

Диалог Ортопеда и Биомеханика

© В.Е. Беленький, Г.В. Куропаткин, 1994

В.Е. Беленький, Г.В. Куропаткин

Что такое ходьба

Центральный институт травматологии и ортопедии им. Н.Н. Приорова, Москва; Самарская областная клиническая больница

Ортопед (обращаясь к биомеханику). Из вашей лаборатории к нам поступают результаты исследования ходьбы наших пациентов. Приводятся показатели, характеризующие этот процесс. Но я не умею читать ваши цифры. Ваша терминология мне незнакома. Мне ясно, что главное для ортопеда и травматолога — восстановить такой важный для человека процесс, как ходьба. Но когда я задумался над этим, казалось бы, очевидным положением, то понял, что я не знаю сути этого процесса. А тут еще не понятные для меня результаты ваших исследований. Расскажите, что такое ходьба.

Биомеханик. Хорошо. Предлагаю следующий план нашего разговора:

- временная структура шага;
- кинематика ног, таза и позвоночника;
- внешние силы, опорные реакции ног, работа мышц;
- нога как амортизирующая система;
- движение звеньев тела при ходьбе во фронтальной плоскости.

О. Начнем двигаться вперед.

Б. Ходьба — основной вид локомоций человека. Этот процесс...

О. Подождите. Давайте двигаться медленно, размеренным шагом, иначе мы все время будем останавливаться. Что такое локомоция?

Б. Совокупность согласованных движений, с помощью которых животное или человек перемещается в пространстве. Что же касается остановок, то они нам не мешают: дальше уйдем. Так что задавайте вопросы по ходу беседы.

Продолжим. Ходьба — периодический процесс. За цикл ходьбы принимают время двойного шага — шага левой и правой ног. В этом цикле для каждой ноги различают опорное и переносное время. В свою очередь, опорное время большинство исследователей делят на фазы опоры на пятку, на всю стопу и на носок. Длительность фаз выражают в процентах.

О. За 100% принимают длительность опорного периода шага?

Б. Нет. Время двойного шага. Началом цикла является момент касания пола пяткой той или другой ноги. В ходьбе есть момент, когда на опоре находятся сразу обе ноги — двухопорный период шага. Это отличительный



признак ходьбы. При беге такого периода нет. Когда скорость ходьбы увеличивается, двухопорный период шага уменьшается. Обычно, т.е. при среднем темпе ходьбы, отношение двух-опорного времени к одноопорному составляет 1:4.

О. Темп ходьбы — это число циклов (двойных шагов) за минуту?

Б. Нет. Число одиночных шагов в минуту. Средний темп — 80—100 шагов в минуту.

Мы с вами рассмотрели временную структуру шага. Теперь поговорим о кинематике звеньев тела. Начнем с ног. Вот графики изменения межзвевных углов ног (рис. 1). Под графиками подограмма.

О. Глядя на графики, можно сказать, что движение в суставах происходит и в период переноса конечности, и в период опоры.

Б. Вы правы. Самый большой размах движений совершается в коленном суставе (60—70°), меньший — в тазобедренном (30—40°). Наиболее сложна кинематика голеностопного сустава. Полный размах движений в нем — 25—30°.

О. Что при всех этих движениях ног происходит с тазом? Как он участвует в ходьбе?

Б. Таз совершает небольшие, но сложные движения. Их целесообразно рассматривать одновременно с движениями позвоночника. Взгляните, пожалуйста, на графики — это гироскопические кривые (рис. 2) и на этих вот шагающих человечков (рис. 3).

О. Любопытные рисунки. На них сразу все видно.

Б. Тогда расскажите, что вы видите. Пользуйтесь и графиками, и рисунками.

О. Во-первых, таз и позвоночник перемещаются во всех трех плоскостях. Переднезадние наклоны невелики — всего до 3°, а вот скручивание по оси и наклоны в стороны вдвое больше. Во-вторых, можно сказать, что форма позвоночника постоянно меняется. В сагиттальной плоскости изменения незначительны, а вот во фронтальной позвоночник выглядит то как буква S, то как буква C. Любопытно: в момент опоры человека на одну ногу возникает своего рода «тренделенбург».

