749
Нагрузка на стопу, % от веса	50 {48; 52}	51 {47; 54}	0,417	50 {46; 52,5}	0,429
Разворот стопы град.	8 {3; 12}	6 {4,5; 11,5}	0,844	7 {4; 9}	0,513
Угол КС во фронтальной плоскости VALGUS(+) VARUS(-), град.	3 {2; 5}	-2 {-4; 1}	0,001*	-2 {-4; 0}	0,001*
ТБС Флексия, град.	0 {0; 0}	3 {1,8; 4}	0,001*	3 {1,8; 4}	0,001*
КС Флексия, град.	1 {0; 4}	4 {1; 7}	0,001*	5 {2,5; 7,5}	0,001*
ГС Флексия, град.	3 {2; 6}	3 {1; 5}	0,46	3 {1,5; 5}	0,356

Примечание: ¹ представлены усредненные по правой и левой конечностям показатели; * – значимые различия между показателем здоровых лиц (локальная норма) и пациентов с ПФБС, $p \leq 0,05$; ТБС – тазобедренный сустав, КС – коленный сустав, ГС – голеностопный сустав.

Биомеханические параметры пациентов с ПФБС во время ходьбы в сравнении со здоровыми лицами

Параметры ходьбы у пациентов с ПФБС и здоровых лиц представлены в табл. 2. Результаты, полученные у здоровых лиц, были сопоставимы с нормативными данными здоровой популяции, представленными в литературе [2, 3], несмотря на то, что заданная скорость ходьбы (2,5 км/ч) была ниже, чем обычно у здоровых лиц. Временные параметры ходьбы у пациентов с ПФБС (длительность опорной и переносной фаз цикла шага, коэффициент ритмичности ходьбы) у пациентов с ПФБС и у здоровых лиц практически не различались. В то же время у пациентов с ПФБС отмечалось статистически значимые изменения гониометрических параметров ходьбы, причем эти различия касались как «больной», так и «здоровой» конечности: угол разгибания в тазобедренном суставе в группе ПФБС оказался значимо меньше, а углы сгибания в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах – значимо больше, чем в группе здоровых лиц. Кроме того, значимо различалось положение коленного сустава во фронтальной плоскости (у пациентов с ПФБС

угол коленного сустава при ходьбе соответствовал вальгусному положению колена, тогда как в группе здоровых – варусному положению).

При сравнении здоровой и больной конечности у пациентов с ПФБС обнаружено только одно значимое различие ($p = 0,048$) по показателю экстензия ТБС при ходьбе (рис. 1). При этом угол разгибания в данном суставе на здоровой ноге оказался достоверно больше, чем на больной.

Нами была выдвинута гипотеза о том, что реабилитационный прогноз у пациентов с ПФБС может быть различным (благоприятным или неблагоприятным) в зависимости от исходных особенностей биомеханики походки. Для подтверждения данной гипотезы был проведен кластерный анализ биомеханического обследования пациентов с ПФБС методом Уорда (*Ward's method*) [28, 40]. Данный анализ позволил выделить две значимо различающиеся между собой подгруппы: кластер 0 ($n = 35$) и кластер 1 ($n = 12$). Пациенты этих кластеров имели ряд значимых различий по биомеханическим показателям здоровой и больной конечностям при ходьбе (табл. 3, рис. 2–4). Коэффициент ритмичности

Таблица 2

Сравнение биомеханических параметров здоровой и больной конечностей в группах ПФБС и здоровых лиц при ходьбе

Параметр	Группа здоровых лиц ¹ ($n = 34$)	Группа ПФБС, здоровая конечность ($n = 47$)		Группа ПФБС, больная конечность ($n = 47$)	
	Me {Q1; Q3}	Me {Q1; Q3}	p	Me {Q1; Q3}	p
Возраст, лет	17 {16; 17}	16 {14,5; 17}	0,01	16 {14,5; 17}	0,01
Скорость ходьбы, км\ч	2,5 {2,5; 3}	2,5 {2,5; 3}	0,139	2,5 {2,5; 3}	0,139
КР	0,9 {0,9; 1}	1 {0,9; 1}	0,734	1 {0,9; 1}	0,734
ПО, %ЦШ	65 {64; 67}	65 {64; 67}	0,776	66 {64; 67}	0,998
ПП, %ЦШ	35 {33; 36}	35 {33; 36}	0,856	34 {33; 36}	0,995
ТБС Экстензия, град.	14 {12; 16}	11 {9; 13}	0,001*	12 {11; 13,5}	0,001*
ТБС Флексия, град.	21 {18; 22}	24 {21; 26}	0,001*	23 {21; 25}	0,001*
КС Экстензия, град.	1 {0; 2}	1 {0; 3}	0,875	1 {0; 5}	0,372
КС Флексия, град.	56 {54; 59}	59 {54,5; 62}	0,017 *	58 {54,5; 61}	0,043*
ГС Экстензия (дорсофлексия), град.	21 {15; 25}	19 {14,5; 25}	0,378	20 {15; 24}	0,596
ГС Флексия, град.	4 {1,8; 8}	7 {4; 12}	0,002*	6 {3,5; 10}	0,007*
Угол КС во фронтальной плоскости VALGUS(+) VARUS(-), град.	2 {-5; 5,2}	4 {3; 6}	0,012*	4 {1,5; 8}	0,001*
Разворот стопы, град.	5,5 {1; 9}	6 {3; 9}	0,418	5 {3; 8,5}	0,882
Наклон таза, град.	4 {2; 5}	4 {2; 6}	0,961	4 {2; 6}	0,383

