

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВИДЕОАНАЛИЗА ДВИЖЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ ЛОКОМОТОРНЫХ ФУНКЦИЙ ПОСЛЕ АРТРОСКОПИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ

Е. Ю. Можейко¹✉, А. О. Павлов², М. А. Чистов¹, М. А. Храменко¹, В. А. Гуревич¹

¹ Красноярский государственный медицинский университет имени В. Ф. Войно-Ясенецкого, Красноярск, Россия

² Федеральный сибирский научно-клинический центр Федерального медико-биологического агентства, Красноярск, Россия

Разрыв передней крестообразной связки — одно из наиболее часто встречающихся повреждений капсульно-связочного аппарата коленного сустава, требующий оперативного лечения. В ходе длительного периода реабилитации после реконструктивных операций при данном виде травм у пациента формируется характерный двигательный паттерн. На сегодняшний день применение инновационных объективных методов диагностики и реабилитации двигательных нарушений при таких повреждениях актуально и востребованно. Представлен пример персонализированной реабилитационной оценки функции ходьбы пациента через два месяца после пластики передней крестообразной связки методом трехмерного видеоанализа движений. Выявлено нарушение паттерна ходьбы пациента: более медленный короткий редкий широкий шаг по сравнению с шагом здорового исследуемого; амплитуда сгибания-разгибания в крупных суставах оперированной нижней конечности меньше, чем в контрлатеральной нижней конечности пациента. Метод может быть использован в анализе динамики восстановительного лечения после оперативных вмешательств при разрыве крестообразных связок коленного сустава.

Ключевые слова: видеоанализ движений, передняя крестообразная связка, ходьба, постуральные нарушения, реабилитация

Вклад авторов: Е. Ю. Можейко — анализ результатов исследования, формулировка рабочей гипотезы, разработка дизайна исследования, определение цели и задач исследования, написание и утверждение рукописи для публикации; А. О. Павлов — формулировка рабочей гипотезы, утверждение рукописи; М. А. Чистов, М. А. Храменко — поиск литературы, анализ результатов исследования, статистический анализ, написание статьи; В. А. Гуревич — отбор единиц наблюдения, анализ результатов, статистический анализ.

Соблюдение этических стандартов: исследование одобрено этическим комитетом КрасГМУ (протокол № 89/2019 от 17 апреля 2019 г.).

✉ **Для корреспонденции:** Елена Юрьевна Можейко
ул. Проспект Мира, д. 5, г. Красноярск, 660049, Россия; el_mozhejko@mail.ru

Статья получена: 20.11.2021 **Статья принята к печати:** 13.12.2021 **Опубликована онлайн:** 28.12.2021

DOI: 10.24075/vrgmu.2021.063

USING MOTION CAPTURE ANALYSIS FOR ASSESSING LOCOMOTION AFTER ARTHROSCOPIC ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT RECONSTRUCTION

Mozheyko EYu¹✉, Pavlov AO², Chistov MA¹, Khranchenko MA¹, Gurevich VA¹

¹ Voino-Yasenetsky Krasnoyarsk State Medical University, Krasnoyarsk, Russia

² Federal Siberian Research and Clinical Center of FMBA, Krasnoyarsk, Russia

An anterior cruciate ligament tear is one of the most common injuries to the capsular ligament apparatus of the knee necessitating operative treatment. Postoperatively, patients with anterior cruciate ligament injuries develop a pathologic gait pattern. Today, innovative diagnostic and rehabilitation methods for patients with gait disturbances associated with such injuries are in high demand. Below, we present a case of using 3D motion capture analysis for the personalized assessment of gait function in a patient with the reconstructed anterior cruciate ligament two months after surgery. The analysis revealed that the patient had a slower, shorter, wider step with longer step intervals than the healthy subject; the flexion and extension amplitude in the large joints of the operated leg was smaller than in the healthy contralateral leg. Motion capture analysis can be used to assess the postoperative dynamics in patients with anterior cruciate ligament tears.

Keywords: motion capture, anterior cruciate ligament, gait, postural disorders, rehabilitation

Author contribution: Mozheyko EYu formulated the hypothesis, proposed the design, defined the goals and objectives of the study, analyzed study results, wrote and edited the manuscript; Pavlov AO formulated the hypothesis and edited the manuscript; Chistov MA, Khranchenko MA searched the literature, analyzed study results, performed statistical analysis and wrote the manuscript; Gurevich VA recruited the subjects, analyzed the results and performed statistical analysis.

Compliance with ethical standards: the study was approved by the Ethics Committee of Krasnoyarsk State Medical University (Protocol № 89/2019 dated April 17, 2019).

✉ **Correspondence should be addressed:** Elena Yu. Mozheyko
Prospekt Mira, 5, Krasnoyarsk, 660049, Russia; el_mozhejko@mail.ru

Received: 20.11.2021 **Accepted:** 13.12.2021 **Published online:** 28.12.2021

DOI: 10.24075/brsmu.2021.063

Травматизация связочного аппарата коленного сустава — патологическое состояние, при котором повреждена одна или несколько связок в коленном суставе [1]. Данный вид травмы чаще встречается у молодых людей трудоспособного возраста, активно занимающихся физической культурой и спортом, и является одной из основных причин обращения пациентов за медицинской помощью по профилю травматологии и ортопедии [1, 2].

Среди всех повреждений капсульно-связочного аппарата коленного сустава преобладают разрывы передней крестообразной связки, встречающиеся в 30–35 случаях на 100 000 человек [1].

