

СТОПА

САМОЕ ПОЛНОЕ ПОСОБИЕ ПО ОРТОПЕДИИ



Иллюстрированное руководство
по анатомии, функционированию
и механике
человеческой
стопы



Джеймс Эрлз

терапевт, специалист
по работе с телом

СТОПА

САМОЕ ПОЛНОЕ ПОСОБИЕ ПО ОРТОПЕДИИ

Иллюстрированное руководство
по анатомии, функционированию
и механике человеческой стопы

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	8
-------------------	---

ВВЕДЕНИЕ.....	11
---------------	----

I. СТОПА ЧЕЛОВЕКА..... 14

Знать, а не называть	16
----------------------------	----

Стопы, сила тяжести и выравнивание.....	17
---	----

Амортизация, производство энергии и опора.....	19
--	----

Амортизация костями в сравнении с мягкими тканями.....	22
--	----

Эффективность и выносливость	23
------------------------------------	----

Сила реакции опоры и сила инерции.....	24
--	----

Мягкие ткани и костные «перекаты».....	26
--	----

История до настоящего времени	31
-------------------------------------	----

Возвращаясь к рассмотрению стопы как целостной, интегрированной структуры.....	33
--	----

Краткий обзор	34
---------------------	----

2. ЭВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ СТОПЫ 36

Введение.....	36
---------------	----

Изменение во времени.....	37
---------------------------	----

Форма и функция.....	41
----------------------	----

Эволюция под действием силы тяжести.....	44
--	----

Изменение формы.....	46
----------------------	----

Находки ископаемых и то, о чем они свидетельствуют	50
--	----

Мы ходили, а затем мы стали бегать	53
--	----

Краткий обзор	60
---------------------	----



3. ФОРМА КОСТИ	62
Введение	62
Способность кости самомодифицироваться	63
Разные материалы для разного рода работ — кортикальная и губчатая кости	64
Реакция костей и других тканей на действие сил	67
Клеточная деятельность и материалы	72
Ремоделирование кости	74
Распределение деформации и тенсегрити	75
Краткий обзор	76
4. КОСТИ СТОПЫ	77
Введение	77
Стопа в целом и по частям	79
Кости предплюсны, плюсневые кости и фаланги	79
Функциональное деление	82
Взаимодействие с ногой	82
Мобильность и стабильность стопы	93
Задняя часть стопы — таранная и пяточная кости	94
Пяточная кость, таранная кость, ладьевидная кость и управление силами в заднем отделе стопы	100
Кости и суставы в действии	102
Касаться пяткой или нет?	105
Роль ладьевидной кости в пронации и супинации	107
Клиновидные кости и поперечная арка стопы	109
Достижение схода с пальцев	115
Дистальная поперечная арка стопы	120
Фаланги — пальцы стопы	121
Краткий обзор	121
5. МЯГКИЕ ТКАНИ И ИХ ФУНКЦИИ	123
Введение	123
«Действие» — это не всегда то же самое, что «функция»	124
Сокращение мышц и эластичность	131
Жесткость тканей и выводимая сила	138
Кривая «сила-длина»	143
Контроль силы — замедление и гашение	145
Передача силы за пределы мышцы и фасциальных отделов	147

Фасциальная проприоцепция и система, регулирующая жесткость.....	149
Краткий обзор	149
6. ВНЕШНИЕ МЫШЦЫ.....	151
Введение.....	151
Что в названии?.....	152
Мышцы, мешки и блоки.....	155
Компартменты соединительной ткани.....	159
Поверхностный задний отдел.....	161
Латеральный отдел	165
Глубокий задний отдел	167
Передний отдел.....	170
Наружные мышцы в цикле походки.....	173
Краткий обзор	176
7. ВНУТРЕННИЕ МЫШЦЫ.....	177
Введение.....	177
Дорсальное против подошвенного — чувствительная подошва	180
Отделы.....	182
Четыре слоя мышц.....	185
Разгибатели пальцев стопы	197
Краткий обзор	197
8. ФУНКЦИЯ И ОЦЕНКА СТОПЫ	201
Введение.....	201
Амортизация	202
Диапазон движения	203
Жесткий рычаг	205
Продвижение и выходная сила.....	207
Ровно столько, сколько необходимо, и не слишком много	208
Оценка	208
Краткий обзор.....	224
9. УПРАЖНЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ СО СТОПОЙ	226
Упражнения для стабилизации стоп	227
Упражнения на мобилизацию стопы	242



10. СОЗДАНЫ ДЛЯ ЖИЗНИ	252
Введение.....	252
Анатомия обуви.....	254
Поиск подходящего	258
 ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ СЛОВО	260
ИСТОЧНИКИ ЛИТЕРАТУРЫ.....	262
АВТОР ГЛАВЫ 9.....	269
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	270

БЛИЗКИЙ СЕРДЦУ

Философ ты или пахарь —
Каждый должен знать свою роль,
Чтобы посеянный новый образ мышления
Становился близким сердцу.

Нил Пирт (1952–2020)

БЛАГОДАРНОСТЬ

Эта книга стала моим товарищем во время событий 2020 года. Этот долгий и мрачный год — год, когда в мире произошло множество перемен, — был наполнен моментами тихих размышлений, скорби, потерь, а также моментами надежды и новых возможностей. Существует множество историй о том, как в этот период проявлялась сила сообщества, сила общения и поддержания связи, и я надеюсь, что все эти важные уроки останутся с нами, когда мы снова вернемся в большой мир.

Многие из нас осознали значимость окружающих нас людей; и так же, как «нужна целая деревня, чтобы вырастить одного ребенка», нужна «целая деревня», чтобы написать книгу.

С любовью и благодарностью я выражаю признательность за поддержку, оказанную мне Оуэном Льюисом (который мужественно переносил страдания, читая первые черновики), Марком Парфитт-Джонсом, Лаури Немец и Холли Клемонс, которые давали мне открытую и честную обратную связь.

Спасибо замечательной команде из Lotus Publishing, особенно Джону и Аманде, которые терпеливо принимают мои постоянные изменения и правки!

Особая благодарность приписана для Люси Уингл, автора главы 9, которая забрела в этот проект уже на середине пути, но все же сумела создать фантастическую последовательность движений при почти полном отсутствии идей и руководства с моей стороны.

И, конечно же, моя добрая, терпеливая и поддерживающая жена Лиза, которой удастся провести меня по извилистым тропам, на которых я каким-то образом оказываюсь, и вернуть меня к свету, — спасибо, что каждый раз находишь меня.

Наконец, просьба ко всем читателям этой книги: в этом мире у каждого из нас есть возможность выбора, так давайте же делать правильный выбор, давайте делать мир лучше, ближе к нашему сердцу.

Джеймс Эрлз
Лондон, май 2021

ПРЕДИСЛОВИЕ

Благодарю вас, дорогой Джеймс, за предоставленную мне честь добавить предисловие к этому прекрасному новому изданию. Однако это ставит меня перед трудной дилеммой: я планировал закончить свой текст в течение нескольких часов, как я обычно это делаю с другими предисловиями, которые мне предлагают написать, но сейчас обнаруживаю, что настолько очарован множеством блестящих глав этой книги, что хочу продолжить чтение каждой ее страницы исключительно ради моего собственного удовольствия и образования.

Даже без вашего приглашения, — и не принимая во внимание мое глубокое личное к вам уважение за ваш прошлый вклад в общую для нас область изучения человеческого тела с функциональной точки зрения, — я бы включил эту книгу в свой личный список «обязательных к прочтению». И, безусловно, я рекомендую сделать это всем, кого интересует волшебство нашего живого тела. Достаточно высока вероятность того, что каждый из нас как минимум несколько раз за свою жизнь столкнется с проблемами, связанными со здоровьем стопы, будь то собственные стопы или стопы других важных для нас людей, таких как члены семьи или пациенты.

Если бы в моей будущей жизни у меня было несколько лет на то, чтобы посвятить себя изучению одной части человеческого тела, то до недавнего времени я бы разрывался между разными вариантами. Но как только я начал углубляться в захватывающее путешествие, предлагаемое этой книгой, у

меня не осталось сомнений: нет более увлекательной части нашего тела, чем человеческая стопа, по крайней мере, если исследовать ее через предлагаемую Джеймсом Эрлзом перспективу любопытства и исследования функциональности!

Уважаемый читатель, пожалуйста, будь готов столкнуться с аналогичной дилеммой, когда будешь брать в руки эту замечательную книгу. Вы, безусловно, получите много пользы, просто пролистав эту книгу, как все мы делаем время от времени, когда просматриваем красивые изображения и хорошо написанные подписи к ним, а также читая подзаголовки и полезные резюме в конце каждой главы. Но я обещаю, что после того, как вы это сделаете, эта книга еще больше привлечет ваше внимание и соблазнит вас проследовать по предложенному автором пути к более глубокому пониманию того, как работает ваше тело с точки зрения самой фундаментальной его части.

Одним из наиболее ярких моментов этой книги, нигде больше не встречающихся в таком увлекательном виде, является рассмотрение стопы с эволюционной точки зрения и исследование того, как тесно этот путь связан со специфической адаптацией наших предков *Homo sapiens* к их образу жизни собирателей и охотников. Основываясь на обширном опыте автора, являющегося всемирно известным специалистом по работе с телом и движением, этот подход сопровождается функциональным обзором скелетно-мышечной анатомии, в котором стопа рассматривается не изолированно, а скорее как часть нескольких миофасциальных

цепей, соединяющих ее с остальным живым телом.

Автор книги «Рожденный ходить» (2020) — предыдущего важного вклада в науку — знакомит вас с вдохновляющим исследованием искусства ходьбы и бега. Для меня это имеет столь же обновляющий эффект, как если заново учить рыбу плавать или птицу — летать, но при этом делать это с увеличенной элегантностью, утонченностью и радостью. Если вам все еще недостаточно, то следует также упомянуть, что центральная часть данной книги дополнена практическими рекомендациями о том, как улучшить самочувствие ваших стоп с помощью конкретных терапевтических или двигательных воздействий. Они превосходно

проинструктированы простым и понятным образом.

И теперь ярываюсь между желанием продолжить подробное изучение этой захватывающей книги, — а не просто пролистать ее, — и желанием снять обувь и поэкспериментировать в моем саду с некоторыми из новых упражнений, описанных в последних главах. Дорогой Джеймс, большое спасибо за то, что глубоко обогатили мое интеллектуальное любопытство, а также мой чувственный опыт этим замечательным выбором.

Роберт Шляйп
Мюнхен, Германия,
июнь 2021

Джеймс Эрлз — ученый и джентльмен; и именно благодаря этому сочетанию данная книга абсолютно необходима в библиотеке каждого серьезного терапевта, независимо от его типа или принадлежности. Эта книга предназначена для всех, кто хочет получить более полное представление о том, как на самом деле движется тело.

Что такое стопа с анатомической точки зрения? Чем наши стопы отличаются от стоп наших предков? В чем уникальность человеческих стоп по сравнению с другими животными? Является ли форма наших стоп результатом нашей деятельности в качестве охотников-собирателей, при которой требуется мигрировать к следующему месту пищи, расходуя при этом как можно меньше калорий? Является ли ходьба просто контролируемым падением или же ее суть более элегантна? Являются ли мои стопы результатом наследственности или же я могу внести какой-то механический вклад в их формирование? Улучшает ли или ухудшает это то, как я бегую? Должен ли я бежать от носка или от касания пяткой? И, о боже, обувь! Почему с обувью столько сложностей?

Джеймс отвечает на все эти и многие другие вопросы в уникальном экуменическом стиле. При этом он предоставляет нам всю необходимую информацию для того, чтобы разобраться в этих вопросах.

Он делает это, сплетая воедино сравнительную и эволюционную анатомию, функциональную анатомию, фасциальную анатомию, «анатомическую» анатомию, мышечные силы и действия, морфологию и клеточную динамику, показывая, как все эти элементы объединяются, чтобы воздействовать на ту часть тела, которая наиболее приспособлена для воздействия, предназначена для него и подвергается воздействию со стороны.

Тем не менее, несмотря на все его исчерпывающие исследования, он не утомляет читателя. Джеймс — лучший автор. Столь необходимый строгий уровень научной детализации в сочетании с его добродушным юмором, понятными примерами и превосходными наглядными иллюстрациями превращают чтение этой книги в сплошное удовольствие.