Примечание: ¹ представлены усредненные по правой и левой конечностям показатели; * – значимые различия между показателем здоровых лиц (локальная норма) и пациентов с ПФБС, $p \leq 0,05$; КР – коэффициент ритмичности ходьбы, ПО – период опоры, ПП – период переноса, ТБС – тазобедренный сустав, КС – коленный сустав, ГС – голеностопный сустав

Таблица 3

Сравнение показателей здоровой и больной конечности при ходьбе в группе нормы и кластерах 0,1 пациентов с ПФБС

Параметр	Группа нормы	Здоровая конечность				Больная конечность			
		Кластер 0 – здоровая конечность (n = 35)	Кластер 1 – здоровая конечность (n = 12)	Значимость различия		Кластер 0 – больная конечность (n = 35)	Кластер 1 – больная конечность (n = 12)	Значимость различия	
				Кластер 0 – норма	Кластер 1 – норма			Кластер 0 – норма	Кластер 1 – норма
	Me {Q1; Q3}	Me {Q1; Q3}	Me {Q1; Q3}	p	p	Me {Q1; Q3}	Me {Q1; Q3}	p	p
Возраст	17 {16; 17}	16 {14,5; 17}	16 {14,5; 16,2}	0,001*	0,561	16 {14,5; 17}	16 {14,5; 16,2}	0,001*	0,561
Скорость ходьбы км\ч	2,5 {2,5; 3}	2,5 {2,5; 2,8}	2,5 {2,5; 3}	0,124	0,626	2,5 {2,5; 2,8}	2,5 {2,5; 3}	0,124	0,626
KP	0,9 {0,9; 1}	1 {0,9; 1}	0,7 {0,7; 0,9}	0,271	0,001*	1 {0,9; 1}	0,7 {0,7; 0,9}	0,271	0,001*
ПО, %ЦШ	65 {64; 67}	66 {64; 67}	64 {48; 65,5}	0,608	0,065	66 {65; 67}	65 {59; 66}	0,519	0,218
ПП, %ЦШ	35 {33; 36}	34 {33; 35,5}	36 {34,5; 52,2}	0,511	0,087	34 {33; 35}	35 {34; 41}	0,529	0,215
ТБС Экстензия, град.	14 {12; 16}	10 {9; 12,5}	12,5 {10,5; 13,2}	<0,001*	0,294	12 {11; 13,5}	12,5 {10,8; 13,5}	<0,001*	0,648
ТБС Флексия, град.	21 {18; 22}	25 {22,5; 27}	21 {18,8; 22,2}	<0,001*	0,93	24 {22; 25}	19,5 {16,8; 21,2}	<0,001*	0,342
КС Экстензия, град.	1 {0; 2}	1 {0; 3,5}	0 {0; 1}	0,362	0,158	1 {0; 4,5}	0 {0; 5}	0,241	0,868
КС Флексия, град.	56 {54; 59}	60 {57; 62,5}	54 {50,5; 55}	<0,001*	0,027	59 {57; 61}	52 {48; 56}	<0,001*	0,021
ГС Экстензия, град.	21 {15; 25}	22 {17; 26,5}	14 {10,5; 16}	0,643	0,002*	22 {17; 27}	14,5 {12; 17,2}	0,417	0,001*
ГС Флексия, град.	4 {1,8; 8}	7 {3,5; 12,5}	5 {4; 10}	0,004*	0,075	7 {3; 10}	6 {5,8; 9,2}	0,024	0,046
Угол КС VALGUS(+) VARUS(-), град.	2 {-5; 5,2}	4 {2,5; 6}	5 {4; 7,8}	0,056	0,027	3 {-1; 7,5}	6 {2; 8}	0,063	0,179
Разворот стопы, град.	5,5 {1; 9}	6 {3; 11}	5,5 {2,5; 7}	0,278	0,861	6 {3; 9,5}	3 {1,8; 6,2}	0,512	0,362
Наклон таза, град.	4 {2; 5}	4 {2; 7}	2,5 {1; 3,2}	0,295	0,032	5 {2; 6}	4 {3; 4,5}	0,399	0,668

Примечание: * – значимые различия на уровне $p \leq 0,016$ (с учетом поправки Бонферрони); КР – коэффициент ритмичности ходьбы, ПО – период опоры,

ПП – период переноса, ТБС – тазобедренный сустав, КС – коленный сустав, ГС – голеностопный сустав