Крестообразные связки — это соединительнотканые сухожильные тяжи внутри коленного сустава, удерживающие бедренную и большеберцовую кости между собой, функция которых — ограничение чрезмерной подвижности голени относительно бедра [3].

Чаще всего повреждение передней крестообразной связки происходит в результате бесконтактной травмы, когда при фиксированной стопе происходит резкая ротация в коленном суставе [1, 4]. Как правило, многие изолированные повреждения связок — последствия спортивных травм с ротационным компонентом в механогенезе [5].

Диагностика разрывов передних крестообразных связок включает в себя сбор анамнеза травмы; проведение клинических тестов, таких как тест Лахмана, «переднего и заднего выдвинутого ящика»; рентгенографию коленного сустава в прямой и боковой проекциях; магнитно-резонансную томографию (МРТ) коленного сустава [4].

Большую диагностическую ценность в анализе локомоций пациентов с данным видом травмы может иметь исследование ходьбы методом видеоанализа движений (ВАД), базирующееся на технологии компьютерного анализа видеоизображений движений обследуемого, при котором видеозахват проводится бесконтактно, без применения кабельной связи регистрирующего устройства с объектом исследования [6].

Сегодня в клинической практике распространены технологии видеозахвата с применением пассивных маркеров. К сегментам тела обследуемого фиксируют световозвращающие датчики, сигналы от которых регистрируют видеокамеры; получаемая информация попадает в компьютер, где происходит ее обработка на основании конкретной компьютерной модели, по результатам которой формируется отчет, позволяющий наглядно провести анализ полученных угловых и линейных кинематических характеристик изучаемых движений [7].

Минимум три маркера должны располагаться в поле видимости как минимум двух камер (по причине того что плоскость задается в пространстве тремя точками) [8].

На обследуемом закрепляют калибровочные маркеры для измерения физических данных исследуемых сегментов. На сегодняшний день имеются стандарты для движений стопы, голени, бедра, таза, позвоночника, кисти, предплечья, плеча [9].

ВАД активно применяют для раскрытия механизмов бесконтактных повреждений передней крестообразной связки коленного сустава [10]. Трехмерный ВАД предложен к внедрению в клиническую практику с целью контроля за процессом восстановительного лечения у пациентов с травмами коленного сустава и прогнозирования повторного риска травмы [11].

Персонализированная оценка локомоторных функций методом ВАД у пациента с разрывом передней крестообразной связки представлена в клиническом наблюдении ниже.

Клинический случай

Пациенту И., 21 год, с установленным диагнозом «разрыв передней крестообразной связки левого коленного сустава, частичный разрыв задней крестообразной связки» 19.01.2021 была проведена операция — лечебно-диагностическая артроскопия левого коленного сустава, резекция культи передней крестообразной связки, реконструкция передней крестообразной связки с применением ауто трансплантата из малоберцовой мышцы и фиксацией винтами PEEK Interference Screws (Arthrex; США). Послеоперационный период протекал без осложнений. Проведено комплексное консервативное лечение: антибактериальная и инфузионная терапия, применение анальгетиков, антикоагулянтов, перевязки. Имобилизацию коленного сустава осуществляли тугором, ходьбу — с опорой на костыли. Пациент был выписан из стационара в удовлетворительном состоянии.

Заключение МРТ-исследования левого коленного сустава от 03.12.2020 (до операции): импрессионный перелом наружного мыщелка бедренной кости. Трабекулярный отек наружного мыщелка и межмышцелковой области большеберцовой кости, внутреннего мыщелка бедренной кости. Синовит и супрапателлярный бурсит. МР-признаки повреждения передней крестообразной связки, лигаментита внутренней коллатеральной связки. Умеренные дегенеративные изменения переднего рога наружного и заднего рога внутреннего менисков. Отек периапартулярных мягких тканей.

Исследуемый В., 22 года, без жалоб со стороны опорно-двигательного аппарата, в анамнезе не имеющий операций и травм на нижних конечностях, антропометрически сопоставим с пациентом И.

Пациент и исследуемый были обследованы в лаборатории ВАД Федерального сибирского научно-клинического центра ФМБА России с использованием программно-аппаратного комплекса Vicon Motion Capture Systems (Vicon; Великобритания). Комплекс состоит из 12 инфракрасных видеокамер (типа T20), трех силовых платформ, коммутатора «GigaNet» и компьютера с установленным программным обеспечением (программа для обеспечения видеозахвата и обработки полученных данных «Nexus» версии 1.7.15, программа для создания отчетов «Polygon» версии 3.5.1).

Таблица 1. Темпо-ритмовые параметры ходьбы пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава и здорового человека