Я прочитал ее с радостью и с той же радостью буду перечитывать ее снова и снова, поскольку



в ней так много важных движений из реальной жизни и жемчужин анатомии, что я хочу убедиться в том, что получил doskonaльное практическое понимание их всех. Как для улучшения моей собственной биомеханики, так и для улучшения биомеханики моих пациентов.

Итак, давайте перевернем страницу и отправимся в путь с джентльменом, ученым

и просто моим другом Джеймсом Эрлзом. Вы в мгновение ока начнете черпать новые идеи.

Дэвид Лесондак
Медицинский центр Университета
Питтсбурга, Центр интегративной медицины,
Питтсбург, Пенсильвания, США, июнь 2021

ВВЕДЕНИЕ

По словам Дадли Дж. Мортон, ставшего путеводной звездой для данной книги, «история о том, как человек стал двуногим, написана на языке биомеханики». Возможно, это связано с тем, что посвященные эволюции книги сосредоточены на находках окаменелостей и анализе различных сухожильных туннелей и костных буторков, а может быть, это действительно так, потому что «анатомия — это наша судьба». Мортон считал, что именно развитие современной стопы позволило нам сделать первый шаг на пути к нашей судьбе — к тому, чтобы стать *Homo sapiens*.

Для нашего вида характерно множество анатомических особенностей — форма и размер черепа, изгибы позвоночника, положение таза, — но есть лишь одна действительно уникальная черта — это наш подбородок. Никто на самом деле не знает, почему только у *Homo sapiens* есть подбородочные выступы (довольно странное анатомическое название подбородка), хотя существует множество теорий относительно того, почему тело тратит часть своих ограниченных ресурсов на строительство костей, не имеющих какой-либо особой функции или пользы.

Данная книга — вовсе не о подбородках; вместо этого она фокусируется на противоположном конце тела, исследуя наши стопы — эти часто игнорируемые расширения на концах наших ног. Наши стопы не уникальны в том смысле, в каком уникальны подбородочные выступы: многие животные имеют схожее количество и форму костей, связок и мышц. Но в ходе нашей истории эволюции набор тканей,

из которых состоит человеческая стопа, изменился таким образом, что, возможно, направил нас на путь к энергоэффективному движению. Калории, которые мы сэкономили, развив прямохождение и длинный шаг, обеспечили достаточно избыточной энергии для создания дорогостоящих костей, у которых нет никакой иной конкретной цели, кроме как предоставить нам то, что можно было бы погладить в моменты мысленного созерцания.

Если вы переживаете, что, возможно, вы будете в отчаянии почесывать свой собственный подбородок, пробираясь сквозь дебри очередного сухого учебника анатомии и биомеханики, тогда, пожалуйста, глубоко вдохните и расслабьте мышцы челюсти. Моя цель и мой долг состоит в том, чтобы сделать это путешествие как можно более «безболезненным». Я знаю, какие разочарования могут возникать при попытке изучить анатомию: обилие неясных и длинных слов, упоминание в разных текстах одних и тех же структур под разными названиями, а также длинные и сложные описания каждой кости, которые дают лишь намек на ее контекст, назначение или функцию.

Моя цель — помочь вам разобраться с каждым из этих разочарований по мере того, как мы продвигаемся дальше по тексту. Язык анатомии по большей части красив (конечно, согласно общему мнению, в нем также и много неприятных моментов, но пока мы сконцентрируемся лишь на положительных аспектах), и мы рассмотрим те значения, которые скрываются за названиями, а также их обоснование. Там, где для обозначения какой-то

отдельной структуры используется множество разных терминов, я постараюсь перечислить их все и, по возможности, объяснить причины или преимущества использования различных терминов. Но больше всего я надеюсь на то, что данная книга объяснит анатомию, помещая ее для вас в некоторый контекст, а не просто повторять обычные сухие описания.

Мой опыт посещения уроков анатомии и чтения книг по анатомии был довольно разочаровывающим; я полагаю, что у многих из вас было так же. В большинстве случаев они предназначены для того, чтобы вбить в ваши головы одни и те же факты и цифры, помочь вам сдать экзамен и, если повезет, через повторение заставить вас увидеть, как все это соотносится с реальной жизнью.

«Понимание стопы человека» — это моя попытка преподавать анатомию так, как мне бы хотелось, чтобы меня ей обучали 30 лет назад. Начнем с общей картины — что такое стопа и для чего она используется? Далее, как она работает? Как она работает и какую роль играют все эти раздражающие мелочи с длинными названиями в многочисленных функциях стопы?

Мы будем идти от общего к частному, а затем обратно к целостной картине. Я обнаружил, что если у меня есть некоторое понимание системы в целом, то становится намного легче понять особенности ее частей. Как и в случае с мозаичной головоломкой, собирать ее намного проще, если я знаю, как должна выглядеть окончательная картинка. Я могу сразу расположить части там, где они должны быть, вместо того, чтобы изучать канавки, контуры и цвета каждой отдельной части, пытаясь выявить, куда они могут подойти.

При обсуждении стопы приводится множество фактов и цифр: в ней 26 костей (при этом кости стопы составляют четверть костей тела), 33 сустава, которые контролируются сотнями мышц, сухожилий и связок.

Меня это не интересует.

Точнее, немного интересует. Иначе, если бы это было не так, я бы не писал этот текст. Но способность перечислить цифры и даже называть структуры — это не то же самое, что понимать значение каждой функции, и именно

здесь скрывается истинное знание и связанная с ним сила.

Невозможно было сделать эту книгу полностью всеобъемлющей, поскольку это вывело бы ее за пределы как финансовых возможностей, так и возможностей привлечения большинства читателей.

В моем представлении у этой книги есть очень конкретный читатель — я. Я 25 лет назад, когда я изо всех сил пытался продвинуться в своей практике работы с телом и пытался понять тела своих клиентов. Я пытался читать продвинутые учебники по анатомии, посещал многочисленные тренинги, но было крайне мало ресурсов, которые могли бы перевести тот «дремучий» язык, с которым я столкнулся в соответствующей литературе.

Язык создавал барьер, и, казалось, не было ни одной книги, которая могла бы протянуть мне руку помощи. В поисках чего-то — я тогда не знал, чего именно, — я покупал множество книг, DVD-дисков и видео (интернет в те дни был не так развит), но они были либо слишком продвинутого уровня, либо слишком просты. В конце концов, когда я набрал такое количество книг, что из них можно было бы составить целую библиотеку, я увидел, что чего-то не хватает. У меня были введения и заумные тома, но ничего промежуточного между ними. Я надеюсь, что данная книга окажется где-то посередине, на шаг впереди базовой анатомии, и поможет увидеть полную картину с большей ясностью и уверенностью.

Вместо того чтобы перечислять количество тканей, содержащихся в стопе, Мортон был гораздо красноречивее, описывая ее сложности: «множество подвижных частей, одновременные действия многих суставов, а также постоянно меняющаяся величина и направление действия сил в каждом сегменте и различные сопутствующие правила дополнительных факторов (механических и других) придают ей всю ту сложность, которая характерна для бесконечной детализации и которая не поддается прямому механическому анализу».

Отмечая ее сложность, Мортон также предупреждал нас: нужно многое изучить, при этом многие действия, функции и взаимодействия

стопы происходят одновременно, что затрудняет их описание линейным текстом. Нам придется перепрыгивать то назад, то вперед в наших исследованиях, и, хотя иногда это может разочаровывать, та окончательная картина, которую мы получим в итоге, определенно того стоит.

Я надеюсь, что эта книга предоставит вам множество инструментов, которые помогут вам оценить то, насколько чудесна наша стопа, а также познакомят вас с визуальным и вербальным словарем, необходимым для понимания ее функций.



СТОПА ЧЕЛОВЕКА

В этой истории два героя: человеческая стопа и доктор Дадли Джой Мортон (1884–1960). Доктор Мортон родился в Балтиморе, штат Мэриленд, получил медицинское образование в Ганемановском колледже, штат Пенсильвания, и стал одним из самых известных медицинских авторитетов в США в первой половине двадцатого века. Основной причиной этой славы были его энциклопедические знания о стопе человека, основанные на его понимании сравнительной анатомии. Родившийся через 25 лет после публикации книги Дарвина «Происхождение видов» (1859), д-р Мортон быстро использовал те идеи, которые он почерпнул из развивающейся науки об эволюции.

Хотя о стопах нечасто говорят в таком ключе, они являются определяющим элементом анатомии человека. Согласно Мортону, наши стопы «настолько специфическим образом подстроились под нагрузку со стороны силы тяжести, вызванную нашим прямохождением, что их детальные особенности требуют такого же вдумчивого внимания, какое уделяется специализированным тканям глазного яблока при всестороннем изучении зрения»^{*}.

По мере того, как мы погружаемся в это вдумчивое рассмотрение, эта книга будет повторять убеждение Мортона, цитировавшего Вуда Джонса: «Если нужно с абсолютным успехом отследить недостающие звенья, то стопа — гораздо больше, чем череп, или зубы, или голени — определит, относятся ли они к обезьяне или к человеку. Именно изучение этапов эволюции стопы даст будущим палеонтологам наиболее ясное представление о недостающем звене»^{**}.

Эволюционные изменения стопы совпадают с нашей первой адаптацией к прямохождению по земле, которая привела к изменению нашего взаимодействия с силой тяжести. Наша новая форма передвижения с присущим ей вертикальным выравниванием относительно действия силы тяжести обеспечила ряд преимуществ, в частности, эффективность, сопровождающаяся экономией калорий в то время, когда калории были единственной имевшей значение «валютой». Математика здесь крайне проста: расходование меньшего количества калорий в погоне за более усвояемыми калориями позволяет перераспределить сэкономленные

^{*} Morton D.J. «Human Locomotion and Body Form», 1963, p. viii.

^{**} Morton D.J., «The Human Foot», 1935, p. 52.

средства. Такая экономия калорий помогла подпитывать многочисленные миграции наших предков, распространявшихся повсюду по африканскому континенту, а в конечном итоге — и за его пределы.

Конечно, наша прямоходящая походка обеспечивала и другие преимущества, такие как меньшая подверженность полуденному солнцу, поскольку наши спины больше не были обращены прямо к небу; свободные руки для изготовления и использования инструментов, а также новое видение мира, поскольку у нас появилась возможность поднимать глаза выше уровня высокой травы. Каждое из этих преимуществ, среди многих других, «рекламировалось» в качестве движущей силы эволюции прямохождения, но я считаю, что каждое из этих преимуществ образует лишь одну нить в сложном переплетении взаимосвязанных факторов, которые привели нас на путь к нашей нынешней анатомической форме. Каждое из перечисленных преимуществ имеет некоторое положительное влияние на расход калорий: умение справляться с жарой снижает затраты на обмен веществ, использование инструментов позволяет более эффективно захватывать и перерабатывать источники пищи, а улучшившийся обзор помогает в охоте на добычу и, что не менее важно, в получении заблаговременной информации о приближении хищников (тут следует сказать, что предотвращение своего превращения в чьи-либо потребленные калории, пожалуй, является самым важным фактором при измерении успешности вида!). При таком развитии событий совокупная экономия калорий может способствовать развитию более «дорогостоящих» тканей, например, укрупнению мозга, которое в конечном итоге развилось у наших предков.

Однако наша эволюция — это гораздо более сложная история. Может сложиться впечатление, что эта история переписывается почти каждую неделю — по мере новых палеонтологических и генетических открытий, — и она точно заслуживает более глубокого исследования, нежели написанные выше простые абзацы. Но у нас ограничено место, к тому же нет никаких сомнений, что все то, что написано на этой неделе, уже устареет на следующей. Если

мы хотим по-настоящему понять многочисленные взаимодействия между «множеством частей» стопы, происходящие в ответ на «постоянно меняющуюся величину и направление действия сил», с которыми мы имеем дело при каждом шаге, то нам необходимо поместить наше исследование роли стопы в определенный контекст.

Для Мортона и для данной книги человеческая стопа является важным физическим и метафорическим индикатором того, откуда мы пришли, куда мы можем добраться и как мы ориентируемся в нашем настоящем. В нашем лексиконе стопы стали символом движения, самовыражения, поражения или неуклюжести подумайте о том, как кто-то старается произвести хорошее впечатлениеⁱ, или как мы ускоряем наше достижение цели («освобождаем стопы»), когда на их пути возникают возможные препятствия. На свадьбе у нас душа уходит в пяткиⁱⁱ, когда нас приглашает на танец наш неуклюжий дядяⁱⁱⁱ. Кто-то наконец вновь встает на ноги, надеясь на то, что он не сделан из глины, после того как на него оказывалось давление. После жизни, прожитой в определенном темпе (от лат. «*passus*» — «шаг») (прим. переводчика: «темп» по-английски — «*pace*»), наш гроб выносят из церкви стопами вперед, чтобы у нас не возникло соблазна вернуться.