Б. Вас это удивляет?

О. В этот период шага надо перенести неопорную ногу и не задеть пол. А таз не поднимается, а опускается на неопорной стороне.

Б. Но человек сгибает ногу в коленном суставе и легко решает эту задачу. Энергетически так выгоднее. Так что же «в-третьих»?

О. В-третьих, позвоночник при каждом шаге скручивается по оси то в одну, то в другую сторону и каждый раз наклоняется в сторону опорной ноги. Но все эти графики и позиции человека трудно запомнить.

Б. А вы и не запоминайте. Когда возникает вопрос, сравнивайте графики своего больного с графиками здорового человека и делайте выводы.

Дальше у нас по плану — динамические характеристики ходьбы. Действие внешних сил.

О. Если есть внешние силы, то есть и внутренние. Сначала давайте разложим все по полочкам.

Б. Так и сделаем. К внешним силам следует отнести аэродинамические силы (сопротивление воздуха), вес тела и силу инерции. При опоре ноги возникает сила реакции опорной поверхности, действующая на стопу. Реакция опоры отражает действие всех внешних сил, приложенных к человеку при локомоциях. Внутренние силы — это усилия мышц, необходимые в данном случае для реализации процесса ходьбы. Но о них потом. А сейчас — об опорных реакциях ног.

О. Могли бы вы нарисовать их графики?

Б. Они у меня есть (рис. 4). Опорная реакция ноги разложена на три составляющие: вертикальную, продольную и поперечную. Основными элементами опорных реакций являются передний и задний толчки ног — они отчетливо видны на рисунке. В момент переднего толчка тяжесть тела как бы сосредоточивается над ногой, вынесенной вперед. Но на нее действует не только вес тела, но и динамический компонент.

О. Значит, человек не просто ставит ногу, а как бы падает на нее?

Б. И тем сильнее, чем больше скорость ходьбы. Теперь о заднем толчке. В конце опорного периода благодаря сокращению трехглавой мышцы голени происходит быстрое сгибание стопы в голеностопном суставе — создается задний толчок, и нога отрывается от опоры.

О. Что же обеспечивает движение тела вперед?

Б. В момент переднего толчка опорная реакция направлена вверх, медиально и назад (движение притормаживается), а в момент заднего толчка — вверх, медиально и вперед. При среднем темпе ходьбы вертикальная составляющая опорной реакции равна 110—120% от веса тела, продольная составляющая — 15—20%, а поперечная составляющая — 3—5%.

О. Мне ясно, что максимум переднего толчка приходится на пятку. На какую часть стопы действует максимум опорной реакции в момент заднего толчка?

Б. На область плюснефаланговых суставов.

О. Можно ли сказать, что момент переднего толчка — это пассивная фаза опоры, а момент заднего толчка — активная фаза?

Б. Нет и нет. Я сейчас покажу вам схему основных волн электрической активности мышц при обычной ходьбе (рис. 5). Рассмотрим деятельность мышц с позиции их функциональной значимости.

О. Итак, мы сейчас перешли к анализу работы мышц ног и туловища? О работе икроножной мышцы вы уже рассказывали. Ясно, на что нацелена ее активность. Но, оказывается, все мышцы ноги работают в основном в начале опорного периода. Зачем им тратить энергию при соприкосновении ноги с поверхностью опоры?

Б. Нога — многозвенная система. Она находится в устойчивом положении лишь при блокировании суставов. Эту задачу и решают мышцы в весьма ответственный момент, когда нога, как эстафету, принимает на себя нагрузку тяжести тела.

О. Вот что еще вызывает недоумение: в переносный период шага, когда нога сгибается и разгибается в суставах, практически только передняя большеберцовая и длинная малоберцовая мышцы активны. Спрашивается, почему «молчат» мышцы бедра и спины, ведь их задача — перенести ногу над опорой, наклонить туловище в нужную сторону.

Б. Сначала я расскажу о мышцах голени, а потом о всех других мышцах. Передняя большеберцовая мышца при переносе ноги обеспечивает разгибание стопы, а лучше сказать, подъем носка. Благодаря этому стопа не задевает о пол.

О. Но одновременно с передней большеберцовой мышцей активен ее антагонист — длинная малоберцовая мышца.