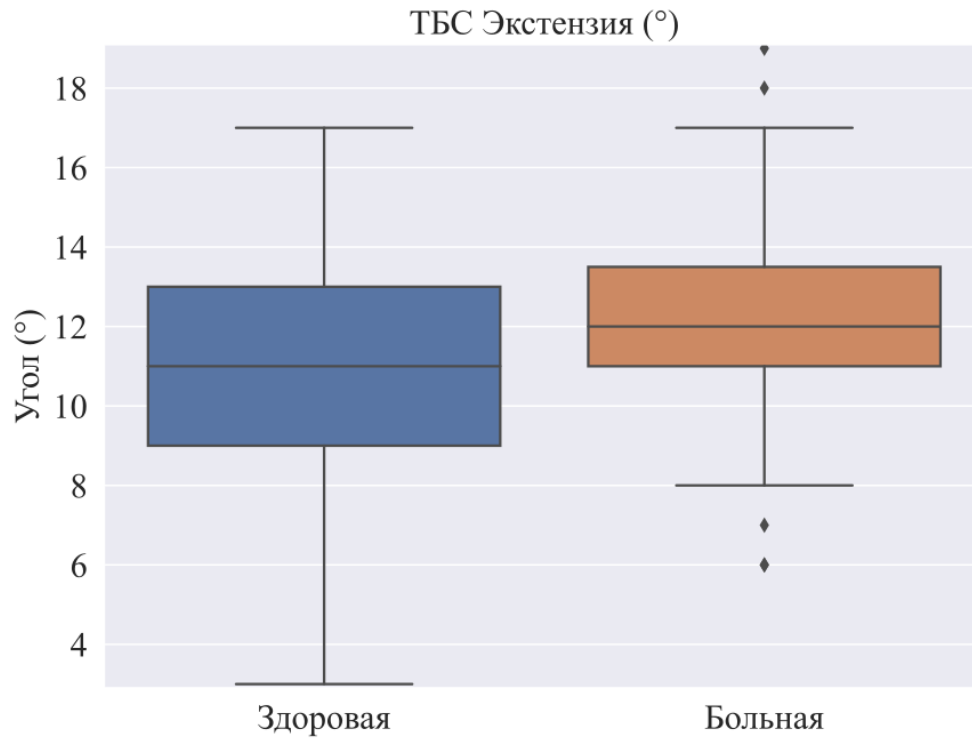


Рис. 1. Угол разгибания в тазобедренном суставе здоровой и больной конечности пациентов с ПФБС во время ходьбы: медианы с указанием квартильных интервалов (цветные прямоугольники) и доверительных интервалов («усы») углов разгибания в тазобедренных суставах пациентов с ПФБС ($n = 47$); ТБС – тазобедренный сустав, угол, (градусы) – угол разгибания (градусы)

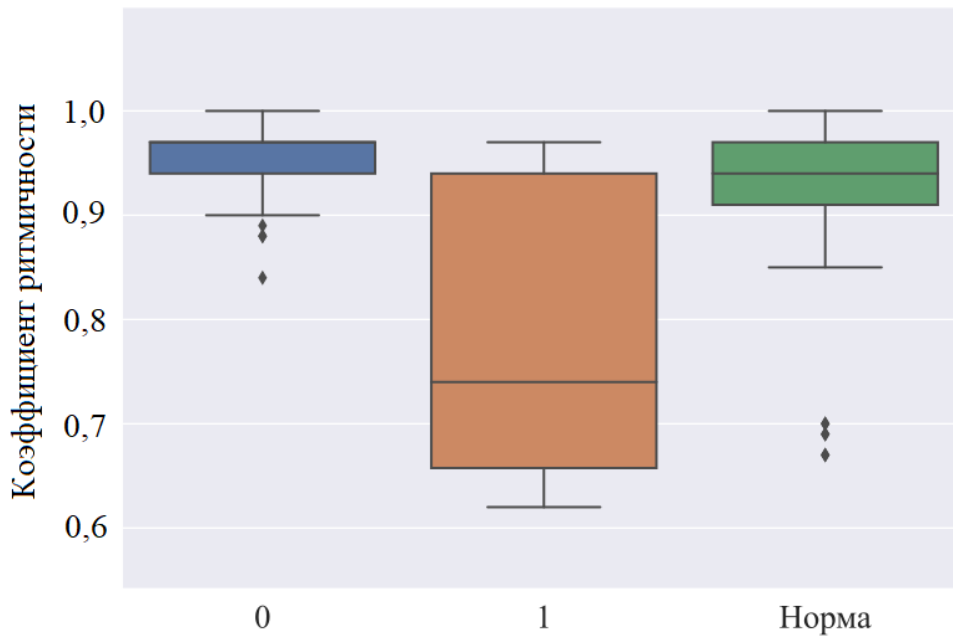


Рис. 2. Коэффициенты ритмичности при ходьбе: медианы с указанием квартильных интервалов (цветные прямоугольники) и доверительных интервалов («усы») коэффициентов ритмичности при ходьбе здоровых лиц ($n = 34$) и пациентов с ПФБС в кластерах 0 ($n = 35$) и 1 ($n = 12$), КР – коэффициент ритмичности, коэффициент – значение коэффициента ритмичности, норма – показатель группы здоровых лиц

