

УДК 531/534:[57+61]

ИНФОРМАТИВНОСТЬ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОХОДКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАТОЛОГИИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ

А.П. Ефимов

Межрегиональный центр восстановительной медицины и реабилитации, Россия, 603087, Нижний Новгород, Казанское шоссе, 16/1, e-mail: antef@nm.ru

Аннотация. Проведены исследования биомеханических параметров походки при плоскостопии, деформирующих артрозах и переломах нижних конечностей методом акселерографии. Представлен анализ результатов. Выделены наиболее информативные органоспецифические биомеханические параметры походки при заболеваниях и последствиях переломов. Доказано, что биомеханика движений головы является информативным показателем симметричности локомоции, интегративно отражает всю совокупность компенсаторных и адаптивных явлений в опорно-двигательной системе при патологии. В свою очередь, характер локомоций в норме и при патологии оказывает значительное влияние на биомеханику головы и головного мозга.

Ключевые слова: акселерография, престограмма, толчковое ускорение.

ВВЕДЕНИЕ

Ходьба является высокоавтоматизированным системным процессом, в ходе которого происходит многопараметрическое взаимодействие большого числа элементов опорно-двигательного аппарата и нервных центров. Несмотря на сложность процесса, двигательное управление ходьбой человека в норме осуществляется по четким стандартам, и стереотип походки отличается высокой отрегулированностью временных, пространственных, кинематических, динамических и регуляторных параметров. При патологии этот стереотип нарушается и весьма быстро возникает новый – патологический – тип походки, изучая особенности которого, можно диагностировать и этиологию, и патогенез заболевания, а также успешно производить функциональную диагностику индивидуальных и клинических вариантов походки [8].

Информативная весомость биомеханических параметров походки давно привлекает внимание ученых. Тем не менее до сих пор не установлены функциональные инвариантные параметры, которыми пользуется управляющий аппарат двигательной системы. Их определение имеет большой утилитарный смысл, дает практикам короткий путь к главным информативным параметрам оценки походки и избавляет от обилия малоценной второстепенной информации. Иными словами, практических врачей (а также спортивных тренеров, инструкторов лечебной физкультуры и др.) до сих пор интересует обнаружение высокоинформативных медико-биологических параметров биомеханики походки.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В течение многих лет автором проводятся исследования детей и взрослых биомеханическими методами: ихнография (исследование походки и формы стопы по ее отпечаткам), электроподография (исследование контура стопы и отпечатка подошвы), электрогониография натуральная и дифференцированная (исследование амплитуды и углов движения суставов конечностей), акселерография (исследование ускорений), динамография (исследование силы мышц) походки в норме и при заболеваниях и травмах нижних конечностей.

Ниже в табл. 1 приведены перечень исследуемой патологии у детей и взрослых и количество случаев (пациентов), послуживших для анализа и представления в данной статье.

Метод акселерографии походки (рис. 1) признан одним из наиболее информативных в исследовании походки и функционального состояния опорно-двигательной системы в целом. В отличие от традиционных методов изучения двигательной активности человека, метод основан не на исследовании параметров самого движения, а на анализе вибрационных ускорений, сопровождающих локомоционные акты, т.е. сравнительно низкоамплитудных и высокочастотных компонентов движения, не находящихся под прямым контролем сознания. Вибрационные ускорения регистрируются при выполнении как естественных движений, так и специальных двигательных тестов. При этом исследуется асимметрия вибраций, вызываемых движениями правых и левых конечностей.

Для оценки управляющих и исполнительных элементов опорно-двигательной системы исследуются спектральные характеристики получаемых вибрационных сигналов, сопровождающих локомоционные акты. В качестве первичных преобразователей механических колебаний тела используются датчики-пьезоакселерометры, которые размещаются непосредственно на теле человека и не ограничивают его двигательной активности (рис. 2). В качестве регистраторов использованы устройства общетехнического назначения (серийные анализаторы спектра СК4 72/2).

В сочетании со специальными клиническими приемами метод стал основой создания принципиально новых методик обследования пациентов при патологии опорно-двигательного аппарата, способа биомеханической диагностики функционального состояния опорно-двигательной системы и т.д.