Б. Такое взаимодействие прослеживается и на мышцах бедра. По всей вероятности, одновременное участие сгибателей и разгибателей обеспечивает плавное, целенаправленное движение в суставе. Согласитесь, что крутить руль автомобиля лучше двумя руками.

О. С мышцами голени ясно. А как все же объяснить

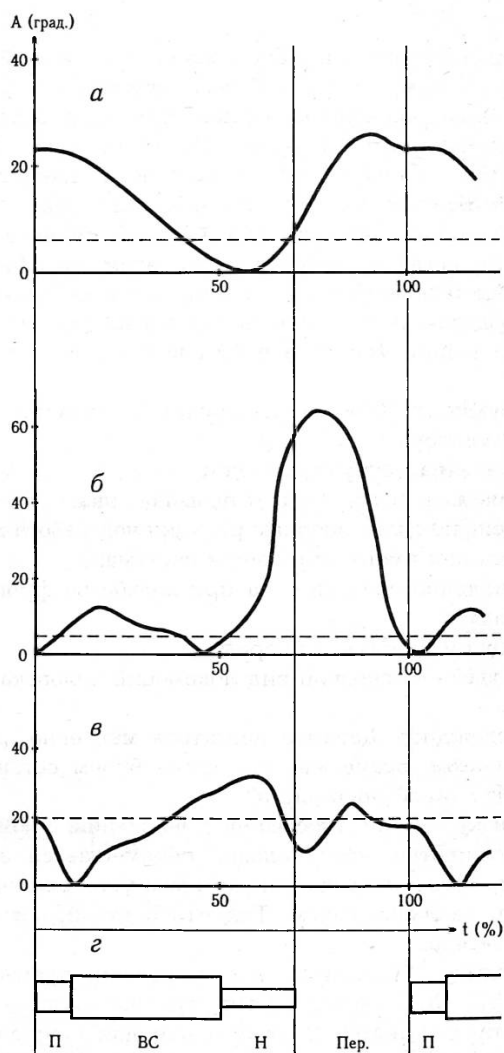


Рис. 1. Изменение межзвевных углов ног при ходьбе.

По оси абсцисс — время (% к длительности двойного шага), по оси ординат — амплитуда (в градусах); а — тазобедренный, б — коленный, в — голеностопный угол, г — подопрама; пунктирные линии соответствуют значениям углов удобной стойки человека.

Здесь и на рис. 2, 4, 5: П — перекал через пятку, ВС — опора на всю стопу, Н — перекал через носок, Пер. — переносный период.

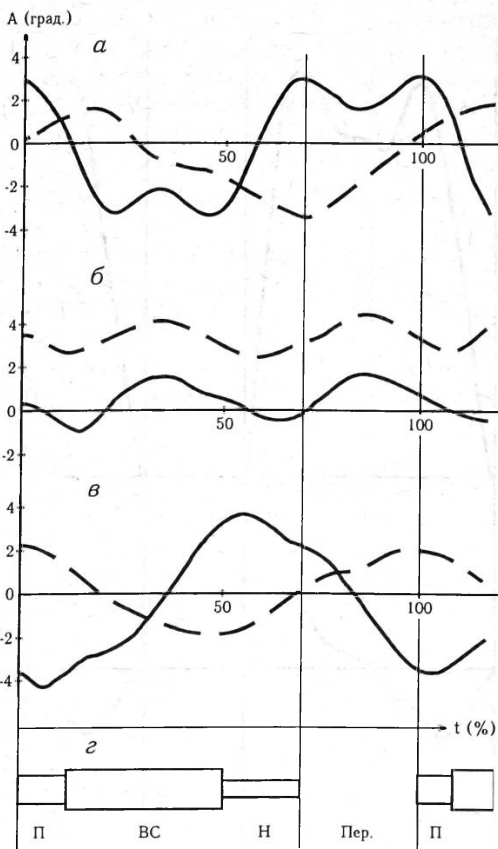


Рис. 2. Угловые движения таза (сплошные линии) и верхнегрудного отдела позвоночника (пунктирные) в пространстве при ходьбе: а — во фронтальной плоскости, б — в сагиттальной, в — в горизонтальной; г — подограмма.

