

ОЦЕНКА ХОДЬБЫ ПРИ ТРАВМЕ ПЕРЕДНЕЙ КРЕСТООБРАЗНОЙ СВЯЗКИ КОЛЕННОГО СУСТАВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ СЕНСОРОВ

Королева С.В., Кирпичёв И.В., Михайлов Д.В.

ФГБОУ ВО «Ивановская государственная медицинская академия Минздрава России», Иваново, e-mail: drqueen@mail.ru

Травма передней крестообразной связки коленного сустава (ПКС КС) занимает второе место по частоте среди всех травм КС. Большинство авторов сходится во мнении, что не существует универсального механизма выбора стратегии и тактики лечения, сроков и видов оперативного вмешательства, а также способов ее восстановления. ПКС является одним из основных анатомических образований, обеспечивающих стабильность КС в сагиттальной и горизонтальной плоскостях. Основной жалобой и запросом пациента при обращении за медицинской помощью является нарушение функции ходьбы. Таким образом, объективные маркеры ходьбы могут стать тем единым инструментальным критерием в состоянии КС, который обеспечит мультидисциплинарное ведение пациентов в динамике лечения и восстановления при травме ПКС. Цель исследования – определить ведущие объективные показатели паттерна ходьбы у пациентов с повреждениями передней крестообразной связки. Обследованы 15 пациентов в динамике лечения по поводу застарелой травмы ПКС. Обследование ходьбы проведено с применением системы для анализа функции ходьбы «Стэдис» (ООО «Нейрософт», Иваново) с регистрацией стандартных показателей. Группу контроля составили 16 пациентов без патологии КС. Универсальным методологическим подходом стало принятие аксиомы о единой кинематической цепи в случае нарушения биомеханики одной конечности и выравнивание/уменьшение асимметрии в этой цепи за счет здоровой. При этом подходе была установлена высокодоверенная разница в паттерне ходьбы как внутри экспериментальной группы, так и между группами сравнения. Был выделен так называемый W-тип гониограмм КС, при котором в периоде опоры образовывались 2 дополнительных зубца, отражающих феномены попытки уменьшения нестабильности КС. Таким образом, повреждения ПКС КС могут привести к значимым нарушениям в биокинематике ходьбы, что отражает процессы адаптации/деадаптации опорно-двигательной системы к изменившимся условиям функционирования в результате травмы.

Ключевые слова: травма коленного сустава, передняя крестообразная связка, параметры ходьбы, типы гониограмм, инерциальный сенсор.

ASSESSMENT OF WALK IN INJURY OF THE ANTERIOR CRUCIATE LIGAMENT OF THE KNEE JOINT USING THE TECHNOLOGY OF INERTIAL SENSORS

Koroleva S.V., Kirpichev I.V., Mikhailov D.V.

Ivanovo State Medical Academy of the Ministry of Health of Russia, Ivanovo, e-mail: drqueen@mail.ru

Injury of the anterior cruciate ligament of the knee joint (ACL of the knee joint) ranks second in frequency among all injuries of the knee joint. Most authors agree that there is no universal mechanism for choosing a strategy and tactics of treatment, timing and types of surgery, as well as ways to restore it. The ACL is one of the main anatomical structures that ensure the stability of the CS in the sagittal and horizontal planes. The main complaint and request of the patient when seeking medical help is a violation of the function of walking. Thus, objective gait markers can become the single instrumental criterion in the condition of the KS, which will provide multidisciplinary management of patients in the dynamics of treatment and recovery from ACL injury. The aim of the study was to determine the leading objective indicators of the walking pattern in patients with anterior cruciate ligament injuries. We examined 15 patients in the course of treatment for chronic ACL injury. The examination of walking was carried out using the system for analyzing the function of walking "Steadys" (LLC "Neurosoft", Ivanovo) with the registration of standard indicators. The control group consisted of 16 patients without CS pathology. Results. A universal methodological approach was the adoption of the axiom of a single kinematic chain in the event of a violation of the biomechanics of one limb and the alignment / reduction of asymmetry in this chain due to a healthy one. With this approach, a highly significant difference in walking pattern was established both within the experimental group and between the comparison groups. The so-called W-type of KS goniograms was identified, in which 2 additional teeth were formed during the support period, reflecting the phenomena of an attempt to reduce the instability of the KS. Thus, damage to the ACL of the CL can lead to significant disturbances in the biokinematics of walking, which reflects the processes of adaptation / disadaptation of the musculoskeletal system to the changed conditions of functioning as a result of injury.