Таблица 1

Группы наблюдения по нозологиям (классификация болезней)

№ п/п	Диагноз	Количество
1	Здоровые	300
2	Перелом костей стопы	170
3	Перелом костей голеностопного сустава	344
4	Перелом большеберцовой кости	86
5	Перелом бедра	45
6	Перелом костей таза	23
7	Деформирующий артроз тазобедренного сустава	176
8	Деформирующий артроз коленного сустава	256
9	Деформирующий артроз голеностопного сустава	128
10	Плоскостопие (дети и взрослые)	1460
ВСЕГО		2988

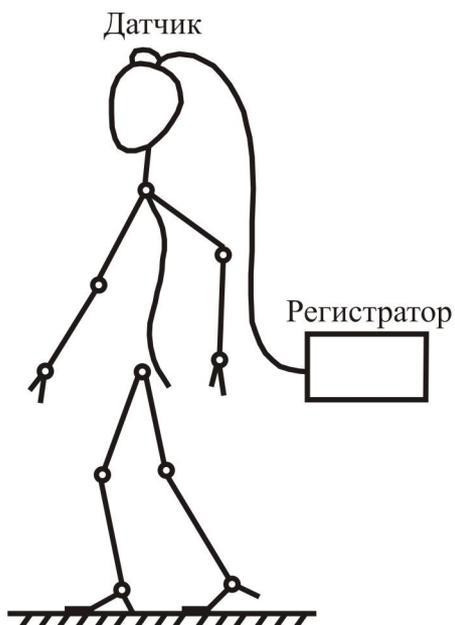


Рис. 1. Акселерография походки

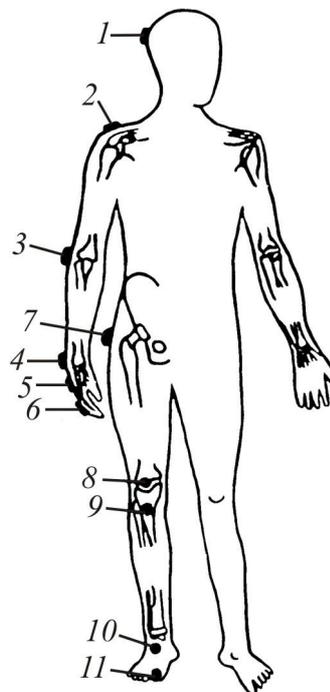


Рис. 2. Точки локализации датчика на теле человека для исследования опорно-двигательной системы

Метод применим для изучения толчковой функции нижних конечностей, т.е. регистрации резкости – физической величины, представляющей скорость изменения ускорения, измеряемой в м/с^3 . Датчик укрепляют на участке с поверхностным залеганием кости, вследствие чего информация о толчке сохраняется и не оказывает существенного влияния на формирование сигнала ускорения. Оценка толчковой функции по резкости оказывается более точной, чем по ускорению. Для получения данных датчик укрепляют в необходимой для изучения точке, подключают к регистратору. Пациенту предлагается пройти 8–10 м присущей ему походкой, во время ходьбы производят регистрацию электрических сигналов, получаемых с выхода датчика, и обозначают их принадлежность толчкам правой и левой ног. Записывают калибровочный сигнал (1 мВ). Полученная графическая запись – престограмма – состоит из отдельных пиков, соответствующих толчкам правой и левой ног. При расположении датчика на темени регистрируются передние толчки ног, а при расположении на звеньях ног – как передний, так и задний толчки.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Начнем с того, что полученные в данной работе результаты позволяют сделать новые выводы из проведенных ранее исследований, где применялись методы, защищенные авторскими свидетельствами [1, 2–4, 5, 7, 9].

В свое время фундаментальность ряда обнаруженных фактов не была осознана с позиций их значимости для двигательного управления нижними конечностями и для принятия их в качестве предикторов патологии опорно-двигательной системы.

Как показывает табл. 2, при плоскостопии происходят фундаментальные явления:

1. Адаптивно снижается толчковая сила ног во время ходьбы.
2. По мере развития плоскостопия снижается рессорная функция стопы. Разница ускорения стопы и голени снижается от 18 до 12 g соответственно.
3. Пропорционально уменьшается амортизирующая роль стоп.