По оси абсцисс — время (в % к длительности двойного шага), по оси ординат — амплитуда (в градусах).

бездействия других мышц в переносный период шага?

Б. Не обвиняйте их в полном бездействии. Мышцы бедра, да и все другие мышцы, как это видно из рисунка, активны в конце опорного и начале переносного периода. Но, действительно, активность их в несколько раз меньше, чем в начале шага.

О. Так когда же мышцы более активны — когда дают толчок движению или когда его приостанавливают?

Б. Если сопоставить кинематические кривые с волнами электрической активности мышц, то можно убедиться в том, что основная энергия мышц бедра, а особенно мышц спины тратится не на создание движения, а на притормаживание звеньев тела. Иначе говоря, мышцы работают преимущественно в уступающем режиме, контролируя скорость и амплитуду движения.

О. Это, я бы сказал, неожиданное для меня заключение.

Б. Итак, глобальная задача мышц — обеспечить необходимое для ходьбы движение звеньев тела. Задача трехглавой мышцы голени — создать задний толчок, запустить движение, а задача всех остальных мышц ноги, спины и живота — рационально построить движение звеньев тела и тем самым создать условия для реализации последующего шага.

О. Какова наша следующая рубрика? «Нога как амортизирующая система». По всей вероятности, вы хотите рассказать о рессорной функции стопы?

Б. Нет, о других амортизаторах. Представим ногу в

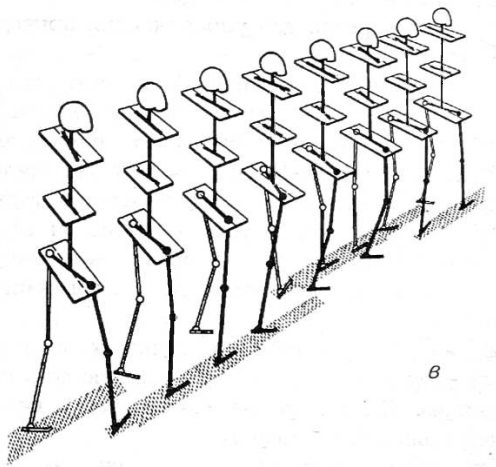
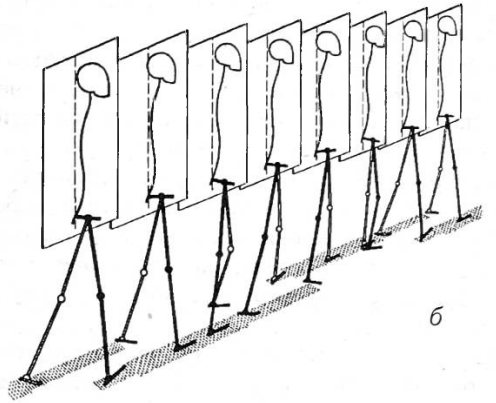
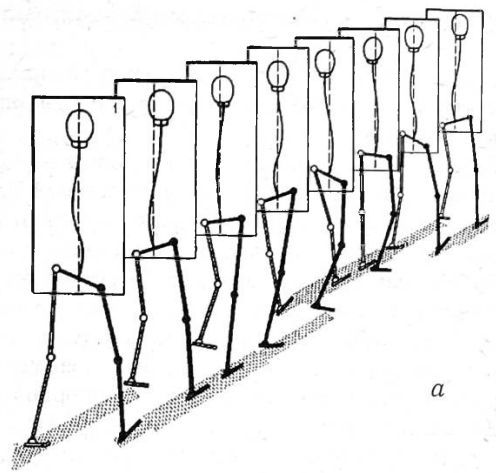


Рис. 3. Схематическое изображение положения звеньев тела во фронтальной (а), сагиттальной (б) и горизонтальной (в) плоскости при ходьбе.

момент прикосновения стопы к полу. Нога выпрямлена. Но вслед за этим, чтобы смягчить передний толчок, она подгибается в коленном суставе. Чуть согнутая нога — прекрасный амортизатор.

О. А что же позвоночник с его хрящевыми эластичными прокладками? Не справляется?