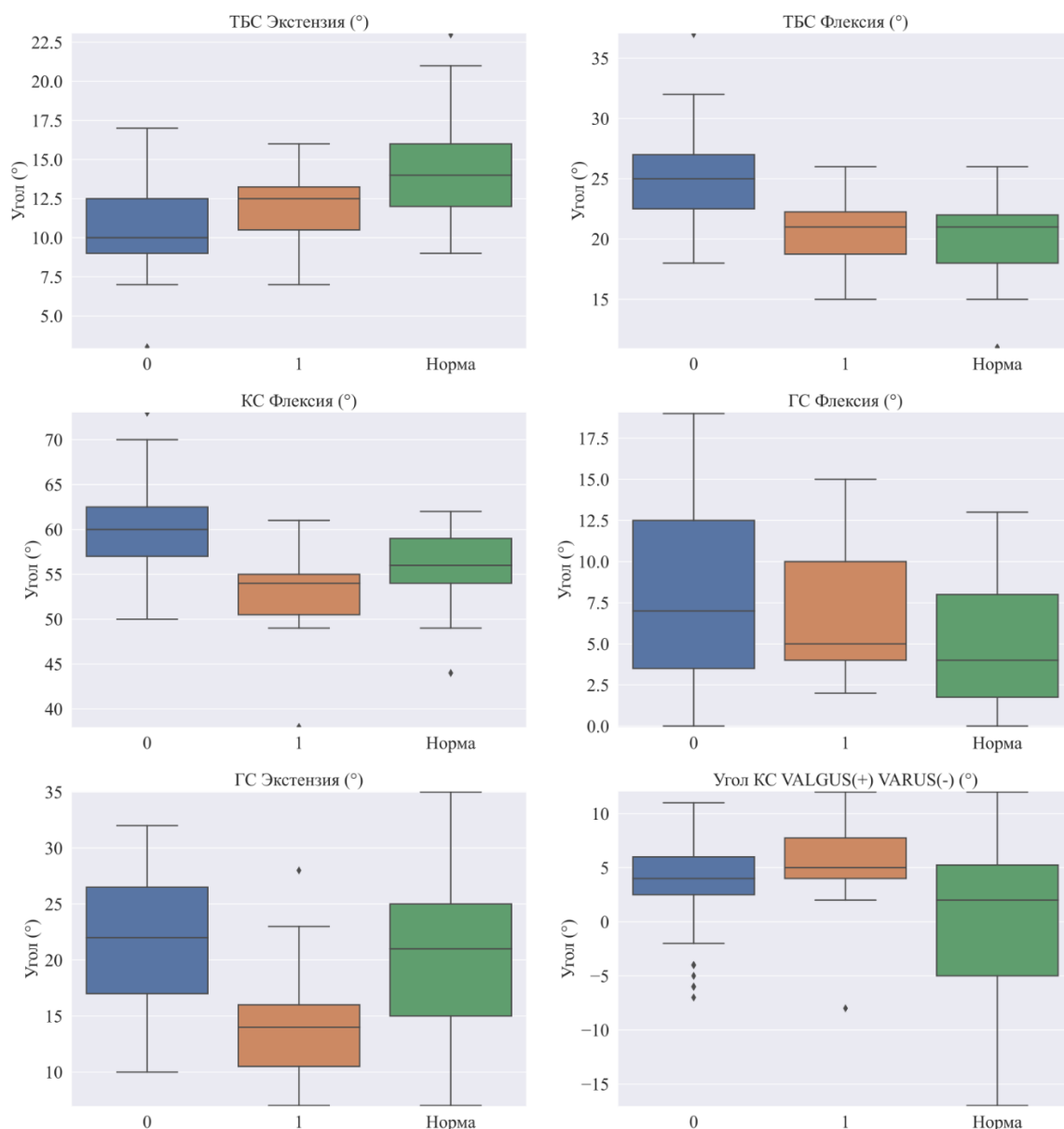


Рис. 3. Показатели здоровой конечности пациентов с ПФ при ходьбе: медианы с указанием межквартильных интервалов (цветные прямоугольники) и доверительных интервалов («усы») показателей здоровой нижней конечности пациентов с ПФБС в кластерах 0 ($n = 35$) и 1 ($n = 12$), и усредненные показатели правой и левой нижних конечностей группы здоровых лиц ($n = 34$) при ходьбе ТБС – тазобедренный сустав, КС – коленный сустав, ГС – голеностопный сустав, угол, (градусы) – угол разгибания (градусы)

в кластере 0 был сопоставим с показателями здоровых лиц, в то время как в кластере 1 медианное значение и межквартильный интервал оказались существенно ниже нормального диапазона и показателей кластера 0 (см. рис. 2). Углы сгибания в тазобедренном и коленном суставах как больной, так и здоровой конечностей в кластере 0 даже превышали значения локальной нормы, но соответствовали литературной норме [1], в то время как в кластере 1 медианное значение и межквартильный интервал этого показателя и на здоровой, и на больной ноге оказались достоверно меньше, чем у здоровых и у пациентов кластера 0. Угол разгибания (дорсофлексии) в голеностопном суставе в кластере 0 был сопоставим с показателями локальной нормы, в то время как в кластере

1 – значимо ниже нормы и ниже значений, полученных в кластере 0. В целом, биомеханические показатели пациентов кластера 0 были значительно ближе к локальной/литературной норме, чем показатели пациентов из кластера 1 (см. рис. 3–4).

Сравнительный анализ клинично-демографических показателей кластеров 0 и 1, выполненный точным методом Фишера, не выявил достоверных различий между группами по возрасту, полу, исходной выраженности болевого синдрома, видам спорта, которыми занимались пациенты. Пациенты кластера 1 имели более длительный анамнез заболевания, однако различия с кластером 0 по давности ПФБС не достигали уровня статистической достоверности. При этом анализ продемонстрировал