Таблица 2

Толчковые ускорения в сегментах тела в норме и при плоскостопии

№ п/п	Сегменты тела	Норма, g	Плоскостопие		
			I степени	II степени	III степени
1	Голова	1±0,5	2±1	3±1,5	4±2
2	ШОП	2±0,5	3±1	4±1,5	6±2
3	ГОП	3±0,5	4±1	5,5±1,5	7,5±2
4	ПОП	4±0,5	5,5±1	7±1,5	9±2
5	Таз	5±0,5	7±1	9±1,5	11±2
6	Бедро	6±0,5	8±1	10±1,5	12±2
7	Голень	7±0,5	9±1	11±1,5	13±2
Амортизация		-12	-9	-6	-3
8	Стопа	18±1,5	16±1	14±2	12±3

Примечание: ШОП – шейный отдел позвоночника, ГОП – грудной отдел позвоночника, ПОП – поясничный отдел позвоночника.

4. Постепенно увеличивается толчковая нагрузка на голове с 0,5–1,0 до 2–3 g.

5. Толчковая нагрузка на головной мозг нарастает, что сопровождается повышением внутричерепного давления, ухудшением метаболизма головного мозга, снижением кровоснабжения головного мозга, проявляется головной болью, у детей – задержкой развития психических функций, моторного, речевого, интеллектуального развития.

6. Адаптивная перестройка мышечной амортизации аппарата ног и позвоночника недостаточна для эффективной защиты головного мозга.

При деформирующих заболеваниях суставов нижних конечностей закономерно снижается амплитуда и изменяется характер акселерограммы стопы, прежде всего пораженной нижней конечности. Для здоровой или незначительно пораженной второй конечности также характерны уменьшенные величины толчкового ускорения. Это наблюдение свидетельствует о формировании при деформирующих заболеваниях щадящей походки, защищающей суставы, пораженные хронической воспалительной болью (рис. 3).

При исследованиях переломов нижней конечности толчковые движения больной и здоровой ног резко отличаются в начале периода реабилитации. При этом величина толчков поврежденной нижней конечности резко уменьшается, а здоровой – увеличивается, становясь намного больше нормы – до 1,5–2,0 раз (рис. 4).

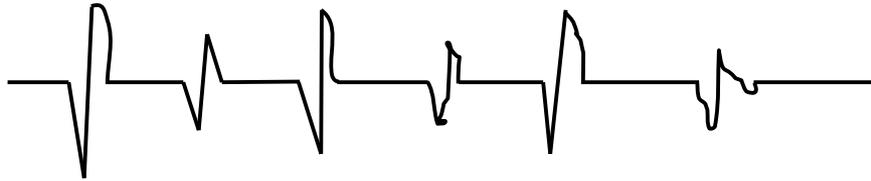
Компенсаторное двигательное увеличение толчков (переднего и заднего) здоровой нижней конечности ведет к ее перегрузкам, вызывает боли, в последующем явления деформирующего артроза. Компенсаторные асимметрии всей ходьбы вызывают нарушения в проксимальных суставах конечности и позвоночнике, даже в руках.

Акселерография головы при ходьбе людей после переломов ног является весьма информативной. Она показывает две особенности:

- высокую информативность для интегральной оценки походки;
- асимметрию движений опорно-двигательной системы всего тела с учетом всех компенсаторных явлений, создающих признаки хромоты (рис. 5).