При этом гробы христианских священников выносят из церкви головой вперед, надеясь, что так их дух вернется, чтобы управлять своей паствой.

Однако прежде чем оказаться в гробу, мы, вероятно, оскорбляли и игнорировали свои стопы больше, чем любую другую часть своего тела. Мы изобрели множество оболочек для жестокого обращения, которые мы называем обувью, и при этом используем наши стопы в танце, в спорте и в ходьбе на многие

* См. «Введение», там указан источник цитат — вы же не пропустили введение, не так ли???

ⁱ Астор использует идиому «*to start a journey with best foot forward*», дословный перевод которой — «начинать путь с выставления вперед лучшей стопы». — Прим. перев.

ⁱⁱ Автор использует выражение «*get cold feet*» (дословно — «холодеть стопы»). — Прим. перев.

ⁱⁱⁱ Автор использует выражение «*uncle with two left feet*» (дословно — «дядя с двумя левыми стопами»). — Прим. перев.

километры. Стопы — это самые настоящие Золушки человеческого тела. Мы втискиваем свои стопы в тапочки (стеклянные или любые другие) и иногда даже тренируем их на пуантах. Но наряду с тем, что на протяжении всей истории стопы связывали, ограничивали и подвергали насилию самыми разными способами, им также и поклонялись.

И танцовщицы Дега, и Венера Боттичелли, и скульптуры Микеланджело демонстрируют элегантный изгиб стопы, вызывая наше восхищение. Несмотря на 250 000 потовых желез или, возможно, из-за связанных с ними феромонов, стопа считается самым распространенным из всех сексуальных фетишей и пользуется своим очарованием намного больше, чем любые другие вариации формы или размера тела.

Наоборот, в отличие от элегантности и привлекательности естественного изгиба, плоскостопие — совершенно несправедливо — стало символом неприятного, неэлегантного, опасного, слабого и даже «другого». В разное время плоскостопие считалось знаком Пана, покровителя ведьм; использовалось нацистами для определения евреев, наряду с их якобы короткими изогнутыми ногами; а в восемнадцатом и девятнадцатом веках плоскостопие считалось отличительной чертой «примитивных» культур Африки и Азии. В Шотландии считалось плохим предзнаменованием, если после наступления Нового года первым порог дома переступал человек с плоскостопием. В действительности, единственным очевидным преимуществом плоскостопия было то, что оно, вполне вероятно, освобождало вас от службы почти в любой национальной армии (однако в этом случае вы рисковали прослыть плоскостопным трусом за то, что вас не взяли).

К сожалению, многие из этих предубеждений все еще присутствуют и в нашем языке, и в нашей культуре, и даже в нашей медицине. Мы по-прежнему склонны рассматривать плоскостопие как недостаток, а не как возможную нормальную вариацию распределения кривой. Как это бывает со многими другими вещами в жизни, важно не то, что вы имеете, а то, как вы это используете. Стопа, которая кажется особенно плоской или же, наоборот, имеет

слишком высокий свод, все же может быть способна выполнять все те функции, которые требуются от стопы. Нам лишь нужно разобраться в том, что это за функции.

Чтобы по-настоящему понять всю сложность человеческой стопы, нам необходимо лучше понять среду, в которой она работает. Одним из аспектов этой среды является выбор обуви; кроме того, стопа также находится в контексте постоянно меняющегося фокуса действия силы тяжести, силы реакции земли и силы инерции. Вместо того чтобы вновь воспроизводить тот свободный от действия различных сил и не имеющий контекста мир, представленный в большинстве учебников по анатомии, мы будем исследовать стопу — иногда под руководством Мортона, — принимая во внимание ее форму, функцию и окружающую среду.

■ ЗНАТЬ, А НЕ НАЗЫВАТЬ

Великий физик Роберт Фейнман говорит о том, что существует различие между знанием названия чего-либо и фактическим знанием чего-либо: «Вы можете знать название птицы, но, когда вы закончите, вы не будете знать абсолютно ничего о птице... Так что давайте посмотрим на птицу и понаблюдаем, что она делает, — именно это имеет значение».

Задумывались ли вы, почему кость имеет определенную форму, почему мышечные волокна расположены по-разному или почему сухожилия различаются по длине и толщине? Как это часто бывает, эти, казалось бы, простые вопросы требуют довольно длинных ответов, которые я буду исследовать в последующих главах. Знание — или, что еще лучше, понимание — системы требует понимания как микро-, так и макроэлементов. Не зная, где находится та или иная часть и какую функцию она выполняет, мы можем говорить о том, что знаем лишь ее название. И наоборот, видя только общую картину, вы упускаете все тонкости работы отдельных частей.

Знакомство с системой стопы человека требует, чтобы в каждой главе наше внимание сосредотачивалось как на деталях, так и на более широком контексте, в котором функционирует

стопа. Цель этой и следующей главы — дать общий контекст большой картины.

■ СТОПЫ, СИЛА ТЯЖЕСТИ И ВЫРАВНИВАНИЕ

На протяжении долгого времени я считал, что анатомию обычно преподают неправильно: от мелких деталей к более крупным формам. И только когда у нас уже есть все детали, мы пытаемся понять функцию. Мой опыт показывает, что любую сложную систему легче понять, если сначала получить общее представление о ее контексте.

Мы начнем наше путешествие с рассмотрения общих функций стопы — что она делает, почему она делает именно это и какие при этом задействованы силы?

Процесс изучения не будет происходить строго линейным образом, поскольку для понимания функций мы должны изучить действующие силы, а чтобы понять, как стопа взаимодействует с этими силами, нам понадобится немного анатомии. К сожалению, функциональную анатомию нельзя просто выучить наизусть, как алфавит. На первый взгляд может показаться, что несколько разделов, особенно те части глав, которые посвящены костям и мягким тканям (с 3 по 5), чрезмерно отвлекают внимание на области, никак не связанные со стопой, но будьте уверены, они предназначены для того, чтобы помочь вам оценить всю сложность данной конструкции в целом. Время, потраченное на изучение менее знакомых предпосылок развития тканей, поможет выстроить более полную картину взаимодействия стопы с остальной частью нашей анатомии и составить более целостное представление о нашей прекрасной форме.

Стопа, возможно, является самой сложной областью для начала изучения биомеханики из-за большого количества различных тканей, каждая из которых имеет разную плотность и жесткость. К счастью, и в расположении тканей, и в описательном языке, используемом для описания анатомии и функций, есть определенная логика. Для многих из нас этот язык кажется абсолютно незнакомым и лишь

сбивает с толку и разочаровывает, но я надеюсь, что это будет меняться по мере того, как мы будем выстраивать картину взаимодействия и увидим, как переплетаются форма и функция. Когда функция и анатомия рассматриваются вместе, это облегчает понимание всего гештальта.

Один из первых вопросов, на который нужно ответить: «К чему вся эта суета вокруг прямохождения»? Короткий ответ на него можно легко получить, имитируя походку шимпанзе с согнутым бедром и согнутым коленом, — такой эксперимент быстро дает нам непосредственное представление о преимуществах вертикально сложенных костей. Несколько неуклюжих шагов наглядно демонстрируют ту дополнительную энергию, которая требуется для поддержания согнутых конечностей, поскольку повышенная мышечная нагрузка быстро утомляет бедра и нижнюю часть спины. Чтобы измерить влияние согнутых конечностей, Абитбол (1988) сравнил изменения скорости метаболизма между собаками, детьми и взрослыми в положении лежа на спине, стоя на двух ногах, при ходьбе на двух ногах, стоянии на четвереньках и ходьбе на четвереньках. Абитбол обнаружил, что переход из положения лежа в положение стоя вызывает значительное увеличение потребления энергии у собак, но не у людей. Наша поза, выровненная вдоль действия силы тяжести, не требует значительного увеличения энергии по сравнению с положением лежа.

Наиболее значительный скачок скорости обмена веществ у человека произошел при использовании четырех конечностей, поскольку они требуют сгибания и смещения центра тяжести вперед.

Многочисленные эксперименты, такие как эксперимент Абитбола, продемонстрировали метаболическую эффективность, возникающую при отказе от стояния и передвижения на четырех конечностях. Характерные для нас прямые колени и разгибание бедра позволяют S-образному позвоночнику входить в череп под его центром тяжести, а общему центру тяжести спуститься вниз прямо между двумя стопами. Это контрастирует с «дорогостоящими» характеристиками движения



Рисунок 1.1. Для поддержания нашего вертикального положения на двух ногах требуется ряд анатомических особенностей, включая изменения в стопах, тазе, позвоночнике и голове. Роль стопы у каждого вида связана с его двигательными стратегиями и возможностями остальной части их анатомии. Наши стопы обладают некоторыми уникальными способностями, однако некоторые из них мы все же утратили — их взяли на себя другие части тела, особенно бедра.

на четырех конечностях — согнутыми суставами опорных конечностей и выдвинутыми вперед тяжелыми головой и челюстью (см. рис. 1.1).

Переход к прямохождению потребовал от наших стоп эволюционных изменений. Ходьба с согнутыми конечностями может быть затратной с точки зрения метаболизма, но она предлагает четвероногим разную степень амортизации ударов. В природе все сводится к поиску наилучшего баланса между затратами и выгодами при различных потребностях, в данном случае — между амортизацией ударов и расходом калорий. Наши конечности должны поддерживать и перемещать нас, но они также должны справляться с возникающими при каждом шаге ударными силами. Углы в суставах между линией земли и бедром или линией земли и плечом у четвероногих позволяют мягким тканям поглощать эти силы и управлять ими (рис. 1.1 и 1.2) — в некотором смысле это приносит определенную выгоду (мы рассмотрим это подробнее в главе 5), но одновременно с этим является затратным с точки зрения метаболизма. Походка *Homo sapiens* на прямых ногах убрала большую часть

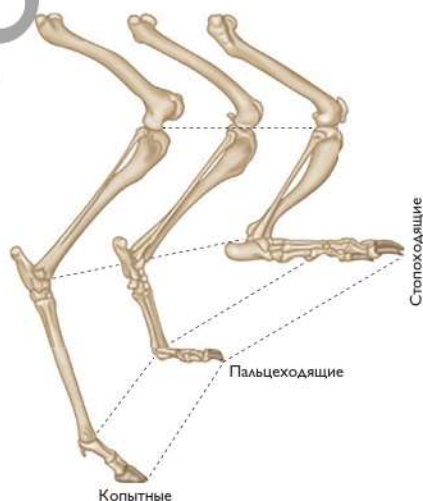


Рисунок 1.2. Все четвероногие ходят на той или иной части передней части стопы. У копытных вытянулись пальцы ног и развились копыта, а пальцеходящие используют различные части пальцев ног. Стопоходящие животные, в том числе *Homo sapiens*, ходят на полной стопе и часто ударяют пяточной костью о землю.

стибания в голеностопном и коленном суставах и, опустив пяточную кость на землю, локализовала большую часть задачи по управлению ударным воздействием в стопе.

Наш паттерн ходьбы на прямых ногах уменьшает количество угловых суставов между землей и нашим центром тяжести. Любое увеличение угла сустава или количества углов между точкой нашего контакта с землей и нашим центром тяжести увеличивает нагрузку на мышцы, контролирующие эти суставы. Использование человеком стратегии сложных костей при касании пяткой перераспределяет некоторые требования по управлению усилиями, передающимися с мягких тканей на скелетную систему. Возможность позволить более плотным и жестким костям справляться с большей частью сил противодействия является одним из факторов, помогающих нам при том же количестве калорий проходить вдвое большее расстояние, нежели наши двоюродные братья шимпанзе с их согнутыми коленями и бедрами.

Данное неравенство в эффективности уменьшается, когда мы начинаем бегать, поскольку такой стиль движения, как правило, использует стратегии с согнутыми конечностями

и вызывает рост метаболических затрат до уровня, аналогичного шимпанзе, перемежающегося на костяшках пальцев (Foster и др., 2013; Pontzer, 2017).