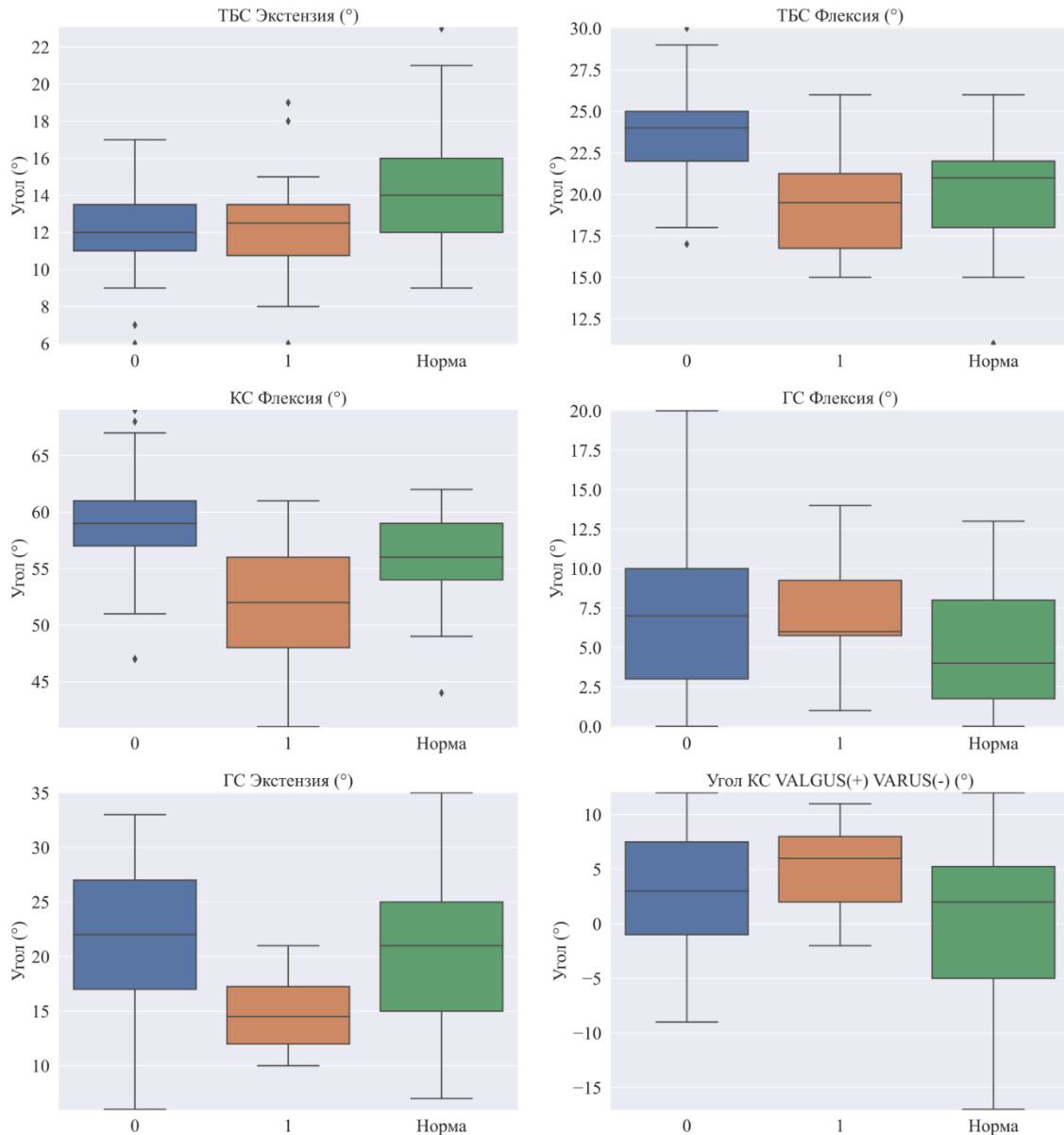


Рис. 4. Показатели больной конечности пациентов с ПФ при ходьбе: медианы с указанием межквартильных интервалов (цветные прямоугольники) и доверительных интервалов («усы») показателей здоровой нижней конечности пациентов с ПФБС в кластерах 0 ($n = 35$) и 1 ($n = 12$), и усредненные показатели правой и левой нижних конечностей группы здоровых лиц ($n = 34$) при ходьбе; ТБС – тазобедренный сустав, КС – коленный сустав, ГС – голеностопный сустав, угол, (градусы) – угол разгибания (градусы)

достоверные различия между кластерами по достигнутым результатам реабилитации. Реабилитация оказалась эффективной у 27 пациентов (77%) из кластера 0 и у 3 пациентов (25%) из кластера 1, при этом три пациента из кластера 1 ввиду неэффективности консервативной терапии были направлены на оперативное лечение.

Обсуждение

Биомеханические исследования при ПФБС касаются как статики пациентов, так и их походки. При этом, как продемонстрировал мета-анализ биомеханических данных (28 исследований, 679 пациентов), показатели пострального контроля (устойчивости вертикальной

позы) при ПФБС значимо не изменяются [31]. Наши данные также не выявили различий в смещении центра массы тела у пациентов с ПФБС в сравнении со здоровыми лицами. Однако было показано, что пациенты с

ПФБС при стоянии несколько разгружают страдающую конечность, сгибают коленный и тазобедренный суставы, увеличивают угол разворота стопы. Вероятно, данные изменения являются защитной реакцией, направленной на уменьшение вертикальной нагрузки на страдающий коленный сустав. В целом, однако, показатели статики у пациентов с ПФБС оказались малоинформативными в отношении выявления различий со здоровыми людьми.

Значительно больше различий между пациентами

и здоровыми лицами было выявлено при анализе биомеханики походки. Метаанализ 55 биомеханических исследований у лиц с ПФБС (всего 1300 обследованных) показал, что у пациентов с ПФБС снижается скорость ходьбы, происходит снижение длины шага и наклон таза в контралатеральную сторону, уменьшаются угол сгибания в коленном суставе и максимальный момент сил мышц-разгибателей ноги в коленном суставе [6]. Наши данные подтверждают, что комфортная скорость ходьбы пациентов с ПФБС оказалась ниже, чем у здоровых людей. У пациентов с ПФБС углы коленных суставов при ходьбе соответствовали вальгусному положению, тогда как в группе здоровых – варусному положению. Длительность опорной и переносной фаз цикла шага у пациентов с ПФБС не отличалась от локальной нормы, но у пациентов, согласно усредненным показателям, уменьшался угол разгибания в тазобедренном суставе и значимо увеличивались углы сгибания в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах; причем это касалось как больной, так и здоровой конечностей. Отличие больной конечности от здоровой заключалось лишь в достоверно более низком угле разгибания в ТБС на стороне болевого синдрома. Можно предположить, что такие изменения гониометрических параметров у пациентов с ПФБС являются компенсаторными и направлены на уменьшение болевого синдрома при ходьбе.