Keywords: knee joint injury, anterior cruciate ligament, walking parameters, types of goniograms, inertial sensor.

Повреждение передней крестообразной связки (ПКС) занимает 2-е место по распространенности среди травм коленного сустава (КС) (до 50% от всех травм КС). Данный вид травм характерен для активно занимающихся спортом пациентов, что в среднем соответствует 30 случаям на 100 000 человек за год, и около 1 млн пациентов ежегодно оперируются по поводу разрыва ПКС. Большинство авторов сходится во мнении, что не существует универсального механизма выбора стратегии и тактики лечения, сроков и видов оперативного вмешательства, а также способов восстановления. Основная часть авторов сходится во мнении о значимости объективной оценки функции КС как на этапе выбора тактики лечения, так и на этапе восстановления [1; 2].

ПКС является одним из основных анатомических образований, обеспечивающих стабильность КС в сагиттальной и горизонтальной плоскостях. Повреждение данной структуры неминуемо приводит к биомеханическим нарушениям КС, что влечет развитие вторичных дегенеративно-дистрофических изменений, даже если сам момент травмы произошел без гемартроза [3]. Одним из наиболее эффективных методов, позволяющих устранить нестабильность сустава, является артроскопическое восстановление ПКС [4], но и в этом случае ощущается дефицит объективных методов оценки восстановления функции. Одним из комплексных клинико-инструментальных обследований, отражающих функцию КС, является исследование функции ходьбы. Ранее проведенное исследование показало эффективность инерциальных сенсоров для этого [5].

Цель исследования – определить ведущие объективные показатели паттерна ходьбы у пациентов с повреждениями передней крестообразной связки.

Материалы и методы исследования

Были обследованы 15 больных с повреждением ПКС, поступивших на оперативное лечение в ОБУЗ «Ивановский областной госпиталь для ветеранов войн» с 2020 по 2021 г. В качестве группы контроля привлечены 16 пациентов без травмы в КС (табл. 1).

Таблица 1

Характеристика групп наблюдения

Характеристики	Исследуемая группа (N=15)	Контрольная группа (N=16)
Пол (М/Ж)	9/6	7/9
Средний возраст	34,0±3,81 года	21,00±0,90 года
Спортивная травма	12	-
Бытовая травма	3	-

В большинстве случаев (80%) травма была получена во время занятия спортом, что согласуется с данными литературы, чаще страдали мужчины (60%). Все повреждения были подтверждены МРТ и при проведении артроскопии (как с диагностической, так и с лечебной целью). Обследование ходьбы проводилось накануне проведения хирургического вмешательства.

Паттерн ходьбы оценивался с использованием тренажера ходьбы с биологической обратной связью «Стэдис» (ООО «Нейрософт», г. Иваново) в комплектации «Оценка» (регистрационное удостоверение № РЗН 2018/7458 от 07.08.2018 г.). Для анализа использовались 5 инерциальных сенсоров «Нейросенс», которые устанавливались на пояснично-крестцовый отдел позвоночника и на симметричные участки бедер в средней трети и голеней. Пациенту предлагалось ходить по ровной поверхности (палата, коридор, зал ЛФК) в течение 2 минут в удобном темпе. Анализировались стандартные показатели, автоматически заносимые программой в протокол анализа ходьбы: временные параметры цикла шага (ЦШ), время ЦШ в сек.; пространственные – длина цикла шага (ДЦШ в см), скорость ходьбы («V» в км/ч), а также ритмичность (соотношение временных показателей по больной и здоровой сторонам). Фазовые периоды цикла шага представляли наибольший интерес (рис. 1):

- период опоры (ПО) – часть цикла шага (ЦШ), при котором конечность контактирует с опорой, в составе одиночной и двойной опоры по анализируемой конечности;
- период переноса (ПП) – часть ЦШ, при котором конечность не контактирует с опорой;
- период одиночной опоры (ОО) – часть ЦШ, при которой с опорой контактирует только одна конечность;
- период двойной опоры (ДО) – часть ЦШ при которой с опорой контактируют обе конечности.