Б. Дело в том, что сила переднего толчка нарастает быстро, скачком. Поэтому последовательно действуют несколько амортизаторов. Стопа (наша рессора) в этот момент не работает: удар приходится не на всю стопу, а лишь на пятку. Но мышцы голени выполняют амортизирующую функцию. В момент нарастания силы толчка передний отдел стопы под действием нагрузки, приходящейся на ногу, опускается на пол. Но сгибание стопы происходит плавно, что обеспечивается уступающей работой передней большеберцовой мышцы.

О. Убедительно. Мне кажется, что механизм аморти-

зации в коленном и голеностопном суставах один и тот же.

Б. Да, и в том, и в другом случае напряженные мышцы уступают нагрузке. Человек как бы опускает себя плавно на пол.

О. На очереди наша следующая рубрика — «Движение звеньев тела при ходьбе во фронтальной плоскости». Вопрос: зачем человеку при перемещении вперед совершать какие-либо движения в стороны?

Б. Судите сами. Стопа при ходьбе встает на пол, и тут же (благодаря движению ноги в таранно-пяточно-ладьевидном суставе) таз смещается кнаружи. В ту же сторону в это же время наклоняется и позвоночник. В результате масса тела оказывается над опорной стопой.

О. Но эти движения практически не заметны.

Б. Однако они очень важны. Кстати, при медленной ходьбе боковые раскачивания туловища хорошо видны.

О. Значит, наши мышцы должны отслеживать движения звеньев тела и во фронтальной плоскости?

Б. Вы правы. Средняя ягодичная мышца очень активна в начальный период опоры. В одноопорный период шага она удерживает всю тяжесть тела.

О. Теперь мне ясно, почему при недостаточности ягодичных мышц верхняя часть туловища в большей мере, чем обычно, наклоняется в сторону опорной ноги. Этот наклон уменьшает плечо действия веса тела относительно опорного тазобедренного сустава и тем самым облегчает работу этих мышц.

Б. Верно. Раз вам многое стало ясным, скажите, почему одновременно со средней ягодичной мышцей активны приводящие мышцы бедра?

О. Вы же говорили: два управляющих привода лучше, чем один.

Б. Да, это так, но я дополню. В момент, когда верхняя часть тела отклоняется в сторону опорной ноги, очень важно вовремя ограничить это движение туловища. Контроль за перемещением верхней части тела осуществляют крестцово-остистые мышцы, которые, как мы знаем, прикреплены к тазу. Само собой разумеется, что такой контроль может быть реализован лишь при удержании таза приводящими мышцами бедра опорной ноги.

О. Значит, без участия приводящих мышц бедра нельзя представить и антигравитационную деятельность мышц спины. Я никогда не задумывался над такой функцией приводящих мышц.

Б. Давайте завершим эту часть беседы так: боковые движения туловища при ходьбе нужны для того, чтобы двигаться вперед.

Теперь, когда вы узнали об элементах кинематики и динамики ходьбы, поговорим, хотя бы в общих чертах, о взаимодействии сил, определяющих движение звеньев тела. Речь вновь пойдет о внешних и внутренних силах. Напомню: внешние силы — вес тела, сила инерции, а внутренние силы — усилия мышц, своего рода «добавки», которые дополняют и корректируют движения звеньев тела.

О. Я вас прерву. Мышцы — единственный энергетический источник движения. А вы говорите, что они выполняют второстепенную роль.

Б. «Второстепенная роль» — это уже ваше определение. Давайте рассмотрим вот какой пример. Вы сели за весла, выгребли на середину реки и развернули лодку вдоль течения. Теперь, работая веслами, поддерживаете определенную скорость движения лодки и одновременно удерживаете ее в фарватере реки. Итак, есть два этапа: первый — от берега реки до ее середины и второй — движение по течению реки.