Показатели ВАД	Пациент с повреждением связочного аппарата коленного сустава			Здоровый человек		
	Левая нога	Правая нога	Обе ноги	Левая нога	Правая нога	Обе ноги
Темп ходьбы (шаг/мин)	94,4 ± 2,91	96,7 ± 3,78	95,5 ± 3,51	116,88 ± 3,25	117,56 ± 4,12	117,22 ± 3,68
Момент отрыва контактной ноги (% в фазе двойного шага)	62,0 ± 1,54	62,9 ± 2,87	62,4 ± 2,29	60,10 ± 1,79	60,90 ± 2,16	60,60 ± 1,97
Момент контакта противоположной ноги (% в фазе двойного шага)	49,80 ± 1,62	50,10 ± 2,32	49,90 ± 1,96	49,90 ± 1,13	50,10 ± 1,75	49,9 ± 1,56
Момент отрыва противоположной ноги (% в фазе двойного шага)	12,40 ± 0,71	12,80 ± 0,96	12,60 ± 0,85	9,80 ± 0,94	10,90 ± 0,85	10,50 ± 0,96
Время одиночной опоры (с)	0,48 ± 0,021	0,46 ± 0,038	0,47 ± 0,031	0,41 ± 0,026	0,44 ± 0,020	0,43 ± 0,025
Время двойной опоры (с)	0,31 ± 0,023	0,32 ± 0,020	0,32 ± 0,021	0,21 ± 0,023	0,25 ± 0,018	0,23 ± 0,021
Время шага (с)	0,64 ± 0,031	0,62 ± 0,040	0,63 ± 0,036	0,51 ± 0,027	0,56 ± 0,028	0,54 ± 0,028
Время двойного шага (с)	1,27 ± 0,042	1,24 ± 0,049	1,26 ± 0,047	1,02 ± 0,044	1,12 ± 0,040	1,08 ± 0,048
Длина шага (м)	0,61 ± 0,021	0,62 ± 0,016	0,61 ± 0,020	0,68 ± 0,033	0,75 ± 0,016	0,72 ± 0,027
Ширина шага (м)	0,20 ± 0,018	0,20 ± 0,010	0,20 ± 0,015	0,07 ± 0,012	0,07 ± 0,010	0,07 ± 0,011
Длина двойного шага (м)	1,21 ± 0,023	1,23 ± 0,030	1,22 ± 0,029	1,36 ± 0,014	1,51 ± 0,0071	1,45 ± 0,011
Скорость ходьбы (м/с)	0,95 ± 0,042	0,99 ± 0,057	0,97 ± 0,053	1,24 ± 0,028	1,44 ± 0,025	1,34 ± 0,028

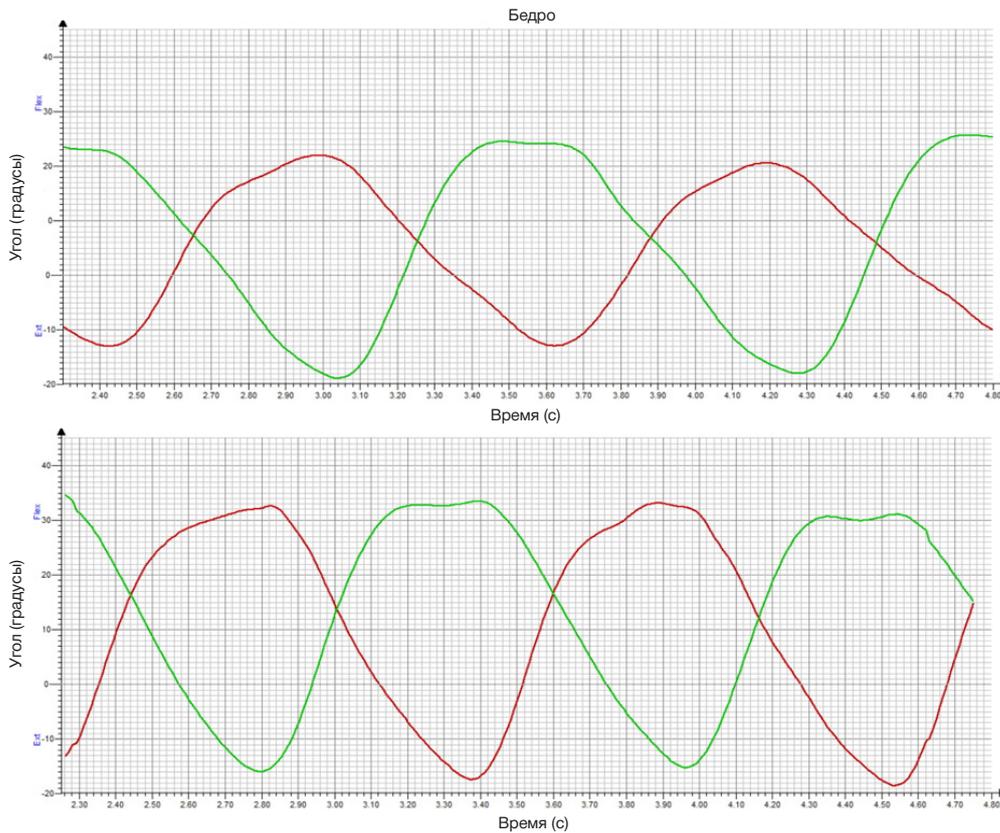


Рис. 1. Сгибание-разгибание бедра в тазобедренном суставе за один цикл ходьбы: у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава (вверху); у здорового человека (внизу)

Процедура обследования состояла из нескольких этапов. На первом этапе проводили антропометрию с целью «привязки» индивидуальных размеров регистрируемых сегментов тела пациента к компьютерной модели. Далее маркеры прикрепляли на костные ориентиры исследуемого. Пациенту и исследуемому предлагали пройти в обычном темпе по трем силовым платформам. Во время ходьбы камеры фиксировали положение маркеров в пространстве, а платформы регистрировали реакцию опоры. Каждый совершал как минимум 10 шаговых циклов по трем силовым платформам.

У пациента с повреждением передней крестообразной связки в сравнении со здоровым человеком зарегистрировали следующие изменения параметров ходьбы: значимое замедление смены шагов (темпа ходьбы) и скорости ходьбы при укорочении длины одиночного и двойного шага; увеличение времени одиночного и двойного шага, одиночной и двойной опоры; уменьшение момента отрыва контактной и противоположной ноги (табл. 1).