■ АМОРТИЗАЦИЯ, ПРОИЗВОДСТВО ЭНЕРГИИ И ОПОРА

Четвероногие одинаково используют все конечности, когда речь идет о ходьбе, однако ситуация меняется при прыжках и приземлении. Задние ноги используются, когда требуется дополнительная мощность, а передние ноги — для поглощения сил при приземлении (см. рис. 1.3). Для этого есть несколько причин, очевидная из которых заключается в том, что легче проталкивать себя вперед назад, нежели тянуть спереди, но также это связано с анатомией. Задние конечности соединены с осевым скелетом через относительно глубокие и надежные тазобедренные суставы, в то время как передние конечности фактически «подвешены» на мышцах, и именно эта подвеска из мягких тканей взаимодействует с силами приземления.

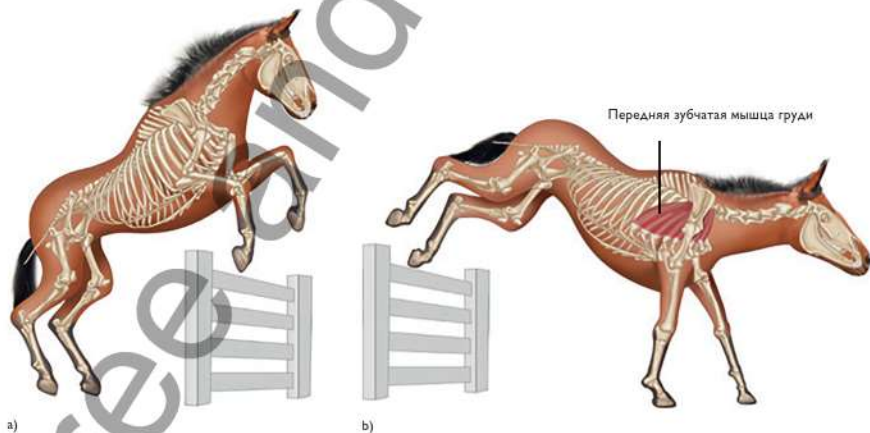


Рисунок 1.3. а) У четвероногих задние ноги прочно связаны с осевым скелетом и обеспечивают эффективную передачу усилия от конечностей к туловищу. б) Аналог передней зубчатой мышцы у лошадей образует «упряжь» из мягких тканей для передних конечностей, что позволяет миофасциальной системе поглощать большую часть сил при приземлении.

Хотя анатомия лошади может показаться не самой очевидной точкой для начала нашего исследования человека, она подчеркивает всю гениальность «устройства» человеческой стопы, которая должна одновременно выполнять роль и задних, и передних ног у четвероногих, при этом обеспечивая стабильную опору для движения и амортизацию при приземлении. Основная цель этой книги — понять, как совокупность тканей в стопе в нужные моменты времени то создает так называемый «жесткий рычаг», то переключается в режим «подвижного соединительного звена».

Наши стопы — это швейцарский армейский нож нашего тела, красиво оформленный, компактный и многофункциональный. Стопы человека обладают такими анатомическими особенностями, которые позволяют им обеспечивать амортизацию и стабильность, при этом их функции и анатомия отличают наши стопы от стоп других приматов. Наиболее очевидными из этих отличий являются увеличенные пятки, приведенные большие пальцы ног и напоминающая свод организация структуры всей стопы. Каждая из этих особенностей дает определенные преимущества, которые мы рассмотрим далее в тексте, но крайне важно при этом помнить о полной картине стопы в контексте остального тела.

Ни одна из составляющих анатомии не работает изолированно, будь то ткань, орган или конечность. Всегда присутствует взаимодействие с другими частями тела, органами, системами и окружающей средой. Последний элемент особенно актуален для наших стоп — они, вероятно, являются наиболее частыми точками взаимодействия между нашим телом и окружающей средой, что делает их важным источником проприоцептивной информации для координации, баланса, опоры и передвижения.

Конструкции, к которым предъявляется множество противоречивых требований, требуют сложных инженерных решений. Поэтому неудивительно, что стопы снабжены таким количеством сенсорных окончаний, костей, суставов, связок и мышц. Механические требования, необходимые для каждой функции,

не всегда дополняют друг друга, но, к счастью, биология нашла способы обойти противоречивые требования и найти вполне работающий компромисс. Например, опора и баланс были бы легче, если бы наша стопа была шире и имела бы более гибкий большой палец, но ходьба вперед по прямой более эффективна при выравнивании суставов, начиная от пальцев ног до лодыжки, колена и бедра.

Балансирование на двух ногах в положении стоя и на одной ноге во время ходьбы лучше всего достигается за счет адаптируемой и подвижной стопы, при этом справляться с силами, возникающими при касании пяткой и схода с пальцев, лучше всего с помощью более прочной, компактной конструкции, и мы вновь вернулись к дихотомии «подвижного амортизатора» и «стабильной платформы». Потребность в подвижности стоп связана с нашей потребностью в опоре, равновесии и общей стабильности. Нам необходимо поддерживать нашу относительно высокую прямую структуру на двух узких точках контакта с землей. Как и многие животные, мы подумаем опору от передней части стопы, когда она выдвигается вперед, однако у нас нет хвоста сзади, который уравнивал бы вес нашего тела. Чтобы компенсировать потерю хвоста, мы разработали немного более длинную пятку, выступающую назад (рис. 1.4). Увеличенное тело пяточной кости также помогает с задачей амортизации при касании пяткой; ее округлая форма помогает нам перекатываться вперед к голеностопному суставу и суставам пальцев ног перед схождением с пальцев (подробнее мы разберем это ниже, когда будем исследовать роль инерции).

Большинство животных поддерживает равновесие за счет того, что их стопы расположены непосредственно под тазобедренными и плечевыми суставами. Другие наши двоюродные братья-приматы обладают более широкими стопами, чем у нас, поэтому нам приходится компенсировать недостаточно широкое положение ног, а также узкие ступни. Чтобы помочь нам в этом, человеческая стопа устроена таким образом, что ее кости слегка раздвигаются, когда мы переносим свой вес на переднюю ногу во время ходьбы.



Рисунок 1.4. Для того чтобы облегчить присущий нам стиль походки, наша стопа прошла через ряд адаптаций. К ним относятся приведение большого пальца стопы, способствующее лучшему выравниванию пальцев стоп, голеностопного, коленного и тазобедренного суставов во время шага; выступающая назад пяточная кость, обеспечивающая большую устойчивость и поддержку в положении стоя, а также амортизацию при ходьбе. Стопы австралопитека афарского и шимпанзе показаны здесь для сравнения и будут дополнительно исследованы в последующих главах.

Такое расширение стопы является частью упомянутой выше реакции амортизации и предоставляет больше свободы суставам. В результате кости имеют возможность приспособиться к рельефу и распределить силу на мягкие ткани — в этом и заключается часть функции «подвижного связующего звена» наших стоп.

Некоторые функции стоп, наблюдаемые у других видов (см. рис. 1.2), переместились к другим областям человеческого тела. Широкая стопа шимпанзе с отведенным сильным большим пальцем обеспечивает гораздо большую опору и контроль, нежели наша узкая «альтернатива». При этом наша латеральная устойчивость при ходьбе смещена вверх к бедру (см. рис. 1.5). Развернув подвздошные кости, а следовательно, и ягодичные мышцы таким образом, чтобы они были направлены наружу, мы получили возможность приводить бедро, чтобы переместить центр тяжести в сторону стопы, являющейся точкой опоры на земле. Этому способствует и направленный внутрь угол наклона бедренных костей, когда они спускаются к верхней суставной поверхности большеберцовой кости от тазобедренных суставов. В начале фазы опоры при ходьбе наши стопы также расширяются (особенно в направлении передней части стопы), улучшая опору.

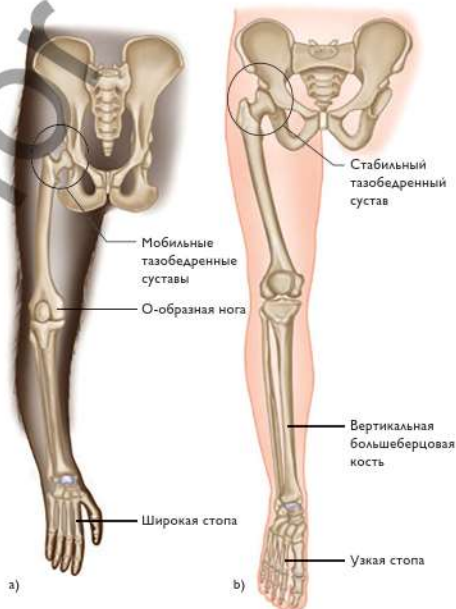


Рисунок 1.5. Широкая платформа стопы шимпанзе обеспечивает поддержку на большом диапазоне движения, в то время как со стороны бедра он меньше, что связано с анатомией. У человека обратная ситуация: узкая стопа, но латерально стабильное бедро.

■ АМОРТИЗАЦИЯ КОСТЯМИ В СРАВНЕНИИ С МЯГКИМИ ТКАНЯМИ

Чтобы понять последствия нашего выравнивания вдоль действия силы тяжести, мы должны понимать роли и свойства различных тканей тела. Как мы уже видели выше, любое сгибание в суставах вызывает большее использование мышц, в то время как наше достаточно вертикальное положение позволяет нашим костям «компоноваться» таким образом, чтобы использовать естественную «архитектурную» поддержку. Однако, в отличие от кубиков из нашего детства, кости нестабильны. Наши кости имеют гладкие поверхности, которые избегают во многих направлениях, покрыты гладким хрящом и отделены друг от друга суставными щелями, заполненными синовиальной жидкостью. Скелетной системе требуется сжимающая и растягивающая поддержка со стороны мышц; тот факт, что во время нагрузки каждая кость находится ближе к соседней, способствует экономии калорий.

Как и большинство других тканей тела, кость представляет собой динамическую ткань, постоянно перестраивающуюся в ответ на проходящие через нее силы, — идея, выраженная в законе Вольфа, впервые предложенном в 1892 году (см. главу 3). Механизм, управляющий ремоделированием кости, сложен и до конца не изучен, но в главе 3 мы рассмотрим, как кость балансирует свой минеральный и органический состав в целях весовой эффективности в контексте ее способности обеспечивать стабильность и при этом по-прежнему изгибаться и сжиматься в ответ на нагрузку.

Кость часто считают стабильным элементом, однако в рамках своей функции амортизации она может сгибаться (Lieberman, 1997; van Wingerden и др., 1993). С точки зрения функциональной анатомии, у кости множество ролей, но мы должны рассматривать ее исключительно как часть (хотя и важную) системы стабилизации тела и управления силой. Поскольку функции костей различаются в зависимости от их формы и положения, мы не можем анализировать или оценивать функцию какой-либо кости в отдельности.

Мы можем составить некоторое представление о значительной роли скелета в амортизации ударов, сравнив паттерны ударов во время бега. Первоначальный контакт стопы с землей во время бега за последнее десятилетие привлек большое внимание в связи с ростом популярности бега босиком. Для повышения эффективности и снижения травм, связанных с бегом, многими предлагались стратегии приземления во время бега на переднюю или среднюю части стопы. Однако критики этого подхода считают, что он лишь переносит задачу амортизации со скелетной структуры (как это происходит при ударе пяткой) на мягкие ткани. Приземление на какую-либо часть стопы спереди от пяточной кости предъявляет дополнительные требования к мягким тканям, которые должны контролировать «сгибания», возникающие в голеностопном суставе, — по сути, при беге «босиком» мы бежим подобно пальцеходящим (см. рис. 1.2) — на чередующихся суставах.

«Сложенные» друг относительно друга кости уменьшают нагрузку на мягкие ткани. Исследования преимуществ и издержек касания передней частью стопы по сравнению с касанием пяткой при беге приводили к разным результатам. Многочисленные обзорные документы не дают сделать окончательные выводы относительно наилучшей стратегии, и многие предполагают, что лучше всего предоставить этот выбор самому бегуну, который должен ориентироваться на свое собственное чувство комфорта и эффективности. Главное — помнить, что любое изменение стратегии приземления меняет то, как тело воспринимает стрессоры и справляется с ними, при этом у каждого из нас разные функциональные способности к адаптации. Среди факторов, которые могут ограничивать нашу адаптацию, можно назвать форму скелета, а также прочность и жесткость мягких тканей — у каждого из нас немного своя анатомия.

Как и в случае с бегом, в некоторых кругах также постоянной темой была пропаганда касания земли при ходьбе передней частью стопы. Похоже, что эта тема время от времени всплывает вновь, — и на YouTube доступны поучительные видеоролики, — но она далеко не нова.