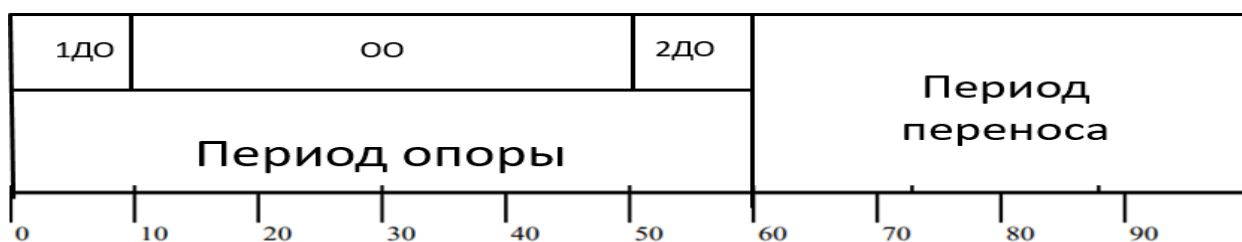


Рис. 1. Временные фазовые параметры ходьбы (1ДО – период первой двойной опоры, 2ДО – период второй двойной опоры, ОО – период одиночной опоры)

Единицами изменения были проценты от ЦШ, где за 100% принят полный ЦШ.

Среди пространственных характеристик наибольший интерес представляла циркумдукция, по сути – 1/2 от ширины/базы шага (рис. 2), где за ширину шага принимали расстояние от идентичных точек стопы при ходьбе во фронтальной плоскости. Данная

методика позволяла определить симметричность формирования полной ширины шага для пораженной и здоровой конечности.

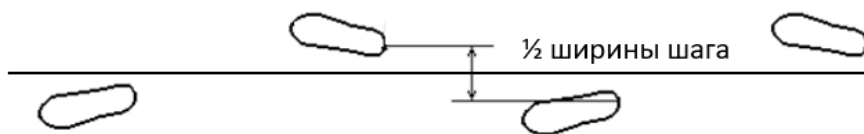


Рис. 2. Пространственные характеристики ходьбы

Для оценки кинематических характеристик, кроме стандартно рассчитываемых амплитуд сгибания/разгибания по плоскостям ($^{\circ}$), оценивали гониограммы КС. В норме за полный цикл шага при ходьбе отмечается 2 эпизода сгибания и разгибания КС. Первый эпизод сгибания, с меньшей амплитудой, происходит в период опоры, второй, со значительно большей амплитудой махового сгибания, - в период переноса. При оценке гониограмм определялась общая амплитуда движений во время ходьбы, амплитуда во время ПО и ПП (рис. 3).

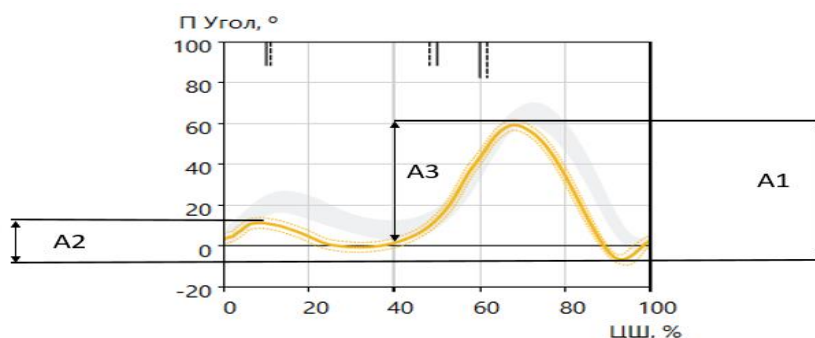


Рис. 3. Кинематические характеристики ходьбы: $A1$ – общая амплитуда;
 $A2$ – амплитуда в ПО; $A3$ – амплитуда в ПП

Все показатели сравнивали с аналогичными в группе контроля и между здоровой и пораженной конечностью. Полученные результаты обработаны стандартными методами вариационной статистики с помощью программы Statistica12. Вычисляли средние значения и стандартную ошибку среднего ($M \pm m$), сравнение независимых переменных проведено с использованием критерия Стьюдента. Уровень значимости принят 5%.