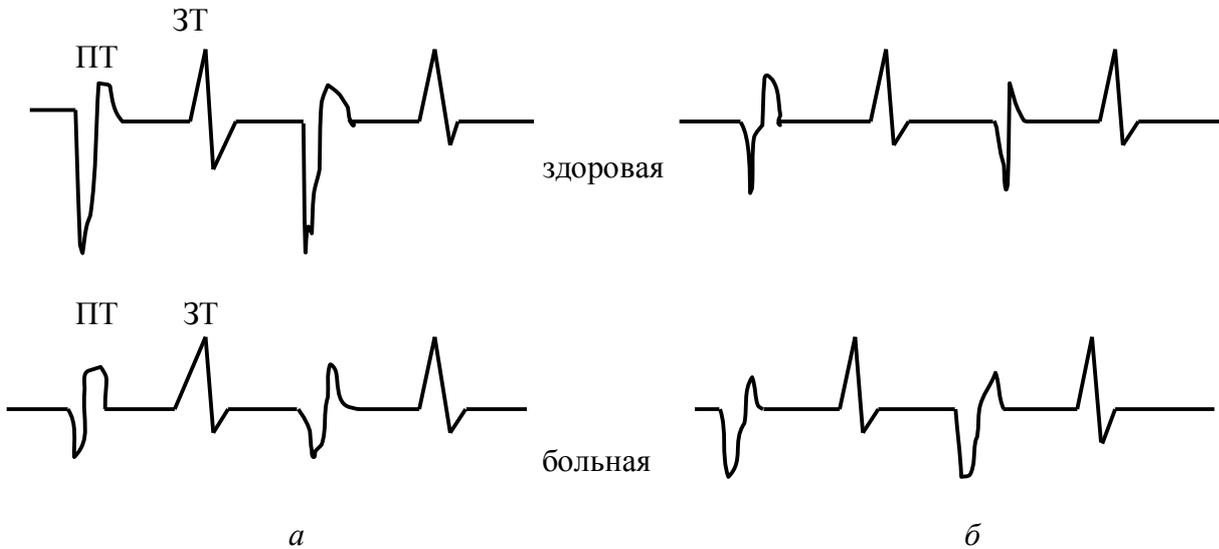


a



б

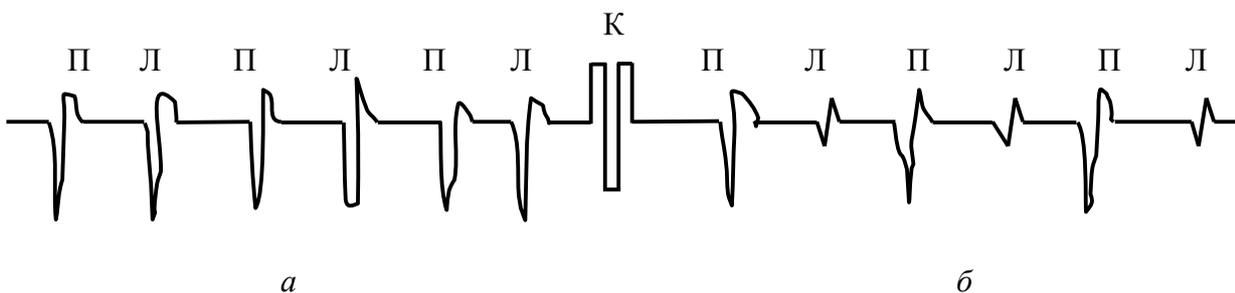
Рис. 3. Акселерограмма головы: *a* – в норме, *б* – при деформирующем гонартрозе (воспалительном процессе в коленном суставе) (патология – снижение толчкового ускорения левой нижней конечности)



a

б

Рис. 4. Акселерография при переломах (больной и здоровой) нижних конечностей: *a* – в начале лечения, *б* – в стадии завершения реабилитации; ПТ – передний толчок, ЗТ – задний толчок



a

б

Рис. 5. Акселерограмма головы при ходьбе в норме (*a*) и при патологии (хромоте) (*б*): П – правая нога, Л – левая нога, К – калибровка

Акселерограмма головы отличается тем, что на кривой имеется только ускорение переднего толчка обеих конечностей в норме. Зубцы акселерограммы одинаковые, симметричные (см. рис. 5, *а*). При хромоте на больной конечности зубцы акселерограммы в несколько раз меньше, чем на акселерограмме здоровой конечности (см. рис. 5, *б*). По мере восстановления хромота исчезает, высота зубцов акселерограммы головы выравнивается. Но зубцы акселерограммы больной конечности имеют менее крутой подъем, скорость нарастания акселерограммы ниже по сравнению со здоровой нижней конечностью. Для более строгого и четкого выявления такой асимметрии начали регистрировать $\frac{da}{dt}$ – производную ускорения, измеряемую в мм/с³,

показатель, названный «резкостью». По аналогии с техническим применением этого параметра регистрацию резкости назвали престографией. На рис. 6, *б* приведена престограмма ходьбы больных с переломами нижней конечности на этапе восстановления. Как видно, симметрия величин ускорения зубцов на акселерограмме не сопровождается соответствующей симметрией толчков престограммы. Данный феномен назван «скрытой хромотой».