Если вкратце, то в своей книге «Локомоция человека и форма тела» Мортон отверг ходьбу на переднем отделе стопы, однозначно заявив, что, в отличие от бега, в «примитивных культурах» при ходьбе не наблюдается приземления на передний отдел стопы. Касание пяткой при ходьбе — это не «изобретение», возникшее в ответ на современную обувь. Скорее всего, привычное использование модельной обуви с мягкой внутренней стелькой просто уменьшило естественную защиту от мозолей, которые образуются в ответ на касание пяткой.

Я упоминаю здесь обе стратегии — и бег «босиком», и ходьбу на передней части стопы, — чтобы убедить читателя в том, что данный текст не основывается на «веровании» в какую-то одну систему. Я считаю, что нам необходимо понимать функциональную анатомию с точки зрения сложного системного подхода, а здесь невозможно дать рекомендации «на все случаи жизни». Я надеюсь, что понимание анатомии и функции каждой ткани может способствовать разработке новых стратегий оценки и лечения, а то, что уже изучено, приобретет больший контекст для применения.

■ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ВЫНОСЛИВОСТЬ

В стратегиях локомоции есть два критических аспекта: эффективность (затраты на перемещение) и выносливость (расстояние, которое можно преодолеть). Мортон и многие другие исследователи сосредотачивались на том, что в основе эволюции лежит идея повышения эффективности. Лишь сравнительно недавно работа профессора Даниэля Либермана и его коллег выявила связанную с этим динамику выносливости, особенно при рассмотрении бега и возникшей благодаря ему новой охотничьей стратегии для увеличения источников калорий.

Выносливость связана с эффективностью, — чем эффективнее стратегия движения, тем дальше вы можете добраться, — но выносливость также связана с метаболическими показателями, такими как потребление кислорода, лактатный порог, температура и контроль дыхания. С анатомической точки зрения существуют

определенные маркеры, которые показывают роль стопы при различных стратегиях локомоции; Либерман утверждает, что в то время как при ходьбе стопа действует как жесткий рычаг, во время бега она в большей степени выполняет роль пружины, и лишь с недавних пор в нашей эволюции можно наблюдать изменения в стопе, которые позволяют ей действовать подобно пружине, используя свойство упругости.

Несмотря на то, что при ходьбе мы можем не использовать упругие свойства стопы в полной мере, наша походка определенно выигрывает от ее способности к пронации. Раскрываясь, стопа адаптируется к поверхности, образуя с ней лучшее сцепление, а небольшое разделение (суставная щель) между костями создает напряжение мягких тканей с соответствующими механорецепторами. Изменение натяжения тканей является важным элементом получения проприоцептивной информации о механической среде, и хотя Либерман подчеркивает отсутствие пружинистости при ходьбе, пронация по-прежнему является жизненно важным функциональным элементом нашего шага, который вносит свой вклад в общую выносливость.

Последовательность, показанная на рис. 1.6 на обратной стороне листа, дает нам представление о том, как каждое анатомическое изменение способствовало тому, что шаг выполнялся на все более и более прямых ногах, что делало его длиннее. Увеличение длины нижних конечностей приводит к более длинному шагу, а это означает, что преодоление того же расстояния требует меньшего количества шагов. Но такой более длинный шаг возможен лишь при наличии возможности приземлять переднюю стопу на пятку и при уменьшенных углах в каждом суставе.

Длина шага также связана с движениями задней конечности. При более длинном шаге необходимо, чтобы пятка задней ноги поднималась, что вынуждает разгибаться пальцы ног, колено, бедро и позвоночник. Хотя все показанные выше виды могут ходить на двух ногах, их шаги значительно короче либо из-за анатомических, либо из-за структурных ограничений, по крайней мере, одного из этих диапазонов движений. Именно совокупность всех выравниваний

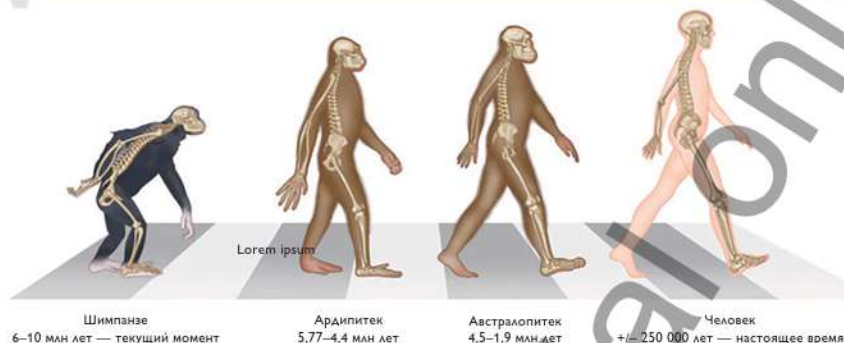


Рисунок 1.6. Черные и белые полосы «зебры» (пешеходного перехода) отражают ширину в один метр, показывая относительную длину шага для каждого вида. Напоминающие «Битлз» «участники» генеалогического древа демонстрируют нам, как менялась общая форма и как это влияло на длину шага. Эти изменения включают в себя:

- 1) развитие S-образного позвоночника и его центрального входа в череп;
- 2) уменьшение длины верхних конечностей и увеличение длины нижних конечностей;
- 3) подвздошную кость, обращенную латерально, и последующее перепрофилирование ягодичных мышц, которые прежде являлись исключительно разгибателями бедра, а теперь также взяли на себя роль отводящих мышц бедра;
- 4) обратите внимание, что у австралопитеков и у человека сесалишные бугры начинают выступать вниз — такой угол помогает улучшить рычаг действия подколенного сухожилия для разгибания бедра в вертикальном положении. Представьте себе шимпанзе на четвереньках — сесалишные бугры выступают назад, а туловище наклоняется вперед против силы тяжести.

В литературе имеется множество описаний анатомических изменений, необходимых для прямохождения, но лишь немногие сосредотачиваются на том, что Мортон считал наиболее важным, — изменениях в стопах. *Homo sapiens* с вертикальной осанкой, походкой с прямыми ногами и склонностью преследовать добычу на больших расстояниях нуждался в развитии стопы, способной удовлетворять самые разные требования. (Адаптировано из Pontzer, 2017.)

суставов и диапазона движения обеспечивает нам наш длинный шаг.

■ СИЛА РЕАКЦИИ ОПОРЫ И СИЛА ИНЕРЦИИ

Для длинных шагов требуется касание поверхности пяткой, а адаптации расположенных в этой области костей, кожи и жира еще больше подтверждают идею о том, что касание пяткой является наиболее естественной и нормальной стратегией ходьбы, почти уникальной для человека. Пяточная кость имеет дело не только с силой тяжести; она также справляется с силами, возникающими при ударе о землю и за счет инерции тела, когда оно проходит над стопой. Умение визуализировать непрерывное взаимодействие каждой из этих сил (силы тяжести, силы реакции опоры и силы инерции)

поможет лучше понять реакцию стопы, однако описать эти взаимодействия в этом ограниченном двухмерном пространстве будет непростой задачей.

Наша пятка оснащена несколькими амортизирующими механизмами, которые улучшают эффективность движения. Прежде чем достигнуть кости, сила удара сначала частично амортизируется твердой и толстой жировой тканью на пятке. Эта жировая прослойка дополнительно защищена слоями кожи, которые быстро утолщаются в ответ на увеличение действия этих сил. Здесь можно вспомнить переход в умеренном климате от зимних привычек к летним, когда человек меняет теплую, закрытую и относительно защищенную обувь на легкие летние сандалии или даже на ходьбу босиком в саду и на пляже. В первые несколько дней лета ноги могут быть немного чувствительными, но кожа быстро адаптируется,

на ней образуются мозоли, предназначенные для защиты этой области от любого увеличения действия трех сил — силы тяжести, силы реакции опоры (СРО) и силы инерции.

Сила тяжести, пожалуй, самая простая из трех сил, поскольку она постоянна как по величине, так и по направлению воздействия, в то время как две другие силы (сила реакции опоры и сила инерции) постоянно меняются по обоим этим величинам. В данном тексте можно было бы рассмотреть реакции стопы, возникающие в ответ на силу инерции при движении из стороны в сторону или назад, но для упрощения нашего рассказа мы будем рассматривать силу инерции в основном с точки зрения продвижения вперед (однако понимание движения вперед должно помочь вашему собственному анализу движения из стороны в сторону или назад).

Вторую из трех сил, СРО, пожалуй, будет оценить сложнее всего, поскольку она варьируется в зависимости от силы и угла

контакта. Именно сила реакции опоры отвечает за те ощущения, которые вы чувствуете при контакте с любой поверхностью, — ваша пятка касается земли, и вы чувствуете, как земля выталкивает вас обратно — с разной степенью силы в зависимости от характеристик поверхности. Вибрация, вызванная силой реакции опоры, является важным источником информации для механорецепторов стопы и остальных частей тела, которые помогают координировать реакцию всего тела.

СРО действует в противоположном направлении относительно контакта тела с землей и поэтому постоянно меняется по мере того, как стопа продвигается от пятки к пальцам стопы (рис. 1.7а). Нисходящая сила тяжести и сила инерции, а также восходящая сила реакции опоры проходят через кости, которые не выровнены по вертикали. Смещения между костями (рис. 1.7б) способствуют движению костей в определенных направлениях в ответ на поток проходящих через них сил. Именно из-за такой

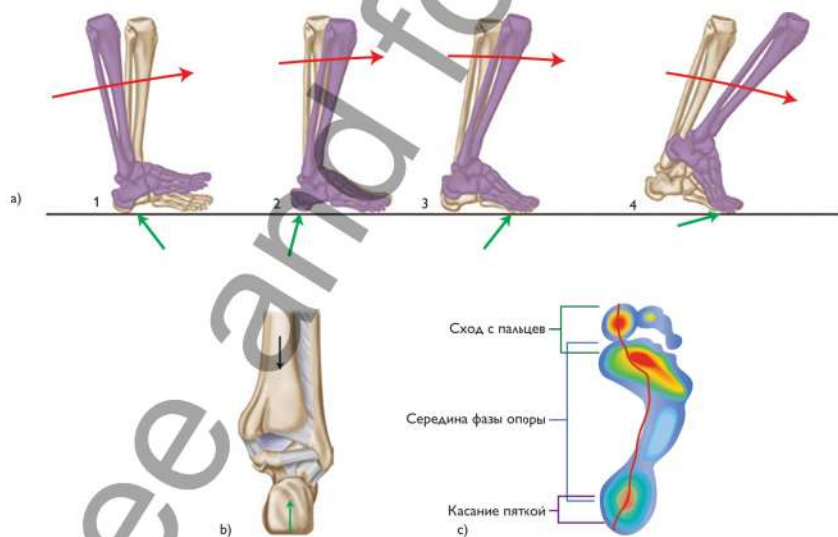


Рисунок 1.7 а) СРО, обозначенная зеленой стрелкой, изменяется в ответ на движение стопы. б) Небольшое смещение в пяточной и таранной костях вызывает смещение между противодействующими силой тяжести, СРО и силой инерции, что создает относительно предсказуемую реакцию в остальной части комплекса стопы и голеностопного сустава. в) Показания силовой пластины — отмечены три точки: касание пяткой, середина фазы опоры и сход с пальцев.

взаимосвязи между силами, костями и мягкими тканями Мортон описывает походку как «взаимодействие». Здесь необходимо учитывать множество переменных, начиная от формы кости и заканчивая углом контакта, направлением движения и сокращением мышц.

Нередко для визуализации того, как стопа взаимодействует с землей, используется анализ с помощью пластины давления (рис. 1.7с).

Показания пластины давления являются полезным инструментом для анализа походки, но могут быть неверно интерпретированы, если вы не понимаете, что происходит со стопой и давлением во время шага. Диаграмма выглядит как отпечаток стопы, но это отпечаток, оставшийся после шага, который включает в себя касание пяткой, середину фазы опоры и сход с пальцев*. Мы видим две области высокого давления при касании пяткой и распределение нагрузки в середине фазы опоры. Касание пяткой можно легко представить в виде удара, и часть этого удара поглощается различными тканями, о которых говорилось выше. Показатели давления до схода с пальцев меняются, поскольку по мере того, как пятка поднимается, а пальцы разгибаются, все меньшая и меньшая часть стопы соприкасается с землей.