Показатель ширины шага у пациента после реконструктивной операции значительно выше по сравнению с шириной шага здорового человека соответствующей возрастной группы.

Показатель момента контакта противоположной ноги не имеет значимого различия с соответствующим показателем у здорового человека.

Выявленные изменения у пациента свидетельствуют о нарушении паттерна ходьбы, для которого характерен более медленный короткий редкий широкий шаг по сравнению со здоровым испытуемым. Данные изменения, на наш взгляд, связаны с двумя факторами. Во-первых, стереотип ходьбы подвержен патологическим изменениям в раннем послеоперационном периоде вследствие необходимости передвижения пациента при помощи костылей, а также ношения различного вида брейсов. Во-вторых, нарушается проприоцепция оперированного коленного сустава, что, несомненно, влияет на показатели внутримышечной и межмышечной координации мышц, окружающих коленный сустав.

Таблица 2. Средние значения углов и амплитуды сгибания-разгибания бедра в тазобедренном суставе у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава и здорового пациента за один цикл ходьбы

	Пациент с повреждением связочного аппарата коленного сустава		Здоровый человек	
	Левая нога	Правая нога	Левая нога	Правая нога
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Угол 1	-13,71	-18,08	-17,79	-16,28
	[-15,03; -13,0]	[-18,59; -17,63]	[-16,79; -15,26]	[-16,63; -15,93]
Угол 2	23,3	24,43	34,52	32,66
	[22,27; 24,48]	[23,62; 25,84]	[33,16; 35,19]	[31,07; 33,16]
Δ	37,62	42,68	50,1	48,84
	[35,51; 38,56]	[41,09; 43,83]	[49,57; 50,72]	[47,86; 49,67]

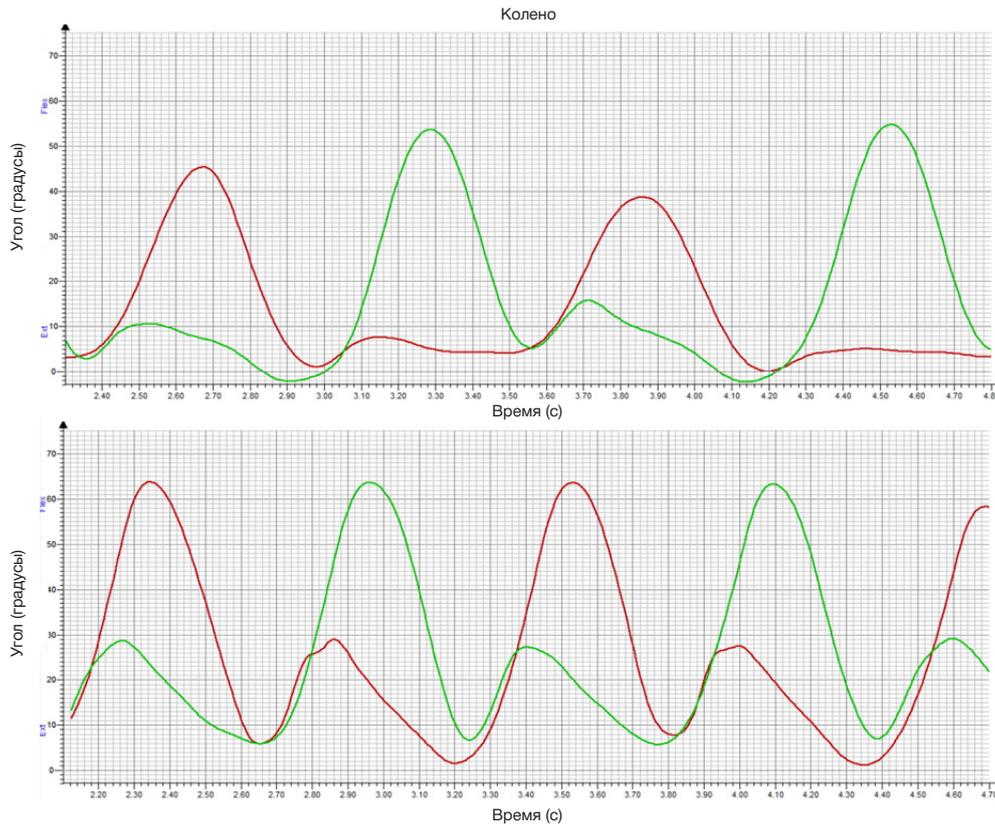


Рис. 2. Сгибание-разгибание голени в коленном суставе за один цикл ходьбы: у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава (вверху); у здорового человека (внизу)

С помощью метода трехмерного ВАД возможна оценка амплитуды движений различных частей тела в разные моменты цикла шага, а также сопоставление полученных данных с показателями подометрии.

Показатели величины амплитуды движения в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава и здорового человека наглядно представлены на графиках (рис. 1–4). Во время ходьбы у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава амплитуда сгибания-разгибания оперированной (левой) ноги в тазобедренном суставе меньше, чем правой (рис. 1, табл. 2).

При анализе показателей сгибания-разгибания голени в коленном суставе во время одного шагового цикла у пациента с травмой связочного аппарата левого коленного сустава выявлено снижение амплитуды сгибания-разгибания в левом коленном суставе (рис. 2, табл. 3).

Во время ходьбы у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава амплитуда сгибания-

разгибания оперированной ноги в голеностопном суставе меньше, чем правой (рис. 3, табл. 4).