Следует отметить, что пациенты с ПФБС оказались достаточно неоднородными по своим биомеханическим показателям. Кластерный анализ позволил выделить два значимо различавшихся между собой кластера, из которых более многочисленный кластер 0 (35 пациентов) имел биомеханические показатели, в

значительно большей степени приближенные к значениям локальной/литературной нормы, чем в кластере «1», состоявшем из 12 пациентов. У пациентов кластера 1, в отличие от кластера 0, нарушалась ритмичность ходьбы, что могло свидетельствовать о том, что пациенты «щадят» больную конечность. Диапазоны движения в крупных суставах нижних конечностей в кластере 1 были значимо снижены в сравнении с нормативными данными как на больной, так и на здоровой стороне, что свидетельствует о том, что при ПФБС изменения биомеханики касаются обеих нижних конечностей

Медицинская реабилитация пациентов, относящихся к кластеру 1, оказалась значительно менее эффективной, чем у пациентов, относившихся к кластеру 0.

Заключение

ПФБС мало влияет на устойчивость стояния при поддержании вертикальной позы, но характеризуется снижением комфортной скорости ходьбы и изменением гониометрических показателей обеих нижних конечностей при ходьбе. Вероятно, степень и характер биомеханических нарушений при ходьбе у пациентов с ПФБС отражают особенности компенсаторных стратегий, направленных на уменьшение болевого синдрома, которые целесообразно учитывать при планировании реабилитационных мероприятий. Кроме того, выраженность биомеханических нарушений может служить предиктором эффективности консервативной терапии ПФБС.

Список литературы

1. Белова А.Н., Рукина Н.Н., Кузнецов А.Н., Воробьева О.В. Возможности современных технологий биомеханического анализа движений в изучении механизмов спортивных травм (обзор). Российский журнал биомеханики. – 2022. – Т. 26, № 2. – С. 82–94 DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2022.2.07
2. Скворцов Д.В. Клинический анализ движений. Анализ походки. – М.: МБН, 1996. – 344 с.
3. Скворцов Д.В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами. Анализ походки. Стабилометрия. – М.: МБН, 2007. – 618 с.
4. Barton C.J., Levinger P., Crossley K.M., Webster K.E., Menz H.B. The relationship between rearfoot, tibial and hip kinematics in individuals with patellofemoral pain syndrome // Clin. Biomech. (Bristol, Avon). – 2012. – Vol. 27, No. 7. – P. 702–705. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2012.02.007
5. Barton C.J., Levinger P., Menz H.B., Webster K.E. Kinematic gait characteristics associated with patellofemoral pain syndrome: a systematic review // Gait Posture. – 2009. – Vol. 30. – P. 405–416.
6. Bazett-Jones D.M., Neal B.S., Legg C., Hart H.F., Collins N.J., Barton C.J. Kinematic and kinetic gait characteristics in people with patellofemoral pain: a systematic review and meta-analysis // Sports Med. – 2022. Nov. 5. (Online ahead of print). DOI: 10.1007/s40279-022-01781-1
7. Bonacci J., Fox A., Hall M., Fuller J.T., Vicenzino B. Bonacci J. et al. Footwear and cadence affect gait variability in runners with patellofemoral pain // Med. Sci. Sports Exerc. – 2020. – Vol. 52, No. 6. – P. 1354–1360. DOI: 10.1249/MSS.0000000000002267
8. Bramah C., Preece S.J., Gill N., Herrington L., Bramah C. A 10% increase in step rate improves running kinematics and clinical outcomes in runners with patellofemoral pain at 4 weeks and 3 months // Am. J. Sports Med. – 2019. – Vol. 47, No. 14. – P. 3406–3413. DOI: 10.1177/0363546519879693
9. Collins N.J., Bierma-Zeinstra S.M., Crossley K.M., van Linschoten R.L., Vicenzino B., van Middelkoop M. Prognostic factors for patellofemoral pain: a multicentre observational analysis // Br. J. Sports Med. – 2013. – Vol. 47, No. 4. – P. 227–233. DOI: 10.1136/bjsports-2012-091696
10. De Oliveira Silva D., Barton C.J., Pazzinatto M.F., Briani R.V., de Azevedo F.M. Proximal mechanics during stair ascent are more discriminate of females with patellofemoral pain than distal mechanics // Clin. Biomech. (Bristol, Avon).