Наличие скрытой хромоты характеризует неполноту восстановления прочности костной мозоли, а показатель резкости – м/с³ – является наиболее информативным показателем биомеханического состояния кости как живой системы, пользующейся более быстрыми производными динамических сигналов своего адаптивного управления. Этот показатель впервые обнаружен авторами и введен в медицинскую практику [2].

Изучение ходьбы больных с деформирующими заболеваниями суставов нижних конечностей показало, что наиболее информативными параметрами для суставов являются электрогониографические показатели. Среди них стоит отметить показатель угловой скорости (град/с). Для примера приведем гониограммы коленного сустава при ходьбе (рис. 7).

На гониограмме коленного сустава имеются две волны: 1 – амортизационный подгиб и 2 – перенос свободной нижней конечности. При деформирующем артрозе значительно меняется амортизационный подгиб – резко ускоряется I фаза (сгибание), II фаза (разгибание) замедлена. В соответствии с этим угловая скорость сгибания

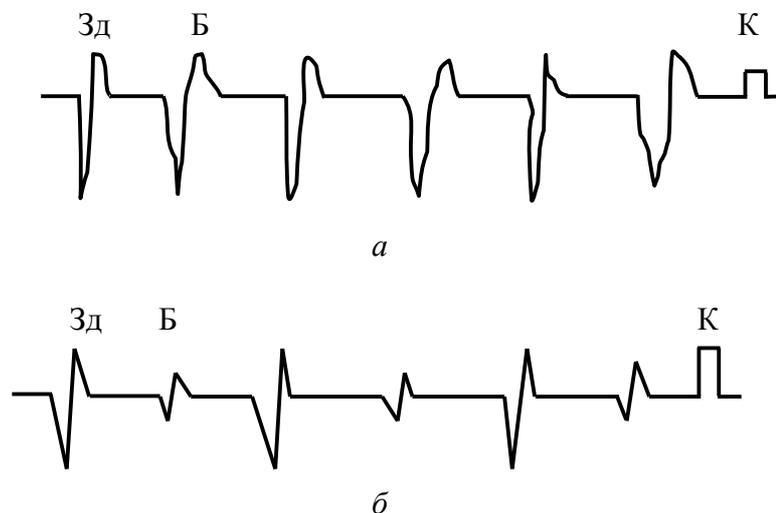


Рис. 6. Престограмма, выявляющая скрытую хромоту у одного и того же больного: *а* – акселерограмма здоровой и больной ног; *б* – престограмма здоровой и больной ног; Зд – здоровая нога, Б – больная нога, К – калибровка