Результаты исследования и их обсуждение

Не установлено значимых различий во временных показателях ходьбы (ЦШ, шаг по обеим конечностям) с группой контроля, в то же время отмечалось уменьшение скорости ходьбы и длины цикла шага (ДЦШ). Ритмичность ходьбы находилась в диапазоне нормальных значений ($0,93 \pm 0,02$).

При сравнении временных/абсолютных характеристик между исследуемой и контрольной группой выявлено (табл. 2) увеличение периода опоры за счет периода двойной опоры (обе конечности в контакте с полом), но уменьшались (что неожиданно) периоды одиночной опоры и переноса. Все эти изменения фиксировались на фоне асимметрии между конечностями у пациентов в группе с повреждением ПКС КС.

Таблица 2

Результаты оценки временных характеристик ходьбы в контрольной и исследуемой группах

Показатель	Исследуемая группа (N=15)	Контрольная группа (N=16)	Достоверность
ПО (M±m)	65,04±0,59	62,73±0,21	p=0,0004
Разница ПО (M±m)	2,62±0,8	0,13±0,02	p=0,0031
ОО (M±m)	34,87±0,59	37,27±0,24	p=0,0003
Разница ОО (M±m)	2,6±0,8	0,12±0,02	p=0,0031
ДО (M±m)	30,17±1,32	24,32±0,52	p=0,0002
ПП (M±m)	34,95±0,59	37,99±0,27	p=0,0009
Разница ПП (M±m)	2,62±0,8	0,17±0,44	p=0,0036

Абсолютные/временные показатели ходьбы в сравнении конечностей в группе ПКС позволили выявить уменьшение периода опоры, в основном за счет снижения одиночной опоры на больной конечности, в то время как период переноса был увеличен. Данные результаты свидетельствуют о компенсаторной разгрузке поврежденной конечности во время ходьбы у исследуемых пациентов (табл. 3).

Таблица 3

Результаты временных характеристик анализа ходьбы в группе ПКС

Показатель	Больная конечность	Здоровая конечность	Достоверность
ПО (M±m)	64,84±0,48	66,24±1,01	p=0,013
ОО (M±m)	33,63±0,99	36,06±0,49	p=0,015
ПП (M±m)	36,15±0,49	33,76±1,01	p=0,013

Асимметрия $\frac{1}{2}$ ширины шага (циркумдукция) выявлялась у пациентов в обеих обследованных группах. Но в группе ПКС КС асимметрия циркумдукции наблюдалась у 10 больных, что составило 73,4%, а в группе контроля - только в 2 случаях, что составило 12,5% (p=0,0023). При этом ширина шага чаще (6 случаев) увеличивалась за счет здоровой конечности и только в 4 случаях - за счет больной (p=0,45).

Кинематические кривые движений в КС (гониограммы) в обеих группах наблюдения продемонстрировали уменьшение амплитуд общего объема движений, в периоды опоры и переноса в исследуемой группе, по сравнению с группой контроля (табл. 4). При этом наибольший разброс результатов исследуемых показателей между здоровой и больной конечностями выявлен в исследуемой группе.

Результаты оценки кинематических характеристик ходьбы
у пациентов в контрольной и исследуемой группах

Показатель	Исследуемая группа (N=15)	Контрольная группа (N=16)	Достоверность
Общая амплитуда (M±m)	62,93±4,4	65,06±0,95	p<0,001
Разница общей амплитуды (M±m)	7,8±1,43	2,56±0,18	p<0,001
Амплитуда в ПО (M±m)	19,43±1,54	22,06±0,60	p=0,001
Разница амплитуды в ПО (M±m)	5,00±1,09	1,06±0,06	p=0,0009
Амплитуда в ПП (M±m)	52,1±2,3	63,37±0,64	p<0,001
Разница амплитуды в ПП (M±m)	8,7±1,52	1,37±0,15	p<0,001