Многоцелевой механизм амортизации, известный как пронация, возникает, когда мы адаптируемся к рельефу и начинаем переносить вес на стопу. Но за раскрытием пронации стопы должно последовать обратное действие, создающее устойчивую платформу, способную справиться с многочисленными силами, которые возникают при схождении с пальцев и относительном давлении стопы в землю.

Показания силы в фазе опоры также указывают на изменения в стабильности стопы при ходьбе. Как упоминалось выше, стопа может быть стабильным жестким рычагом при супинации или «подвижным связующим звеном» при пронации. Справляться со связанными силами на двух пиках усилия (при касании пяткой

и при схождении с пальцев) легче, когда стопа супинирована и обеспечивает стабильную платформу и жесткий рычаг. Поскольку вес во время ходьбы переносится на опорную стопу, в то время как другая стопа выносятся вперед, у нас есть только одна точка контакта с землей. Раскрытие стопы в пронацию, способствующее максимизации ее способности приспосабливаться, и ее расширение (хотя и незначительное) улучшают стабильность в момент, когда происходит перенос другой конечности вперед.

Мах ноги вперед обеспечивает инерцию для нашего продвижения вперед над нашей специальным образом адаптировавшейся стопой. Каждая из фаз, от касания пяткой до схождения с пальцев, облегчается наличием у стопы череды округлых поверхностей. Задняя часть пятки, голеностопный сустав, подушечки стопы и суставы пальцев стопы способствуют так называемым «перекатам» стопы (см. рис. 1.9 и главу 2), которые помогают нам продвигаться вперед. Гладкие суставные поверхности и их выравнивание позволяют мягким тканям реагировать соответствующим образом и, предпочтительно, с минимальным активным воздействием со стороны мышц. В идеальной стопе, в идеальной среде, с идеальной инерцией стопа может быть почти самостоятельно действующим механизмом.

■ МЯГКИЕ ТКАНИ И КОСТНЫЕ «ПЕРЕКАТЫ»

Распространенной ошибкой является предположение, что большая сила при схождении с пальцев (см. рис. 1.7с) создается подошвенными сгибателями и мышцами-сгибателями пальцев стопы, которые проталкивают нас вперед. Это может быть правдой, но увеличение силы является также результатом уменьшения площади контактной поверхности (следовательно, меньшее распределение веса тела) в сочетании с натяжением многих эластичных элементов по мере того, как происходит разгибание пальцев стоп и растяжение подошвенных тканей. В этой книге я предпочитаю использовать «схождение с пальцев», а не более распространенное «отталкивание», так как считаю,

* Можно было бы использовать еще более детальную разбивку на фазы, но следующие три фазы вполне соответствуют нашей задаче увидеть, как стопа переходит от супинации к пронации, а затем снова к супинации.

что отталкивание — это активное действие. Отталкивание с преднамеренным мышечным сокращением — это всего лишь один из вариантов, доступный нам в ответ на изменение таких переменных движения, как, например, более быстрая ходьба или подъем в гору. Чтобы понять всю сложность стопы, мы должны рассмотреть ее в экосистеме тканей и ее реакций на силы.

Любая экосистема работает в направлении уравнивания различных сил, которым она подвергается, например, в растительном мире на биосистемы будут влиять тип горной породы, состояние почвы, высота, экспозиция, широта и долгота. Стопа должна работать в контексте своих костей, мягких тканей и сил окружающей среды, и, как активная экосистема, она может адаптироваться в краткосрочной и долгосрочной перспективе к изменениям окружающей среды путем ремоделирования мягких тканей (включая кожу) и костей.

Последующие главы помогут лучше понять многие из этих сложных взаимодействий, но сначала мы должны увидеть весь ландшафт, чтобы оценить роли его многочисленных частей. К концу книги мы вновь сможем взглянуть на общую картину и увидеть все богатство и красоту взаимодействия всех факторов.

Обычно учебники анатомии создают представление, что продвижение вперед от касания пяткой до схождения с пальцев возникает в результате концентрического сокращения мышц. Чтобы помочь нам расширить наше понимание мышечной деятельности, Мортон предлагает нам представить, что мышцы — это человек, управляющий инвалидной коляской: временами необходимо ее активно толкать, но если вы толкаете слишком сильно или если подъем сменится спуском, вам, возможно, придется тянуть ее обратно. Иногда, при подходящем угле наклона поверхности, когда инвалидная коляска находится в движении, управляющий может расслабиться и просто ловко направлять ее. Образ, предложенный Мртоном, представляет собой аналогию мышц, работающих концентрически при активном продвижении вперед — действии, содержащемся в каждом тексте по анатомии. Но иногда мышцы должны создавать обратное натяжение, чтобы уменьшить

силу инерции, и работать эксцентрически, и нередко они могут работать с минимальными усилиями, лишь протягивая «руку помощи», если все движется хорошо.

Когда мы движемся, наши мышцы работают так же, как тот, кто управляет инвалидной коляской, инстинктивно переключаясь между толканием, тягой и указанием направления. Крайне редко, — если такое вообще возможно, — кто-то сможет сознательно контролировать во время движения каждую мышцу. Мы естественным образом переключаемся между проталкиванием себя в гору и замедлением себя, когда спускаемся с противоположной ее стороны. И работа, создающая положительную инерцию (концентрическая), и работа, замедляющая отрицательную инерцию (часто эксцентрическая), требуют активного мышечного сокращения для борьбы с действием силы тяжести и угла наклона.

При ходьбе в среднем темпе по плоской ровной поверхности мы задействуем инерцию, чтобы обеспечить эффективное продвижение вперед, и наша инерция вперед усиливается рядом суставов, которые преимущественно выровнены в сагиттальной плоскости. После того как у человека произошло приведение большого пальца стопы к остальной части стопы, связанные с ним суставы были приведены в аналогичное сагитальное выравнивание. Когда мы сравниваем путь переноса веса тела человека над его стопой с траекторией движения других приматов (рис. 1.8), мы видим, что стопа человека перемещается более равномерно, и мы двигаемся с относительно прямыми конечностями, чтобы уменьшить мышечную нагрузку. Другие приматы приземляются на стопу и поднимают ее, используя большее сгибание бедра и колена и более короткий шаг, что увеличивает метаболические затраты на их передвижение.

Оптимизация стопы была достигнута за счет приведения большого пальца стопы, и это новое выравнивание позволяет нашей стопе, тазу и туловищу перемещаться прямо вперед через так называемые перекаты стопы (рис. 1.9). Каждая из этих относительно закругленных поверхностей помогает поддерживать инерцию и направление нашей походки вперед. Все начинается с переката пятки сразу

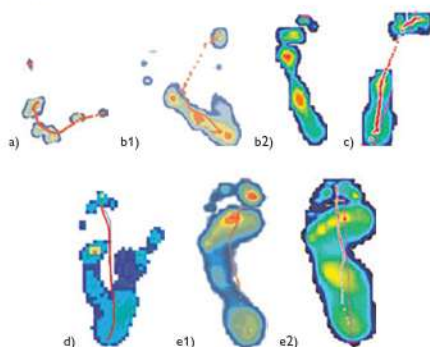


Рисунок 1.8. Карты пикового подошвенного давления (высокое давление отображено красным, низкое — синим) для гиббона (а), бонобо (b), орангутана (с), гориллы (d), человека (e1) и человека с «плоскостопием» (e2). Путь переноса веса (показан красной линией) для гиббона указывает на то, что первым в контакт с опорной поверхностью вступает отведенный большой палец стопы, а не пятка. У бонобо стопы, как правило, находятся в сильной эверсии (b1), но иногда могут быть и в инверсии (b2). Путь переноса веса орангутана (с) и гориллы (d) указывает на относительно сагиттальное продвижение, но не показывает увеличения пиковой силы при касании пяткой или ходе с пальцев стопы. Карта давления для изогнутой стопы человека (e1) отображает медиально-латерально-медиальную передачу давления в отличие от более сагиттального перемещения при плоскостопии (e2).

Следует отметить, что данные показания являются результатом контакта с пластиной и указывают на приподнятую медиальную часть стопы.

(Адаптировано из Crompton, Vereecke and Thorpe, 2008.)

после касания пяткой, и мы быстро переходим от касания только пятки к соприкосновению

с поверхностью почти всей стопой. Затем контакт передней части стопы передает инерцию в голеностопный сустав, и мы «перекатываемся» через головку таранной кости, а затем, — когда пятка начинает подниматься, чтобы запустить разгибание пальцев, — через переднюю часть стопы.

Влияние скорости на эффективность исследовалось множество раз на протяжении многих лет, и исследования показали нам именно то, что мы уже считали правдой: ходьба в более медленном или в более быстром темпе, нежели тот, который предпочтителен для нас, более утомительна (рис. 1.10, для дальнейшего обзора см. Pontzer, 2017). Без достаточной скорости нашей походки для продолжения движения мы используем больше мышечных усилий. Точно так же, если нам нужно ускориться, всю работу будут выполнять мышцы. Вернемся к образу инвалидной коляски Мортона: когда скорость «в самый раз» и мы с легкостью проходим все наши «перекаты», мышцы могут просто направлять нас. Похоже, что у каждого из нас есть некая золотая середина, где мы можем оптимизировать использование гладких суставных поверхностей и повторно использовать энергию нашей инерции в наших многочисленных эластичных тканях, но этот анализ мы оставим на потом.

Важно помнить, что при ходьбе инерция направлена не только вперед; также будет возникать некоторая сила, направленная вверх/вниз, создаваемая подъемом и опусканием тела, когда оно перемещается через перекат пятки. Хотя кому-то может показаться, что вертикальные колебания — перемещение веса вверх и вниз

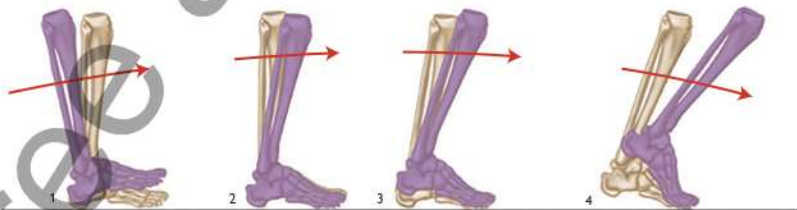


Рисунок 1.9 Перемещению тела в сагиттальной плоскости способствует архитектура костей и суставов стопы. Между касанием пяткой до схождения с пальцев происходят четыре так называемых «переката»: через пятку, через голеностопный сустав, через переднюю часть стопы и через пальцы стопы.

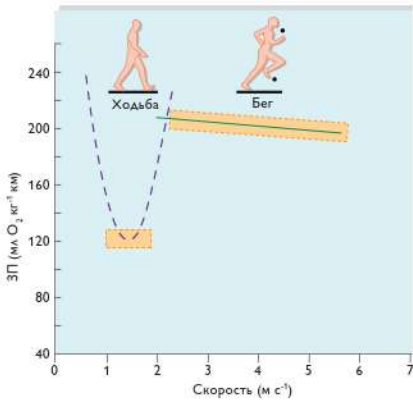


Рисунок 1.10. Затраты на перемещение (ЗП) рассчитываются как количество кислорода (O_2), потребленного на килограмм на пройденный километр. Эффективность ходьбы очень сильно зависит от скорости — более медленная или более быстрая ходьба увеличивает потребление кислорода. Как демонстрирует прямая линия на рисунке, эффективность бега менее чувствительна к скорости с точки зрения затрат калорий на пройденный километр. (Адаптировано из Bramble и Lieberman, 2004.)

при каждом шаге — являются пустой тратой энергии, было обнаружено, что уменьшение

или устранение вертикальных колебаний увеличивает метаболические затраты на движение вперед. Однако, как и в случае со скоростью походки, в отношении уровня колебаний также действует «правило Златовласки». Если мы полностью исключим вертикальное смещение, затраты на передвижение возрастут, если же мы увеличим смещение, это приведет к увеличению затрат.

Мы упомянули, что одной из функций стопы является создание жесткого рычага для того, чтобы справиться с силами, возникающими при схождении с пальцев, однако стопа не только обеспечивает продвижение вперед, но и при этом приподнимает вес тела против действия силы тяжести. Это другая составляющая данной динамики, которую мы видим в показаниях давления стопы (см. рис. 1.8). Устойчивость стопы при схождении с пальцев помогает удерживать часть энергии, выделяемой телом при подъеме и опускании, а мягкие ткани перенаправляют это движение для оптимизации эффективности.

Инерция другой стопы, находящейся в фазе переноса, тянет нас за собой через последние два переката, осуществляемых стопой, расположенной сзади. Посмотрите на тайминг событий во время цикла походки на рис. 1.11.