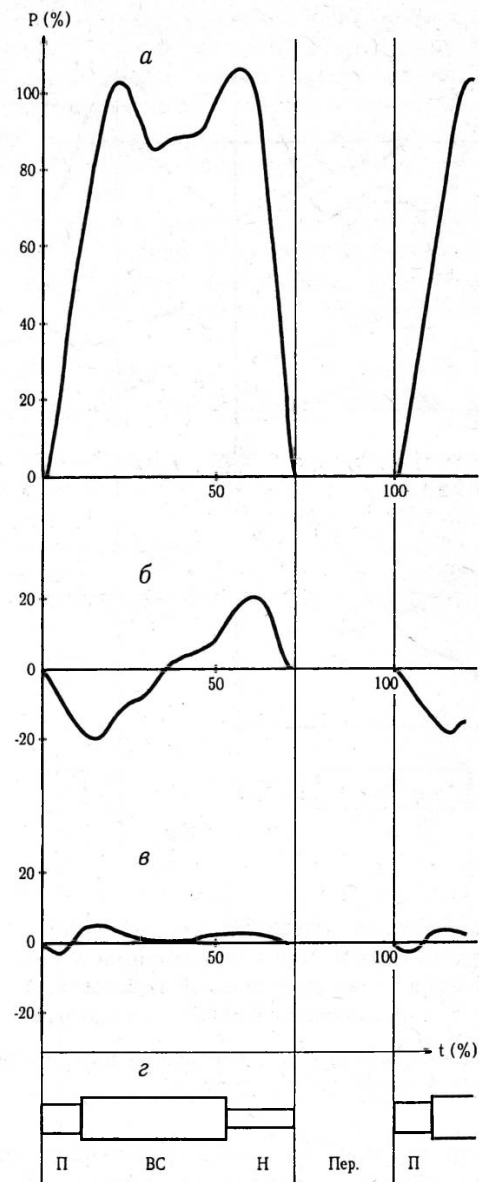


Рис. 4. Опорные реакции ног при ходьбе.

По оси абсцисс — время (в % к длительности двойного шага), по оси ординат — сила опорной реакции (в % от веса тела); а — вертикальная, б — продольная, в — поперечная составляющие опорной реакции; г — подограмма.

О. Я понимаю вас так: на старте ходьбы я затрачиваю значительную энергию, чтобы придать своему телу необходимое ускорение, а затем, двигаясь по инерции, я лишь добавляю часть своих мышечных сил для того, чтобы идти в нужном темпе.

Б. И в нужном направлении. Так что стоит говорить не о второстепенной, а о своего рода руководящей роли мышц.

О. Вы привели очень отвлеченный пример. Какие мышцы выполняют у нас роль двигателя (или, если использовать ваш пример, роль весел, придающих лодке нужную скорость)?

Б. Я о них уже рассказывал. В основном трехглавая мышца. Задний толчок.

О. Но другие мышцы тоже как-то способствуют движению тела.

Б. Конечно. Оттолкнувшись от опоры, нога и все другие звенья тела совершают движение по инерции. Наряду с этим какой-то импульс двигающиеся звенья

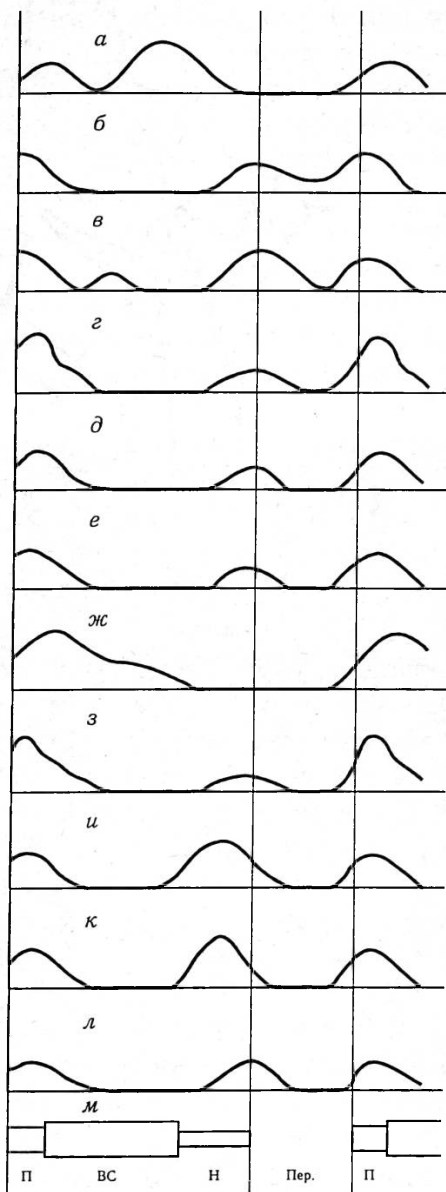


Рис. 5. Волны электрической активности мышц при ходьбе.