Сниженная амплитуда движений в суставах нижней конечностей обусловлена как нарушенным паттерном ходьбы, так и снижением пассивного и активного объемов движений в данном регионе, что опять же обусловлено определенным периодом иммобилизации (ортез/тутор) после оперативного лечения и недостатком адекватного двигательного стереотипа. Можно также отметить тот факт, что на объем движений в том или ином суставе может влиять то место, где производят забор трансплантата для пластики передней крестообразной связки. Необходимы дальнейшие исследования.

Выявлено также, что ротация в левом коленном суставе у пациента с травмой значительно меньше, чем в правом (рис. 4, табл. 5). Незначительная асимметрия ротации в коленном суставе отмечена и у здорового исследуемого, однако она незначительна.

Таблица 3. Средние значения углов и амплитуды сгибания-разгибания голени в коленном суставе у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава и здорового пациента за один цикл ходьбы

	Пациент с повреждением связочного аппарата коленного сустава		Здоровый человек	
	Левая нога	Правая нога	Левая нога	Правая нога
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Угол 1	1,39 [1,04; 2,37]	-2,89 [-3,32; -2,36]	1,7 [1,33; 2,26]	5,3 [5,02; 5,67]
Угол 2	45,07 [42,61; 48,18]	52,82 [51,2; 54,59]	61,89 [60,82; 63,34]	63,73 [63,4; 64,86]
Δ	43,16 [40,54; 46,55]	56,01 [54,89; 57,09]	60,85 [58,47; 61,57]	58,39 [57,73; 59,17]

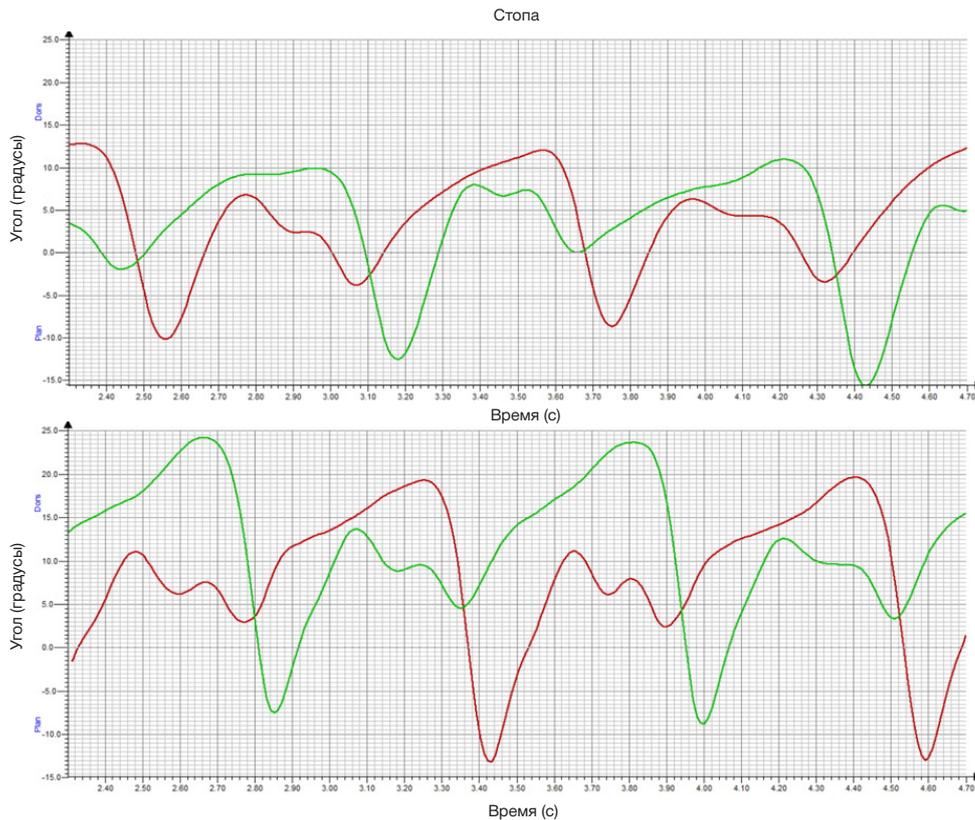


Рис. 3. Сгибание-разгибание стопы в голеностопном суставе за один цикл ходьбы: у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава (вверху); у здорового человека (внизу)

Обсуждение клинического случая

Метод ВАД рассматривали для оценки восстановления статолокомоторных функций у спортсменов после реконструкции передних крестообразных связок при помощи теста прыжка на одной ноге [12]. Авторы работы учитывали: сгибание колена при первоначальном контакте, пиковое сгибание колена, диапазон движений при сгибании колена и вальгусную деформацию колена во фронтальной и сагиттальной плоскостях. Темпо-ритмовые показатели ходьбы не исследовали. По результатам исследования ВАД рекомендован как простой и более точный метод для оценки стабильности коленного сустава, а также возможности возвращения пациентов в спорт после операции по поводу разрыва передней крестообразной связки коленного сустава [12].

Другие авторы исследовали ВАД спортсменов после пластики передней крестообразной связки коленных суставов с целью устранения возможности наступления

раннего травматизма [13]. Ими был применен ВАД ног «Motion analysis» с оценкой нестабильности коленного сустава во время ходьбы, бега, удара по мячу со средней силой и хлыстообразного. В данном исследовании помимо темпо-ритмовых показателей ходьбы были оценены отношение углов сгибания и разгибания оперированного колена и здорового при беге и ударе по мячу. Угловые показатели движения не исследовали. Сделан вывод, что ВАД можно применять как самостоятельный метод и в дополнение к другим методам исследования параметров ходьбы [13].