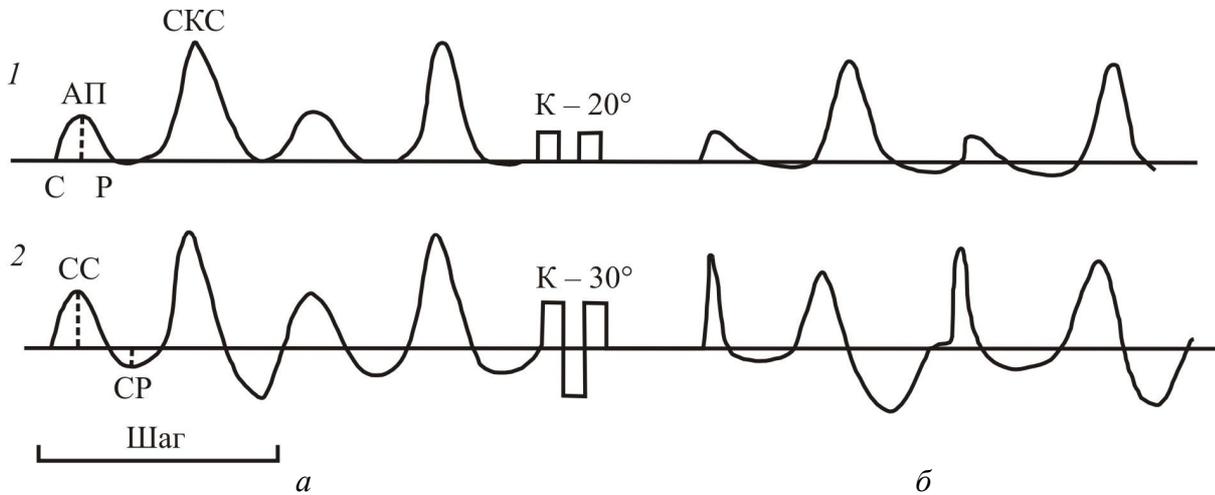


Рис. 7. Гониограммы коленного сустава в норме (а) и при патологии (деформирующий артроз) (б): 1 – межзвеновый угол коленного сустава при ходьбе; 2 – угловая скорость коленного сустава при ходьбе; АП – амортизационный подгиб; СКС – сгибание коленного сустава в периоде свободного переноса ноги; С – сгибание; Р – разгибание; К – калибровка; СС – скорость сгибания; СР – скорость разгибания

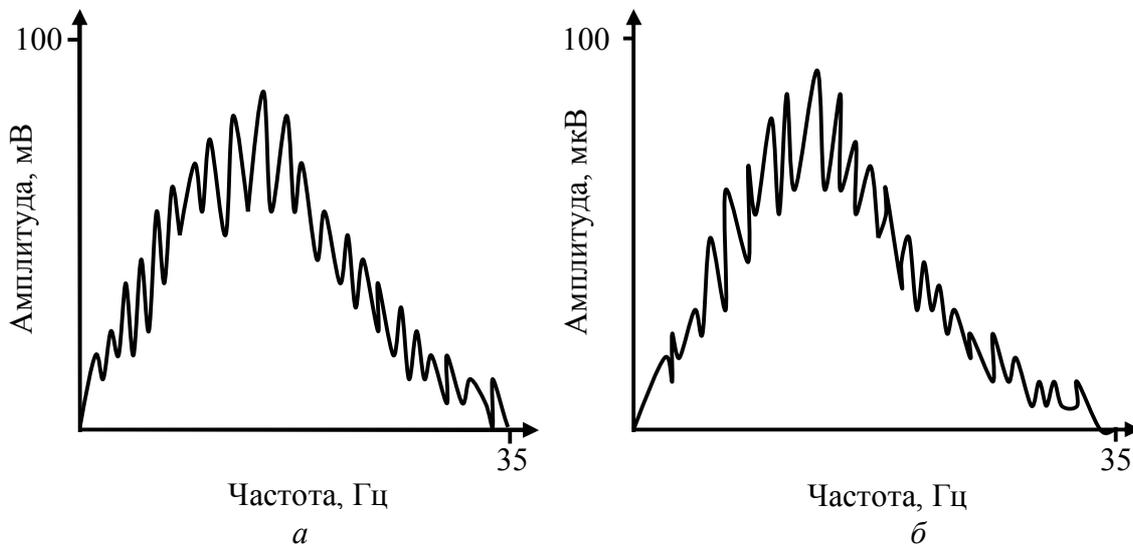


Рис. 8. Амплитудно-частотная спектрограмма: а – престограммы; б – электроэнцефалограммы

возрастает в 2–3 раза, а угловая скорость разгибания в 2–3 раза замедляется. Их взаимоотношение, равное в норме 1,5–2,0, становится 4–6 и 8 ед. Данный коэффициент соотношений взят авторами как диагностический критерий ранней диагностики деформирующего артроза коленного сустава [3]. На практике показатель проявил очень высокую информативность и надежность в ходе реабилитации подобных пациентов.

Аналогичные соотношения скорости амортизационного сгибания и разгибания прослежены для тазобедренного и голеностопного суставов.

Весьма любопытной является амплитудно-частотная спектрограмма [10] престограммы головы при ходьбе (рис. 8, а). Она полностью схожа с амплитудно-частотной спектрограммой электроэнцефалограммы моторных зон коры головного мозга (рис. 8, б).