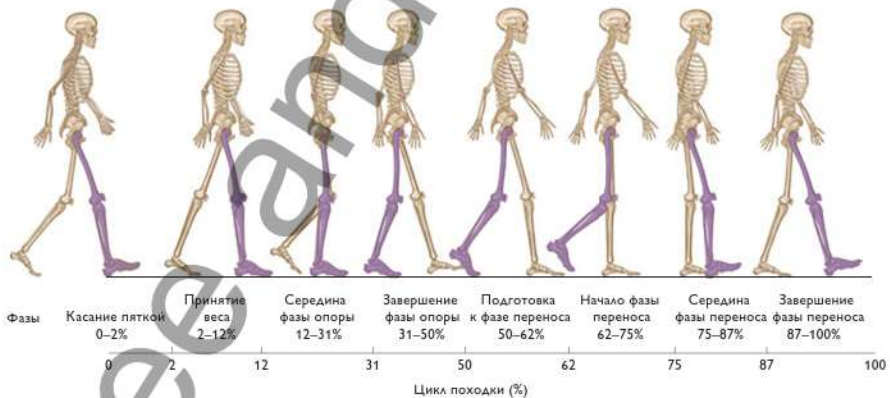


Рисунок 1.11. Походка традиционно делится на две основные части — фазу опоры и фазу переноса. Фаза опоры с момента касания пяткой (0%) до схождения с пальцев (62%) проходит через каждый из четырех перекатов стопы. После схода с пальцев происходит перенос конечности вперед, она готовится к следующему касанию пяткой (62%–100%), и последовательность повторяется.

Когда левая нога выдвигается вперед, правая стопа отвечает на это подъемом пятки и следующим за этим разгибанием пальцев стопы. Со стороны это можно интерпретировать как сокращение подошвенных сгибателей правой стопы, но это не обязательно. В тот момент, когда происходит перенос другой конечности вперед, опорная стопа должна отреагировать, и эта реакция заключается в создании устойчивой супинированной стопы, которая помогает нам слегка приподнять тело и создать опору для взаимодействия с силами, возникающими при схождении с пальцев.

Хотя мы часто апеллируем к выравниванию нашего скелета относительно действия силы тяжести и к способности использовать эффективную стратегию ходьбы на прямых ногах, наши кости нередко смещены друг относительно друга, и их поверхности практически не имеют трения, что не обеспечивает присущей им стабильности. Таким образом, чтобы предотвратить слишком большое движение каждого сустава, необходимо стабилизировать вертикально ориентированные силы. Величина такого смещения опять же определяется, исходя из «принципа Златовласки»: нам, с одной стороны, нужно некоторое движение в каждом суставе, чтобы отклонить ударную силу, но при этом это смещение должно быть не настолько большим, чтобы перенаправить значительную часть работы в мягкие ткани. Как мы видели выше, из-за увеличенных углов в суставах у четвероногих и тех, кто перемещается на костяшках пальцев, у них возрастают метаболические затраты на передвижение. Слишком много движений в суставах увеличивает работу мышц по восстановлению исходного положения, при этом, наоборот, недостаток движения в суставах также может снизить эффективность мягких тканей.

Использование подходящих углов в суставах позволяет передать большую часть силы через кости, в то время как часть силы отражается в мягкие ткани. Своим удлинением в ответ на изменения в каждом суставе мягкие ткани обеспечивают быструю амортизацию. Происходящее при ударе пяткой небольшое смещение костей создает определенные требования к соответствующим мышцам и связанным с ними

коллагеновым тканям — сухожилиям и различным уровням фасциальных оболочек (эндомизию, перимизию и эпимизию, см. рис. 1.13). Удлинение эластичных коллагеновых тканей и натяжение мышц усиливают амортизацию,



Рисунок 1.12. Небольшие углы в каждом суставе позволяют некоторой части силы инерции, силы реакции опоры и силы тяжести уходить в мягкие ткани. Сопутствующее мышечное напряжение предотвращает дальнейшее сгибание суставов, а коллагеновые ткани укрепляются для общего повышения эффективности. Если удерживать суставы прямыми, большая часть усилий будет передаваться через кости; если суставы слишком согнуты, большая нагрузка ложится на мягкие ткани. Достижение такой степени смещения, которая соответствует «принципу Златовласки», позволяет каждой ткани управлять соответствующим усилием.

могут накапливать энергию упругости, чтобы способствовать отдаче, а также активизируют механизмы эффективности для дальнейшего снижения метаболических затрат (эта динамика будет рассмотрена позже в главе 5).

Быстрый эксперимент с ходьбой может показать, как слегка согнутое положение колена и бедра при касании пяткой заставляет оба сустава немного больше сгибаться в ответ на возникающую при касании пяткой ударную силу (рис. 1.12). Мы видим ту же реакцию на рис. 1.11 — по мере того как вес тела переносится на переднюю стопу, происходит небольшое увеличение сгибания ее суставов. Согнутое или слегка смещенное положение инициирует реакцию сустава на силы, которые затем должны перейти под контроль мягких тканей. Механизм размыкания, который мы описали для тазобедренного и коленного суставов, очень похож на то, как действует стопа: смещение между пяточной и таранной костями (см. рис. 1.7b) является ключевым элементом для раскрытия супинированной, жесткой стопы, необходимой при касании пяткой

в «подвижный амортизатор», необходимый для принятия веса тела. Размыкание стопы позволяет ей адаптироваться к поверхности местности и амортизировать возникающие при воздействии удары, но затем нам снова нужна компактная, жесткая стопа, которая помогла бы нам двигаться вперед при схождении с пальцев.

■ ИСТОРИЯ ДО НАСТОЯЩЕГО ВРЕМЕНИ

Структура и функция стопы человека крайне необходимы для того невероятно эффективного способа передвижения, который мы называем ходьбой; мы будем продолжать возвращаться к анализу походки, поскольку он помогает рассматривать анатомию в контексте. К текущему моменту мы исследовали несколько общих более крупных тем: наше взаимодействие с силой тяжести, осуществляемое посредством многочисленных скелетных изменений, облегчает стопе прямой ноги касание пяткой, которое

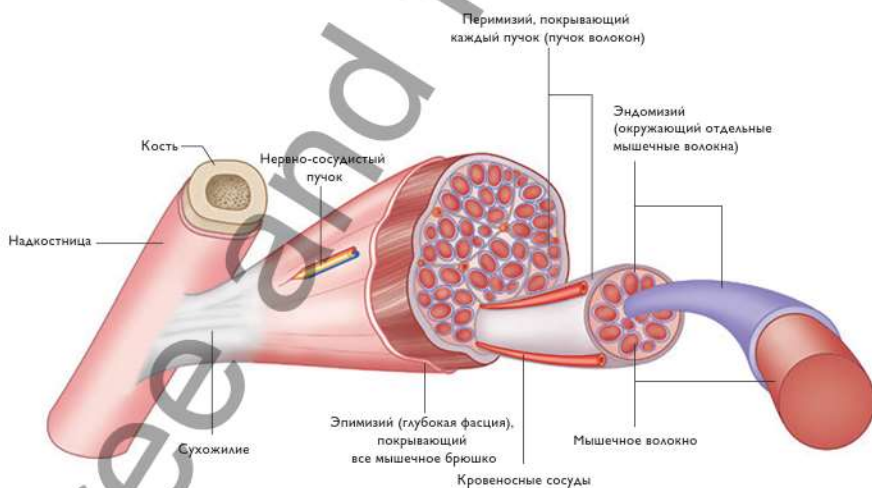


Рисунок 1.13 Скелетно-мышечная система состоит из тканей различной плотности и жесткости. Жесткая, плотная кость обеспечивает относительно стабильный каркас, который другие ткани используют в качестве якоря для взаимодействия с проходящими через них силами.

«перекачивает» нас прямо вперед, тем самым создавая и поддерживая силу инерции и нашу способность использовать эту силу инерции (с разных направлений) и уменьшать активную мышечную работу.

С точки зрения использования энергии во время движения у тканей существует определенная иерархия. Как мы знаем из нашей базовой анатомии, одним из основных свойств кости является та опора, которую она обеспечивает. Кость представляет собой относительно стабильную структуру, способную немного сгибаться под нагрузкой, но, по сути, обеспечивающую телу внутренний каркас. Этот внутренний каркас удерживается связками. Связки поддерживают соотношение между костями, поскольку кости, как известно, весьма скользкие. Как и кости, будучи выстроенными, связки обеспечивают энергосберегающую структурную поддержку, и это контрастирует с мышечными сокращениями.

Еще один аспект, который мы добавим к этой истории в следующих главах, — это наша способность перерабатывать энергию. Затраты на движение в основном возникают за счет мышечной активности (как показывает эффект медленной и быстрой ходьбы, см. рис. 1.10), при этом другие ткани, такие как кости и связки, минимизируют затраты; в их усилиях их объединяют коллагеновые ткани, которые окружают и поддерживают мышцу (рис. 1.13). Череду «мизиев» можно рассматривать как оберточные мешки для мышечной ткани; они закладывают в себе мышцу, придают ей форму, направляют и передают силу ее сокращений, а также поглощают какую-то часть энергии от взаимодействия тела с силой тяжести, силой реакции опоры и силой инерции, чтобы затем повторно ее использовать в помощь нашему движению.

Степень поддержки, обеспечиваемая любой тканью, частично определяется ее жесткостью — ее способностью сопротивляться сгибанию. Кость является самой жесткой из упомянутых тканей и, следовательно, обеспечивает наибольшую часть присущей нашей форме стабильности и поглощает большую часть силы при ударе. Ударная сила проходит через тело в зависимости от нескольких факторов: угла

СРО, угла расположения суставов, центра тяжести и естественной способности суставов (более полное описание этих последовательностей см. в Born to Walk, 2020).

Как уже упоминалось выше, мы не хотим, чтобы какой-либо из наших суставов замыкался при касании пяткой, и мы не хотим, чтобы они разваливались. У каждого сустава есть свой естественный паттерн «складывания», основанный на вышеуказанных факторах. Этот паттерн определяется архитектурой сустава, костным расположением его контуров, борозд и суставных поверхностей. Суставные поверхности удерживаются связками, которые поддерживают целостность суставов и определяют углы, под которыми каждая кость движется относительно своих соседей. Далее движение костей контролируется посредством мышечной



Рисунок 1.14. Положение жесткого рычага, возникающее в стопе при сжатии с пальцев, обеспечивает выравнивание суставов и соответствующих тканей. Пальцы стопы, голеностопный сустав, тазобедренный сустав и позвоночник разгибаются, что создает натяжение мягких тканей, подготавливая конечность к переносу вперед.

реакции, и именно здесь могут возрасти затраты энергии.

При медленной или быстрой ходьбе, увеличении или уменьшении скорости или при создании смещения между костями и мягкими тканями требуется дополнительная энергия на восстановление. Если мы посмотрим спереди на положение стопы при ходе с пальцев, то увидим, как пальцы стопы, голеностопные суставы, колени и бедра выровнены для того, чтобы справиться с направленной вперед инерцией (см. рис. 1.14). Между всеми этими суставами существует реципрокная организация, и смещение в одной ее части может повлиять на поток энергии к другим.

■ ВОЗВРАЩАЯСЬ К РАССМОТРЕНИЮ СТОПЫ КАК ЦЕЛОСТНОЙ, ИНТЕГРИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ

Анатомия неоднократно возвращает нас к деталям отдельных структур и дискретной динамике. Это производит впечатление простоты, в то время как реальность, конечно, намного сложнее. Большинству из нас рассказывали о трех или четырех арках стопы — медиальной и латеральной продольной, проксимальной и дистальной поперечной. Это полезные обозначения, но ни одно из них не помогает оценить всю целостность стопы, которую Мортон считал дискретным функционирующим органом.

В пути первой линии адаптации стопы является миофасциальная система, поскольку именно эти мягкие ткани реагируют на сигналы от сети механорецепторов. Как и в аналогии с инвалидной коляской Мортон, мышцы регулируют свое напряжение, чтобы создать точные «настройки» движения за счет изменения жесткости тканей. «Отпускающая»

или «натягивающая» (эксцентрически или концентрически сокращаясь), мышцы контролируют напряжение через сеть тканей. Нашей следующей линией адаптации являются изменения в мышечной силе, которая может увеличиваться или уменьшаться в зависимости от воздействующей рабочей нагрузки. Затем следуют изменения в коллагеновых тканях, и, наконец, кости также могут перестраиваться в ответ на многократно повторяющееся действие силы.