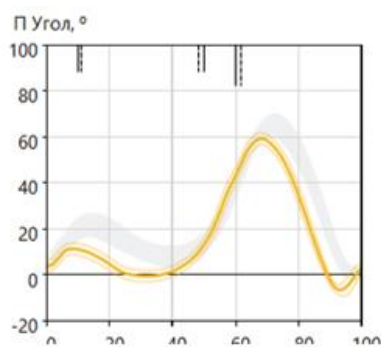
Ухудшение биокинематики со стороны травмы в виде уменьшения амплитуды сгибания/разгибания было очевидно, но статистически значимая разница выявлена между результатами в период опоры. В остальных случаях выявлена тенденция к увеличению общего объема движений и амплитуды в период переноса на здоровой ноге (табл. 5).

Таблица 5

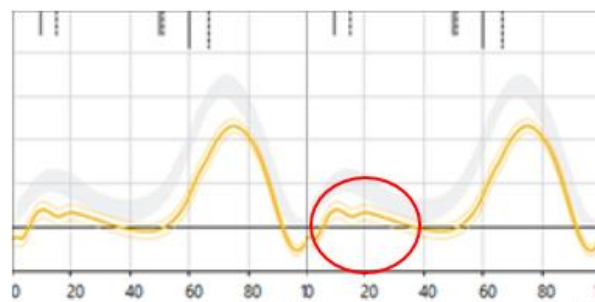
Результаты оценки кинематических характеристик ходьбы у больных исследуемой группы

Показатель	Больная конечность	Здоровая конечность	Достоверность
Общая амплитуда (M±m)	63,93±3,77	68,53±2,03	p=0,056
Амплитуда в ПО (M±m)	17,13±1,7	21,73±1,62	p=0,002
Амплитуда в ПП (M±m)	52,26±2,46	55±2,7	p=0,326

При анализе гониограмм нами выделены 2 ее типа. У всех пациентов в исследуемой группе установлена патологическая W-образная форма, отсутствующая в группе контроля. На данной форме гониограммы в начале первого периода опоры (2% ЦШ) появлялся дополнительный зубец, отражающий небольшое разгибание сустава, в дальнейшем до окончания периода двойной опоры происходило быстрое сгибание до максимума амплитуды сгибания в период опоры. При дальнейшем разгибании сустава появлялся дополнительный зубец, возникающий от 14-22% ЦШ (рис. 4.2). В контрольной группе во всех случаях фиксировали V-образную (нормальную) форму кривой, которая характеризовалась достаточно быстрым сгибанием в первые 8-14% ЦШ с хорошо определяемым максимумом сгибания и с последующим медленным разгибанием до 46-52% ЦШ [5] (рис. 4.1).



4.1



4.2

*Рис. 4. Варианты полученных гониограмм: 4.1 V-тип, 4.2 - W-тип
(для наглядности 2 ЦШ «больной» конечности представлены последовательно)*

ПКС КС являются важными анатомическими образованиями сустава, основной биомеханической функцией которых является ограничение чрезмерного смещения голени кпереди и кнутри относительно бедра. Таким образом, состоятельная ПКС предупреждает подвывихи и неустойчивость в КС при ходьбе, беге, прыжках, танцах, т.е. при изменениях направления движения. Без четкого понимания биомеханики травматизма крестообразных связок невозможно их предотвратить и, самое главное, эффективно восстановить. В нескольких исследованиях была предпринята попытка изучения кинематических движений в КС, определяемых проприоцепцией положения и характером жесткого взаимодействия с опорой при неправильном положении суставов относительно друг друга [6; 7]. Однако используемые технологии не в полной мере смогли отразить кинематику КС в общей кинематической цепи нижних конечностей. Значимым и во многом определяющим адаптивным механизмом является изменение паттерна ходьбы. Имеющиеся до настоящего времени технологии (например, видеоанализ) были ограниченно доступны. Технология инерциальных сенсоров позволила приблизить анализ ходьбы к пациенту, «в палату». Взгляд на ходьбу, как отражение изменений биомеханики в единой кинематической цепи, выявил феномены патологической ходьбы, отражающие кинематическую нестабильность КС при травме ПКС. Установлено, что изменения паттерна ходьбы в результате травмы ПКС носят обобщенный характер (для больной и здоровой конечности), что можно объяснить попыткой снизить асимметрию для восстановления сохранения энергоэффективности. Очевидно, что неповрежденная конечность имеет большие функциональные возможности и в состоянии «подстроиться» под травмированную, снижая биомеханическую «разницу». Основные изменения для травмы ПКС установлены в ПО и ПП для обеих конечностей (в сравнении с группой контроля). Алгоритм ходьбы изменяется таким образом, чтобы при увеличенных периодах ДО, ПП и уменьшенном ОО для больной конечности (что щадит сторону поражения)