- 2016. – Vol. 35. – P. 56–61. DOI: 10.1016/j.clinbiomech.2016.04.009.
11. De Souza Júnior J.R., Rabelo P.H.R., Lemos T.V., Esculier J.F., Carto J.P.D.S., Matheus J.P.C. Effects of gait retraining with focus on impact versus gait retraining with focus on cadence on pain, function and lower limb kinematics in runners with patellofemoral pain: protocol of a randomized, blinded, parallel group trial with 6-month follow-up // *PLoS One*. – 2021. – Vol. 16, No. 5. – Article no. e0250965. DOI: 10.1371/journal.pone.0250965
 12. De Vasconcelos D.P., Aidar F.J., Lima T.B., Filho F.M.D.N., Mendonça I.L.A., Díaz-de-Durana A.L., Garrido N.D., Santiago M.S., Junior W.M.D.S., de Vasconcelos D.P. Assessment of dynamic knee valgus between lateral step-down test and running in female runners with and without patellofemoral pain using two-dimensional video analysis // *Clin. Pract.* – 2022. – Vol. 12, No. 3. – P. 425–435. DOI: 10.3390/clinpract12030047
 13. DIERS [Электронный ресурс]. – URL: diers-russia.ru (дата обращения: 19.09.2023).
 14. Doyle E., Doyle T.L.A., Bonacci J., Fuller J.T. The effectiveness of gait retraining on running kinematics, kinetics, performance, pain, and injury in distance runners: a systematic review with meta-analysis // *J. Orthop. Sports Phys. Ther.* – 2022. – Vol. 52, No. 4. – P. 192–A5. DOI: 10.2519/jospt.2022.10585
 15. Dutton R.A., Khadavi M.J., Fredericson M., Dutton R.A. Patellofemoral pain // *Phys. Med. Rehabil. Clin. N. Am.* – 2016. – Vol. 27, No. 1. – P. 31–52. DOI: 10.1016/j.pmr.2015.08.002
 16. Esculier J.F., Bouyer L.J., Roy J.S. Running gait modifications can lead to immediate reductions in patellofemoral pain // *Front. Sports Act. Living*. – 2023. – Vol. 4. – Article no. 1048655. DOI: 10.3389/fspor.2022.1048655
 17. Esculier J.F., Maggs K., Maggs E., Dubois B. A contemporary approach to patellofemoral pain in runners // *J. Athl. Train.* – 2020. – Vol. 55, No. 12. DOI: 10.4085/1062-6050-0535.19
 18. Ferreira A.S., de Oliveira Silva D., Briani R.V., Ferrari D., Aragão F.A., Pazzinatto M.F., de Azevedo F.M., Ferreira A.S. Which is the best predictor of excessive hip internal rotation in women with patellofemoral pain: rear-foot eversion or hip muscle strength? // *Gait Posture*. – 2018. – Vol. 62. – P. 366–371. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.03.037
 19. Gaitonde D.Y., Ericksen A., Robbins R.C. Patellofemoral pain syndrome // *Am. Fam. Physician*. – 2019. – Vol. 99, No. 2. – P. 88–94.
 20. Gulati A., McElrath C., Wadhwa V., Shah J.P., Chhabra A. Current clinical, radiological and treatment perspectives of patellofemoral pain syndrome // *Br. J. Radiol.* – 2018. – Vol. 91, No. 1086. – Article no. 20170456. DOI: 10.1259/bjr.20170456
 21. Hart H.F., Barton C.J., Khan K.M., Riel H., Crossley K.M. Is body mass index associated with patellofemoral pain and patellofemoral osteoarthritis? A systematic review and meta-regression and analysis // *Br. J. Sports Med.* – 2017. – Vol. 51, No. 10. – P. 781–790. DOI: 10.1136/bjsports-2016-096768
 22. Lankhorst N.E., Middelkoop M., Crossley K.M. Factors that predict a poor outcome 5-8 years after the diagnosis of patellofemoral pain: a multicentre observational analysis // *Br. J. Sports Med.* – 2016. – Vol. 50, No. 14. – P. 881–886. DOI: 10.1136/bjsports-2015-094664
 23. Luz B.C., Dos Santos A.F., de Souza M.C., de Oliveira Sato T.O., Nawoczenski D.A., Serrão F.V. Relationship between rearfoot, tibia and femur kinematics in runners with and without patellofemoral pain // *Gait Posture*. – 2018. – Vol. 61. – P. 416–422. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2018.02.008
 24. Luz B.C., Dos Santos A.F., Serrão F.V. Are altered kinematics in runners with patellofemoral pain sex specific? // *Sports Health*. – 2022. – Vol. 14, No. 6. – P. 822–828. DOI: 10.1177/19417381221088582
 25. Martinelli N., Bergamini A.N., Burssens A., Toschi F., Kerkhoffs G.M.M.J., Victor J., Sansone V., Martinelli N. Does the foot and ankle alignment impact the patellofemoral pain syndrome? A systematic review and meta-analysis // *J. Clin. Med.* – 2022. – Vol. 11, No. 8. – Article no. 2245. DOI: 10.3390/jcm11082245
 26. Martins D., de Castro M.P., Ruschel C., Pierri C.A.A., de Brito Fontana H., Moraes Santos G., Martins D. Do individuals with history of patellofemoral pain walk and squat similarly to healthy controls? A 3D kinematic analysis during pain remission phase // *Int. J. Sports Phys. Ther.* – 2022. – Vol. 17, No. 2. – P. 185–192. DOI: 10.26603/001c.31044
 27. Matthews M., Rathleff M.S., Claus A., McPoil T., Nee R., Crossley K., Vicenzino B., Matthews M. Can we predict the outcome for people with patellofemoral pain? A systematic review on prognostic factors and treatment effect modifiers // *Br. J. Sports Med.* – 2017. – Vol. 51, No. 23. – P. 1650–1660. DOI: 10.1136/bjsports-2016-096545
 28. Murtagh F., Legendre P. Ward's Hierarchical clustering method: clustering criterion and agglomerative algorithm. 2011.
 29. Neal B.S., Barton C.J., Gallie R., O'Halloran P., Morrissey D. Runners with patellofemoral pain have altered biomechanics which targeted interventions can modify: a systematic review and meta-analysis // 2016. – Vol. 45. – P. 69–82. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2015.11.018
 30. Nunes G.S., Barton C.J., Serrão F.V. Impaired knee muscle capacity is correlated with impaired sagittal kinematics during jump landing in women with patellofemoral pain // *J. Strength Cond. Res.* – 2022. – Vol. 36, No. 5. – P. 1264–1270. DOI: 10.1519/JSC.0000000000003616
 31. Nunes G.S., Rodrigues D.Z., Hörbe L., Prates I., Tessarin B.M., Serrão F.V., de Noronha M. Is postural control affected in people with patellofemoral pain and should it be part of rehabilitation? A systematic review with meta-analysis // *Sports Med. Open*. – 2022. – Vol. 8, No. 1. – Article no. 144. DOI: 10.1186/s40798-022-00538-4
 32. Rathleff M.S., Rathleff C.R., Olesen J.L., Rasmussen S., Roos E.M. Is knee pain during adolescence a self-limiting condition? Prognosis of patellofemoral pain and other types of knee pain // *Am. J. Sports Med.* – 2016. – Vol. 44. – P. 1165–1171. DOI: 10.1177/0363546515622456
 33. Rethman K.K., Mansfield C.J., Moeller J., De Oliveira Silva D., Stephens J.A., Di Stasi S., Briggs M.S., Rethman K.K. Kinesiophobia is associated with poor function and modifiable through interventions in people with patellofemoral pain: a systematic review with individual participant data correlation meta-analysis // *Phys. Ther.* – 2023. – Vol. 103, No. 9. – Article no. pzd074. DOI: 10.1093/ptj/pzd074
 34. Saltychev M., Dutton R.A., Laimi K., Beaupré G.S., Viro-lainen P., Fredericson M. Effectiveness of conservative