При исследовании спортсменов с повреждением передней крестообразной связки коленного сустава при помощи ВАД были зафиксированы средний угол сгибания колена при начальном контакте, средний вальгусный угол при начальном контакте, угол наружной и внутренней ротации коленного сустава; средняя пиковая вертикальная сила реакции опоры. Выявлено, что причиной возникновения травмы передней крестообразной связки

Таблица 4. Средние значения углов и амплитуды сгибания-разгибания стопы в голеностопном суставе у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава и здорового пациента за один цикл ходьбы

	Пациент с повреждением связочного аппарата коленного сустава		Здоровый человек	
	Левая нога	Правая нога	Левая нога	Правая нога
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Угол 1	-8,24	-15,65	-9,59	-9,18
	[-9,41; -7,01]	[-17,19; -14,37]	[-12,05; -7,8]	[-10,39; -8,52]
Угол 2	13,48	10,79	19,76	23,52
	[12,99; 14,71]	[9,25; 11,47]	[18,26; 20,49]	[22,11; 24,22]
Δ	21,9	26,21	29,33	32,26
	[20,98; 22,85]	[25,16; 27,07]	[28,58; 30,28]	[30,83; 33,91]

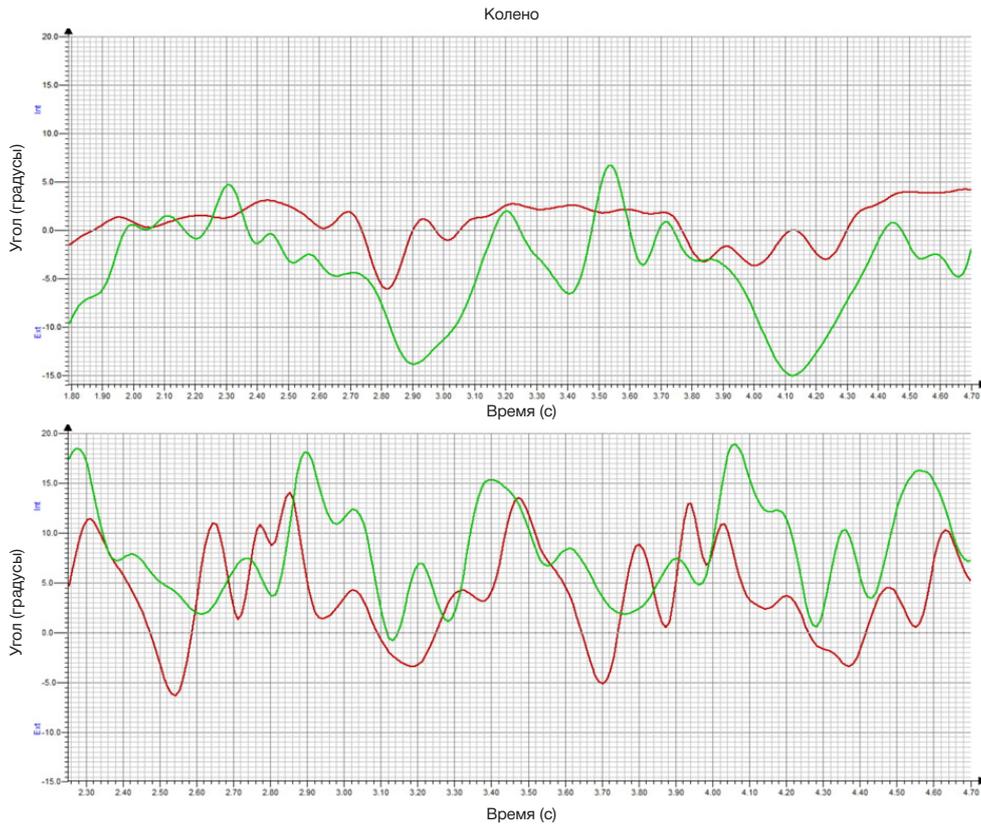


Рис. 4. Ротация коленного сустава за один цикл ходьбы: у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава (вверху); у здорового человека (внизу)

является сочетание вальгусной нагрузки и внутренней ротации коленного сустава [14].

Авторы другой работы изучали механизм травмы «slip-catch» передней крестообразной связки у спортсменов посредством ВАД с оценкой угла сгибания в коленном суставе, угла внутренней ротации большеберцовой кости; вальгусного угла колена. Темпо-ритмовые показатели и угловые показатели движения в тазобедренном, голеностопном суставах не исследовали. Обнаружено, что причинами травмы передней крестообразной связки по типу «slip-catch» являются вальгусная нагрузка и внутренняя ротация в сочетании с отведением колена [15].

Полученные в представленном клиническом случае результаты изменения параметров движений оперированной конечности в виде уменьшения амплитуда сгибания-

разгибания в тазобедренном, коленном и голеностопном суставах, снижения ротации в левом коленном суставе коррелируют с полученными ранее данными [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Трехмерный ВАД — ценный метод анализа тонких изменений биомеханики ходьбы у пациентов с травмами передней крестообразной связки. Помимо амплитудных и угловых показателей движения здоровой и оперированной конечностей получены особенности темпо-ритмовых параметров ходьбы.