асимметрия между конечностями была бы минимальна. Циркумдукция (половина базы шага) также отражает степень динамической нестабильности сустава. При асимметричном увеличении данного показателя в сторону «больной» или «здоровой» конечности изменяется площадь опоры во фронтальной плоскости, что в свою очередь изменяет постурологическую устойчивость (фронтальная нестабильность является маркером дегенеративных изменений в КС). В группе больных с травмой ПКС КС в 100% случаев установлен патологический W-образный тип гониограмм, с двумя дополнительными зубчиками «разгибания» в периоде опоры, демонстрирующих включение дополнительных мышечных групп для стабилизации КС, когда динамическая нестабильность ходьбы наиболее выражена. Установленные изменения паттерна ходьбы в группе пациентов с травмой ПКС КС отражают механизмы адаптации опорно-двигательного аппарата к изменившимся условиям функционирования.

Выводы

1. При объективном анализе ходьбы для пациентов с травмой ПКС КС характерны увеличенные временные фазовые характеристики - периода опоры цикла шага (в основном за счет периода двойной опоры) и уменьшенные - периодов одиночной опоры и переноса в сравнении с группой контроля.
2. Определено увеличение циркумдукции (1/2 ширины/базы шага) в 73,4% в группе больных с травмой ПКС КС, в основном за счет «здоровой» конечности.
3. Установлено уменьшение амплитуд объемов движений в коленном суставе как в общем цикле шага, так и по периодам опоры и переноса в кинематических показателях анализа ходьбы у пациентов с травмой ПКС КС.
4. Установлено, что у всех пациентов с травмой ПКС КС наблюдается патологический тип гониограммы (обозначенный как условно патологический W-тип), отражающей механизм стабилизации динамической нестабильности КС, возможно, за счет включения дополнительных мышечных групп.

Список литературы

1. Котельников Г.П. Посттравматическая нестабильность коленного сустава. Самара, 1998. 45 с.
2. Kannus P., Niemi S., Parkkari J., Palvanen M., Järvinen M., Vuori I. Unintentional injury death in an adult Finnish population 1971–1997 // *Epidemiology*. 2000. Vol. 11 (5). P. 598-602.
3. MARS Group. Predictors of clinical outcome following revision anterior cruciate ligament reconstruction // *J. Orthop. Res.* 2020. Vol. 38 (6). P. 1191–1203. DOI: 10.1002/jor.24562.

4. Михайлов И.Н., Пусева М.Э., Тишков Н.В., Монастырев В.В., Пономаренко Н.С., Бальжинимаев Д.Б. Современные способы тендопластики передней крестообразной связки (обзор литературы) // Acta Biomedica Scientifica. 2017. Vol. 2, Is. 6. DOI: 10.12737/article_5a0a864c6e0163.659987956468.
5. Кирпичев И.В., Королева С.В., Графинин М.С. Оценка ходьбы при застарелых травмах менисков коленного сустава с использованием технологии инерциальных сенсоров // Современные проблемы науки и образования. 2023. N2. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=32502> (дата обращения: 08.04.2023).
6. Paterno M.V., Rauh M.J., Schmitt L.C., Ford K.R., Hewett T.E. Incidence of second ACL injuries 2 years after primary ACL reconstruction and return to sport // Am. J. Sports Med. 2014. Vol. 42 (7). P. 1567–1573. DOI: 10.1177/0363546514530088.
7. Бондаренко К.К., Бондаренко А.Е. Рациональность передвижений хоккеистов в зависимости от проприоцепции коленных суставов // Инновационные технологии в спорте и физическом воспитании подрастающего поколения: матер. IX Всерос. науч.-практ. конф. М.: Первый том, 2019. С. 501–504.