а — икроножная мышца, *б* — передняя большеберцовая, *в* — длинная малоберцовая, *г* — прямая бедра, *д* — двуглавая бедра, *е* — полусухожильная, *ж* — средняя ягодичная, *з* — большая ягодичная, *и* — длинная приводящая, *к* — крестцово-остистая, *л* — прямая живота; *м* — подограмма.

получают и от мышц ног и туловища.

О. А когда речь идет об удержании лодки в фарватере реки?

Б. Тут вновь имеется в виду деятельность мышц бедра, таза, туловища. Вспомните, все они в основном работают в уступающем режиме.

О. С мышцами ясно. С чем сопоставить течение реки в вашем примере?

Б. С массой тела, а вернее, с силой инерции перемещающихся масс. Усилие заднего толчка передается звеньям тела. Они совершают движения по инерции. В то же время движения звеньев тела постоянно корректируются теми же мышцами. Какая при этом преследуется цель?

О. Это вы меня спрашиваете?

Б. Да. Все, что происходит с нашей опорно-двигательной системой, подчинено решению какой-то задачи. Если организм корректирует движение звеньев тела, то мы вправе задать вопрос: для чего это надо?

О. Очевидно, для того, чтобы продолжить движение.

Б. Абсолютно верно. Корректирующие мышечные «добавки» необходимы для того, чтобы в полной мере использовать силу инерции, иначе говоря, создать для последующего шага необходимые условия отталкивания от пола. Получается так: задний толчок подготавливается целенаправленным движением звеньев тела, и в первую очередь перемещением туловища (его масса существенно больше масс других звеньев тела). А уже в момент отталкивания главное принадлежит мышцам. Они как бы завершают формирование заднего толчка.

О. По-моему, мы в своих рассуждениях о внешних и внутренних силах начинаем ходить по кругу.

Б. Точно так же, как это происходит с самими силами. Ведь ходьба — циклический процесс.

И последнее замечание на эту тему. При взаимодействии всех этих сил преследуется и другая цель — удержание тела в вертикальном положении. Эта задача никогда не снимается с повестки дня.

О. В нашей беседе было много интересных моментов. Теперь я попытаюсь, используя справочную литературу, оценивать ходьбу моих пациентов. Кстати, о моих пациентах. Наблюдая за больными с эндопротезом тазобедренного сустава, я выделил группу пациентов, у которых был хороший клинический исход. Это были больные, сохранившие практически полный объем движений оперированной конечности. Сила ягодичных мышц была вполне удовлетворительной: больные могли присаживаться на корточки и самостоятельно вставать. Однако они хромали, правда, несильно.

Б. В чем же вы видите причину хромоты?

О. Думаю, это недостаточно четко организованная работа мышц, окружающих искусственный сустав. Нарушена обратная связь. Нет рецепторов суставного хряща — нет стимулирующих мышцы сигналов.

Б. Весьма любопытная гипотеза. Но все, о чем вы говорите, касается и эндопротезов других суставов. Представим, что вы подтвердите свою гипотезу. У вас есть какие-нибудь предложения, восполняющие этот пробел эндопротезирования?

О. Я еще не думал об этом.

Б. Несостоятельность мышц, о которой вы рассказали, квалифицируется как дефицит мышечной функции. В этом случае прибегают к искусственной коррекции движений посредством электростимуляции ослабленных мышц.

О. Стимуляция мышц осуществляется непосредственно в ходьбе?

Б. Да, в этом и заключается метод искусственной коррекции ходьбы. И вот что еще следует иметь в виду: о взаимоположении суставных концов сигнализировать в первую очередь не рецепторы хряща, а рецепторы суставной сумки. Поэтому стоит поразмышлять над конструкцией эндопротеза, при установке которого можно было бы сохранять хотя бы часть тканей суставной сумки.

О. Я обязательно подумаю над этим предложением.