Необходимы дальнейшие исследования для уточнения длительности патологических изменений и возможности целенаправленной коррекции данных нарушений использованием реабилитационных вмешательств.

Таблица 5. Средние значения углов и амплитуды ротации коленного сустава у пациента с повреждением связочного аппарата коленного сустава и у здорового пациента за один цикл ходьбы

	Пациент с повреждением связочного аппарата коленного сустава		Здоровый человек	
	Левая нога	Правая нога	Левая нога	Правая нога
	Me [P ₂₅ ; P ₇₅]			
Угол 1	-5,83	-14,55	-7,28	0,57
	[-7,48; -4,96]	[-15,73; -13,37]	[-8,23; -5,12]	[-0,64; 1,16]
Угол 2	2,41	4,12	14,27	17,78
	[1,78; 2,79]	[3,13; 5,54]	[13,91; 15,17]	[17,02; 18,9]
Δ	8,15	19,01	21,59	17,05
	[7,04; 9,58]	[17,2; 20,69]	[19,54; 22,75]	[16,03; 18,8]

Литература

1. Повреждение связок коленного сустава. Клинические рекомендации. Общероссийская общественная организация «Ассоциация травматологов-ортопедов России (АТОР)». 2020; 36 с.
2. Королев А. В., Афанасьев А. П., Ильин Д. О., Герасимов Д. О., Рязанцев М. С., Каданцев П. М. Повреждения задней крестообразной связки: биомеханика, основные направления диагностики, лечения и профилактики вторичного остеоартрита. Гений ортопедии. 2020; 26 (3): 413–8. DOI: 10.17116/hirurgia2020091130.
3. Федуллова Д. В., Ямалетдинова Г. А. Методы оценки процесса восстановления после реконструкции передних крестообразных связок коленного сустава. Научно-спортивный вестник Урала и Сибири. 2018; 1 (17): 68–85.
4. Разваляева Д. В., Разваляев А. С., Еремускин М. А., Стяжкина Е. М. Сравнительная оценка эффективности консервативной и оперативной тактики лечения пациентов после травмы передней крестообразной связки с использованием роботизированной механотерапевтической системы "CON-TREX". Вестник восстановительной медицины. 2019; 5: 35–39.
5. Валиев Э. Ю., Хакимов Р. Н., Убайдуллаев Б. С. Современный взгляд на лечение комплексных повреждений связок коленного сустава. Вестник экстренной медицины. 2015; 2: 81–84.
6. Ma Y, Soatto S, Košecák J, Sastry SS. An invitation to 3D vision. From Images to Geometric Models. Interdisciplinary Applied Mathematics. New York: Springer, 2004.
7. Wang I, Hu W, Tan T. Recent developments in human motion analysis. Pattern Recognition. 2003; 36 (3): 585–601. DOI: 10.1016/S0031-3203(02)00100-0.
8. Скворцов Д. В. Методика исследования кинематики движений и современные стандарты. Видеоанализ. Лечебная физкультура и спортивная медицина. 2012; 12: 4–10.
9. Cappozzo A, Cappello A, Croce UD, Pensalfini F. Surface-marker cluster design criteria for 3-D bone movement reconstruction. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1997; 44 (12): 1165–74. DOI: 10.1109/10.649988.
10. Hewett TE, Torg JS, Boden BP. Video analysis of trunk and knee motion during non-contact anterior cruciate ligament injury in female athletes: lateral trunk and knee abduction motion are combined components of the injury mechanism. British Journal of Sports Medicine. 2009; 49 (6): 417–22. DOI: 10.1136/bjism.2009.059162.
11. Asaeda M, Nakamae A, Hirata K, Kono Y, Uenishi H, Adachi N. Factors associated with dynamic knee valgus angle during single-leg forward landing in patients after anterior cruciate ligament reconstruction. Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology. 2020; 24 (22): 56–61. DOI: 10.1016/j.asmart.2020.07.002.
12. Welling W, Benjaminse A, Seil R, Lemmink K, Gokeler A. Altered movement during single leg hop test after ACL reconstruction: implications to incorporate 2-D video movement analysis for hop tests. Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy. 2018; 26 (10): 3012–9. DOI: 10.1007/s00167-018-4893-7.
13. Преображенский В. Ю., Зиновьев О. В., Сидоренко Е. В., Галухин В. В., Внукон Д. В., Преображенский А. В., и др. Оценка физического состояния спортсменов после пластики передней крестообразной связки с целью предупреждения повторных травм. Доктор.ру. 2011; 8 (67): 38–41.
14. Koga H, Nakamae A, Shima Yo, Iwasa J, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. The American journal of sports medicine. 2010; 38 (11): 2218–25. DOI: 10.1177/0363546510373570.
15. Bere T, Mok K, Koga H, Krosshaug T, Nordsletten L, Bahr R. Kinematics of anterior cruciate ligament ruptures in World Cup alpine skiing: 2 case reports of the slip-catch mechanism. The American journal of sports medicine. 2013; 41 (5): 1067–73. DOI: 10.1177/0363546513479341.
16. Clark N, Forshey T, Mulligan I, Kindel C. Knee mechanics during a change of direction movement in division I athletes following full return to sport from anterior cruciate ligament reconstruction. Physical Therapy in Sport. 2018; 35 (4): 75–78. DOI: 10.1016/j.ptsp.2018.11.008
17. Sharifmoradi K, Karimi M, Hoseini Y. Evaluation of the Asymmetry of Leg Muscles Forces in the Subjects with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. The Journal of Knee Surgery. 2019; 34 (4): 357–62. DOI: 10.1055/s-0039-1695703.