В настоящее время аналогия эта изучается авторами в процессе исследования биомеханики головного мозга.

Выводы

1. Наиболее информативными органоспецифическими биомеханическими параметрами у больных с заболеваниями и последствиями переломов нижней конечности являются: а) угловая скорость для суставов (град/с); б) ускорение угловое и линейное – для мышц (м/с^2); в) резкость – для костей (м/с^3).

2. Рессорный свод стопы и амортизационная роль мышц ног и позвоночника при патологии направлены на снижение толчковых нагрузок на голову и головной мозг, что особенно заметно при выраженном плоскостопии.

3. Биомеханика движений головы интегративно отражает всю совокупность компенсаторных и адаптивных явлений в опорно-двигательной системе при патологии, является информативным показателем симметричности локомоции.

4. Характер локомоций в норме и при патологии оказывает значительное влияние на биомеханику головы и головного мозга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефимов А.П., Анишкина Н.М., Антонец В.А. Биомеханическая диагностика нарушений двигательной функции верхней конечности человека: метод. рекомендации МЗ СССР. – Горький, 1986. – 16 с.
2. Ефимов А.П., Ахмедов Ш.М., Анишкина Н.М., Антонец В.А., Докторов П.С. Способ диагностики заболеваний костно-суставного аппарата нижних конечностей человека: а.с. № 1251855 СССР, МКИ А1 А 61 В 5/00, 23.08.1986.
3. Ефимов А.П., Ахмедов Ш.М. Способ ранней диагностики деформирующего артроза коленного сустава: а.с. № 1191064 СССР, МКИЗ А 61 В 5/10, 15.07.1985.
4. Ефимов А.П., Буданова Т.Б., Анишкина Н.М., Антонец В.А., Докторов П.С., Краснощеков И.П. Способ выявления болевой реакции при поражениях конечностей: а.с. № 1344317, 11.03.1985.
5. Ефимов А.П., Буданова Т.Б., Иоффе Д.И., Шмонин А.А., Анишкина Н.М., Антонец В.А. Способ определения времени прекращения иммобилизации конечности при переломах: а.с. № 1397022, 14.07.1986.
6. Ефимов А.П., Буданова Т.Б., Шмонин А.А., Пономарева Е.А. Комплексная оценка двигательной функции кисти: метод. рекомендации МЗ РСФСР. – Горький, 1987. – 10 с.
7. Ефимов А.П., Пономарева Е.А. Способ диагностики синдрома вертебробазилярной недостаточности у больных с остеохондрозом позвоночника: патент № 2123283, 15.07.1997.
8. Ефимов А.П. Семейная реабилитация взрослых больных и инвалидов: пособие. – Н. Новгород: Изд-во Нижегородской гос. мед. акад., 2006. – 180 с.
9. Ефимов А.П., Сингосина Т.Б., Анишкина Н.М., Антонец В.А., Серебрякова Н.Г., Краснощеков И.П., Докторов П.С., Пономарева Е.А. Способ выявления болевой реакции при поражениях конечности: метод. рекомендации МЗ РСФСР. – Горький, 1989. – 8 с.
10. Ефимов А.П. Устройство для оценки состояния нервно-мышечной системы человека: патент на полезную модель № 58022, 03.08.2005.

INFORMATIVITY OF BIOMECHANICAL PARAMETERS OF GAIT FOR THE ESTIMATION OF THE LOWER EXTREMITIES PATHOLOGY

A.P. Ephimov (Nizhni Novgorod, Russia)

Research of biomechanical parameters of gait is carried out at flatfoot, deforming arthrosis and fracture of the lower extremities by an accelerography method. The analysis of results is presented. The most informative parameters of gait are allocated. It is proved biomechanics of head motions is informative attribute of locomotion symmetry, it reflects integratively the whole totality of compensatory and adaptive phenomena in locomotorium in normal and at pathology. For its turn, locomotion character in normal and at pathology influences considerably biomechanics of head and brain.

Key words: accelerography, prestogram, push acceleration.

Получено 08 октября 2011