- treatment for patellofemoral pain syndrome: A systematic review and meta-analysis // *J. Rehabil. Med.* – 2018. – Vol. 50, No. 5. – P. 393–401. DOI: 10.2340/16501977-2295
35. Sheehan F.T., Derasari A., Brindle T.J., Alter K.E. Understanding patellofemoral pain with maltracking in the presence of joint laxity: complete 3D in vivo patellofemoral and tibiofemoral kinematics // *J. Orthop. Res.* – 2009. – Vol. 27, No. 5. – P. 561–570. DOI: 10.1002/jor.20783
36. Smith B.E., Selfe J., Thacker D., Hendrick P., Bateman M., Moffatt F. Incidence and prevalence of patellofemoral pain: a systematic review and meta-analysis // *PLoS One.* – 2018. – Vol. 13. – Article no. e0190892. DOI: 10.1371/journal.pone.0190892
37. Song K., Scatone Silva R., Hullfish T.J., Silbernagel K.G., Baxter J.R. Patellofemoral joint loading progression across 35 weightbearing rehabilitation exercises and activities of daily living // *Am. J. Sports Med.* – 2023.
38. Van der Kruk E., Reijne M.M. Accuracy of human motioncapture systems for sport applications; state-of-the-art review // *European Journal of Sport Science.* – 2018. DOI: 10.1080/17461391.2018.1463397
39. Waiteman M.C., Chia L., Ducatti M.H.M., Bazett-Jones D.M., Pappas E., de Azevedo F.M., Briani R.V. Trunk biomechanics in individuals with knee disorders: a systematic review with evidence gap map and meta-analysis // *Sports Med. Open.* – 2022. – Vol. 8, No. 1. – Article no. 145. DOI: 10.1186/s40798-022-00536-6
40. Ward J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function // *Journal of the American Statistical Association.* – 1963. – Vol. 58. – P. 236–244.
41. Xu X., Yao C., Wu R., Yan W., Yao Y., Song K., Jiang Q., Shi D. Prevalence of patellofemoral pain and knee pain in the general population of Chinese young adults: a community-based questionnaire survey // *BMC Musculoskelet Disord.* – 2018– – Vol. 19, No. 1. – Article no. 165. DOI: 10.1186/s12891-018-2083-x
42. Yoon S., Son H. Effects of mcconnell and kinesio tapings on pain and gait parameters during stair ambulation in patients with patellofemoral pain syndrome // *Medicina (Kau-nas).* – 2022. – Vol. 58, No. 9. – Article no. 1219. DOI: 10.3390/medicina58091219

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

BIOMECHANICAL ANALYSIS OF STATICS AND GAIT OF PATIENTS WITH PATELLOFEMORALE PAIN SYNDROME

W.O. Sushin¹, N.N. Rukina¹, A.N. Kuznetsov¹, A.N. Belova¹, O.V. Vorobyeva¹,
A.D. Butchenko¹, E.A. Dudorov²

¹ Privolzhsky Research Medical University, Nizhniy Novgorod, Russian Federation

² Research and Production Association "Android Technology", Moscow, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 22 September 2023
Approved: 03 December 2023
Accepted for publication: 05 December 2023

Key words:

patellofemoral pain syndrome, biomechanics, walking, rehabilitation

ABSTRACT

Patellofemoral pain syndrome (PFPS) is a pathology in the knee joint, which is often observed in young active people and manifests itself as pain in the knee and periarticular tissues in the absence of intra-articular pathology of the knee joint. The article presents the results of a biomechanical study of statics and walking in 47 patients with PFPS and 34 healthy individuals. Differences in goniometric parameters were revealed in patients and healthy individuals when walking. It has been demonstrated that in PFPS, biomechanical disturbances affect both lower extremities. It has been shown that the severity of biomechanical disorders when walking can serve as a predictor of the effectiveness of conservative therapy for PFPS.

© PNRPU