References

1. Povrezhdenie svjazok kolennogo sustava. Klinicheskie rekomendacii. Obshherossijskaja obshhestvennaja organizacija «Associacija travmatologov-ortopedov Rossii (ATOR)». 2020; 36 s. Russian.
2. Korolev AV, Afanasev AP, Ilin DO, Gerasimov DO, Ryzancev MS, Kadancev PM. Povrezhdenija zadnej krestoobraznoj svjazki: biomehanika, osnovnye napravlenija diagnostiki, lechenija i profilaktiki vtorichnogo osteoartrita. Genij ortopedii. 2020; 26 (3): 413–8. DOI: 10.17116/hirurgia2020091130. Russian.
3. Fedulova DV, Yamaletdinova GA. Metody ocenki processa vosstanovlenija posle rekonstrukcii perednih krestoobraznyh svjazok kolennogo sustava. Nauchno-sportivnyj vestnik Urala i Sibiri. 2018; 1 (17): 68–85. Russian.
4. Razvalyaeva DV, Razvalyaev AS, Eremushkin MA, Styazhkina EM. Sravnitel'naja ocenka jeffektivnosti konservativnoj i operativnoj taktiki lechenija pacientov posle travmy perednej krestoobraznoj svjazki s ispol'zovaniem robotizirovannoj mehanoterapevticheskoj sistemy "CON-TREX". Vestnik vosstanovitel'noj mediciny. 2019; 5: 35–39. Russian.
5. Valiev YeYu, Hakimov RN, Ubajdullaev BS. Sovremennij vzgljad na lechenie kompleksnyh povrezhdenij svjazok kolennogo sustava. Vestnik jekstrennoj mediciny. 2015; 2: 81–84. Russian.
6. Ma Y, Soatto S, Košecák J, Sastry SS. An invitation to 3D vision. From Images to Geometric Models. Interdisciplinary Applied Mathematics. New York: Springer, 2004.
7. Wang I, Hu W, Tan T. Recent developments in human motion analysis. Pattern Recognition. 2003; 36 (3): 585–601. DOI: 10.1016/S0031-3203(02)00100-0.
8. Skvorcov DV. Metodika issledovanija kinematiki dvizhenij i sovremennye standarty. Videoanaliz. Lechebnaja fizkul'tura i sportivnaja medicina. 2012; 12: 4–10. Russian.
9. Cappozzo A, Cappello A, Croce UD, Pensalfini F. Surface-marker cluster design criteria for 3-D bone movement reconstruction. IEEE Transactions on Biomedical Engineering. 1997; 44 (12): 1165–74. DOI: 10.1109/10.649988.
10. Hewett TE, Torg JS, Boden BP. Video analysis of trunk and knee motion during non-contact anterior cruciate ligament injury in female athletes: lateral trunk and knee abduction motion are combined components of the injury mechanism. British Journal of Sports Medicine. 2009; 49 (6): 417–22. DOI: 10.1136/bjism.2009.059162.
11. Asaeda M, Nakamae A, Hirata K, Kono Y, Uenishi H, Adachi N. Factors associated with dynamic knee valgus angle during single-leg forward landing in patients after anterior cruciate ligament reconstruction. Asia-Pacific Journal of Sports Medicine, Arthroscopy, Rehabilitation and Technology. 2020; 24 (22): 56–61. DOI: 10.1016/j.asmart.2020.07.002.
12. Welling W, Benjaminse A, Seil R, Lemmink K, Gokeler A. Altered movement during single leg hop test after ACL reconstruction: implications to incorporate 2-D video movement analysis for hop tests. Knee Surgery Sports Traumatology Arthroscopy. 2018; 26 (10): 3012–9. DOI: 10.1007/s00167-018-4893-7.
13. Preobrazhenskij VYu, Zinovev OV, Sidorenko EV, Galuhin VV, Vnukov DV, Preobrazhenskij AV, i dr. Ocenka fizicheskogo sostojanija sportmenov posle plastiki perednej krestoobraznoj

- svjazki s cel'ju preduprezhdenija povtornyh travm. Doktor.ru. 2011; 8 (67): 38–41. Russian.
14. Koga H, Nakamae A, Shima Yo, Iwasa J, Myklebust G, Engebretsen L, et al. Mechanisms for noncontact anterior cruciate ligament injuries: knee joint kinematics in 10 injury situations from female team handball and basketball. *The American journal of sports medicine*. 2010; 38 (11): 2218–25. DOI: 10.1177/0363546510373570.
 15. Bere T, Mok K, Koga H, Krosshaug T, Nordsletten L, Bahr R. Kinematics of anterior cruciate ligament ruptures in World Cup alpine skiing: 2 case reports of the slip-catch mechanism. *The American journal of sports medicine*. 2013; 41 (5): 1067–73. DOI: 10.1177/0363546513479341.
 16. Clark N, Forshey T, Mulligan I, Kindel C. Knee mechanics during a change of direction movement in division I athletes following full return to sport from anterior cruciate ligament reconstruction. *Physical Therapy in Sport*. 2018; 35 (4): 75–78. DOI: 10.1016/j.ptsp.2018.11.008
 17. Sharifmoradi K, Karimi M, Hoseini Y. Evaluation of the Asymmetry of Leg Muscles Forces in the Subjects with Anterior Cruciate Ligament Reconstruction. *The Journal of Knee Surgery*. 2019; 34 (4): 357–62. DOI: 10.1055/s-0039-1695703.