Мортону нравилось думать, что стопа обладает особыми свойствами, помогающими улучшить функцию «всего биотического комплекса». Мортон считал стопу органом, предназначенным для передвижения человека, созданным благодаря нашей реакции на силу тяжести, и этот факт прекрасно иллюстрируется рисунками трабекул, которые можно увидеть с помощью рентгеновских лучей (рис. 1.15).

Трабекулы, которые мы будем более подробно рассматривать в главе 3, являются внутренним каркасом кости и помогают уменьшить вес и увеличить общую прочность кости. Построенные клетками остеобластов, трабекулы формируются там, где в системе возникает



Рисунок 1.15. «Общий биотический комплекс» стопы подчеркивается непрерывностью направления трабекул между отдельными костями. Несмотря на то что кости рассматриваются как отдельные структуры, они действуют вместе как единая функциональная единица, управляющая силой во время движения.

* В этом вопросе в литературе наблюдается значительное несоответствие: в одних источниках утверждается наличие трех арок, при этом не принимается в расчет дистальная поперечная арка стопы, в то время как в других источниках она учитывается. В конечном итоге, данный вопрос кажется весьма академическим, как только мы помещаем стопу в контекст единого целого.

напряжение. Рисунки, созданные этими внутренними структурами, обеспечивают надежное свидетельство направления распределения силы внутри отдельной кости. Наибольший интерес на рентгенограмме представляет непрерывность направления трабекул от одной кости к другой.

Просто невероятно, насколько удивительной может быть идея функционального единства! Изучение дискретной анатомии иногда уводит нас от реальности целого.

Восприятие Мортеном стопы как органа получило поддержку со стороны его современника Дж. Маккензи с кафедры анатомии Абердинского университета. В 1955 году Маккензи опубликовал статью, в которой он упоминает Элиса (1889) и Джонса (1944), поддерживающих идею того, что стопа — это полукупол, а не набор арок стопы. В статье в *British Medical Journal* Маккензи сокрушается по поводу того, что «у большинства студентов, к сожалению, сложилось нелепое впечатление, что при ходьбе человек использует только продольные арки стопы...» (стр. 1069).

Недавно концепция полукупола вновь появилась в Британском журнале спортивной медицины (McKeon и др., 2014), но с немного менее характерной прозой. В этой статье был сделан еще один шаг вперед на пути к тому, чтобы показать интеграцию мягких тканей с костной структурой. МакКеон и его коллеги представили ряд подсистем, которые составляют общую «систему стержня стопы», предлагая интегрированный подход к пониманию стопы, который поможет определить общий формат для остальной части этого текста, поскольку они подразделяют «орган» стопы на три подсистемы.

- **Пассивная подсистема** — кости арки стопы (полукупол стопы); подошвенная фасция, связки.
- **Активная подсистема** — внутренние мышцы стопы (локальные стабилизаторы); внешние мышцы стопы (глобальные мобилизаторы).
- **Нервная подсистема** — мышечно-суставные рецепторы, локальные

и глобальные; связочные рецепторы (включая подошвенную фасцию); подошвенные кожные рецепторы.

Мы уже обсудили многие ткани с точки зрения энергоэффективности и их различных ролей в системе. Пассивная подсистема расходует меньше метаболической энергии на поддержку, чем активная подсистема, а активная подсистема в режиме реального времени получает постоянные обновления информации о положении и реакциях благодаря проприоцепции, осуществляемой с помощью различных рецепторов. Эти рецепторы расположены в суставах и вокруг них, а также в коллагеновых тканях; это области, испытывающие напряжение, и проприоцепторы передают им ответные реакции организма, чтобы направлять его реакцию через активную подсистему.

Три подсистемы можно представить в виде жестких строительных подмостков и поддерживающих их тросов, а мышцы действуют как регуляторы тонких настроек, сближающие или высвобождающие кости в ответ на ощущения, получаемые через механорецепторы, когда силы проходят через тело. Хотя мы описываем их по отдельности, все эти уровни работают одновременно как гетерархия: ни одна система не является более важной или независимой, чем другая. У каждой системы есть свое место, и ее особенности следует рассматривать изолированно, но чтобы по-настоящему понять ее, мы должны увидеть, как все эти системы взаимодействуют между собой.

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

Адаптация формы наших стоп обеспечила нас множеством важных преимуществ, особенно с точки зрения снижения метаболических затрат на передвижение. Одним из основных факторов, способствующих этой эффективности, было увеличение длины шага благодаря тому, что одна стопа приземляется на пятку, а другая осуществляет сход с пальцев, выравненный в сагиттальной плоскости. Эволюционные силы изменили форму и, следовательно, функцию других костей и суставов, особенно таза

и позвоночника, чтобы обеспечить вертикальное выравнивание и устойчивость, в то время как задача амортизации по большей части была передана стопе.

Способность к супинации (замыкание в положении жесткого рычага) и пронации (размыкание и превращение в подвижное «связующее звено») уникальна для *Homo sapiens* и является важной чертой нашей эффективной походки. Способность нашей стопы переключаться между двумя состояниями иллюстрируется силами реакции опоры, показанными на рис. 1.7с и 1.8. Два пика силы: один — после касания пяткой, другой — перед схождением с пальцев относятся к положению жесткого рычага.

Функциональная анатомия в действительности представляет собой взаимодействие

между формами, силами и характеристиками ткани. Реакция ткани на эти силы будет зависеть от свойств ее материала. Чтобы оценить влияние формы, мы должны рассматривать структуру под действием силы тяжести, силы реакции опоры и силы инерции. Понимание действия сил поможет нам лучше понять, какое влияние оказывает форма и строение ткани; способность видеть форму помогает нам визуализировать передачу силы; и передача силы будет зависеть от свойств ткани и ее формы.

В следующих главах представлены и резюмированы все эти характеристики в виде спиралевидного узора, по мере того как мы сплетаем и расплетаем для вас «сложность бесконечных деталей» стопы.

ЭВОЛЮЦИЯ И РАЗВИТИЕ СТОПЫ

Очевидно, что основная причина того, что человек усвоил прямоходящую походку, заключается в ее низких метаболических затратах.

История того, как человек стал двуногим, — это история, написанная языком биомеханики.

Дадли Дж. Мортон,
«Человеческая форма и локомоция»

■ ВВЕДЕНИЕ

Теория эволюции в равной степени полезна и сложна. В данной главе мы дадим обзор ее современного понимания и поделимся практическими знаниями о некоторых инструментах и терминологии, используемых в палеоантропологии*. В соответствии с идеей понимания на-

шего предмета, понимание основных аспектов эволюционной механики расширяет наше понимание функциональных сходств и различий между видами. Изучение того, как происходило развитие человеческой стопы, со временем позволит нам сопоставить различные формы костей и получить более глубокое представление о том, что они могут или не могут делать, поскольку каждая форма уникальным образом взаимодействует со своими соседями.

Чтобы понять стопу, необязательно изучать эволюцию, но я просто полагаю, что это помогает. Не обязательно даже верить в эволюцию, поскольку моя цель состоит не в том, чтобы проповедовать науку, а в том, чтобы показать научно обоснованную историю, которая помогает понять анатомическую форму и происходившие с ней изменения. Посредством этой истории мы увидим развитие первых стоп, а также некоторые экологические и генетические механизмы, которые позволили им эволюционировать в современные стопы.

Литература, описывающая эволюцию, может быть столь же разочаровывающей, сколь и увлекательной. Она написана загадочным языком и наполнена постоянно меняющимся

* Палеоантропология — это исследование эволюционного происхождения современного человека, которое сочетает в себе доказательства из ряда источников, включая ископаемые останки и культурные артефакты.

списком персонажей, где новые виды появляются или переназначаются почти каждую неделю, еще больше разделяя существующие мнения. Там, где это возможно, я укажу на области, вызывающие путаницу или противоречие, но общая цель состоит в том, чтобы глубже изучить значение формы и воспринимать это как введение в сравнительную анатомию и экологию.

Данная глава бросает вызов нашим предубеждениям, особенно в отношении человеческой исключительности и того, как мы воспринимаем природу в целом.

Многие анатомические различия между видами контролируются интересными генами Нох, и мы увидим, как разные виды могут по-разному «перепрофилировать» ту или иную кость, но при этом у разных семейств можно распознать общий план тела позвоночных. Есть надежда, что рассмотрение того, как наше анатомическое устройство соотносится с остальной частью животного царства, поможет нам установить более глубокую связь с окружающим нас природным миром.

В основном эта глава направлена на то, чтобы ответить на вопросы: откуда произошла наша стопа; почему она похожа на многие другие; и что в ней особенного и уникального?

Истинная жизнь происходит только там, где совершаются чуть-чутьные дифференциальные изменения.

Лев Толстой

■ ИЗМЕНЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ

Хотя обычно мы используем слово «развилась», чтобы подчеркнуть нечто лучшее, высшее или высокоразвитое, слово «эволюция» подразумевает лишь изменение с течением времени и отделена от любого иерархического подтекста. Эволюция обычно воспринимается как продвижение к лучшим и более совершенным формам, с некоторой формой иерархической лестницы природы («Лестница бытия», рис. 2.1), почти эндемичной в наших мыслительных процессах. Чтобы лучше соответствовать современному мышлению, многие «деревья жизни» теперь представляются в виде круга, а не в виде традиционной лестницы.

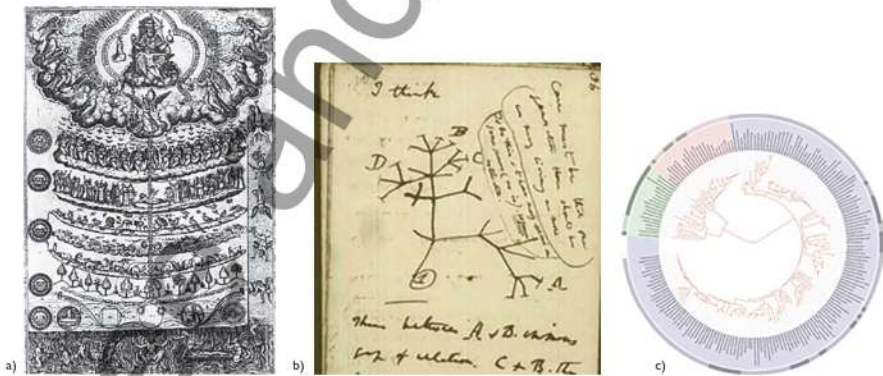


Рисунок 2.1 На протяжении тысячелетий природный мир отображался по-разному. Аристотель представил его в виде «лестницы природы» (а), а Дарвин — в виде древа (б), однако оба эти образа создают впечатление прогресса и порядка в мире природы. В более поздних представлениях предпочтение отдается кругу (с), который по-прежнему визуально отображает эволюционные отношения, но делает это с большей эквивалентностью между видами.

Существует также много неверных представлений о том, с какой скоростью могут изменяться и адаптироваться виды. Среди наиболее распространенных представлений можно обнаружить вариации от ледниково-медленной кумуляции изменений до внезапных мутаций, за которыми следуют периоды фиксации.

Как обычно, правда в том, что изменения могут происходить с разной скоростью в зависимости от колебаний в сложном диапазоне переменных. Например, недавняя работа (Грант и Грант, 2008), посвященная видам птиц, показала, как размер популяции, групповые взаимодействия, климатические и экологические факторы влияют на то, какие признаки популяции усиливаются и отбираются для сохранения, а какие — уменьшаются.

Генетическое изменение внутри вида происходит естественным образом, и скорость, с которой положительное влияние одного признака закрепляется в популяции, зависит от множества факторов. Вопреки ожиданиям Дарвина, что эволюционное давление будет медленным, работа Розмари и Питера Гранта (Grant и Grant, 1993) показала, как нормальные климатические колебания могут вызывать изменения формы в течение одного поколения.

Отмеченная наградой работа Грантов была выполнена на острове Дафна-Майор в знаменитом Галапагосском архипелаге, на котором они жили в лагере в течение шести месяцев каждый год, начиная с 1973 года, чтобы каталогизировать широкий спектр данных, включая долгосрочное изучение галапагосского вьюрка. Гранты показали значительные изменения размера и формы клюва у галапагосских вьюрков в ответ на колебания количества осадков от года к году. Количество доступной воды влияло на рост растительности, что, в свою очередь, влияло на пищевые ресурсы птиц. Различия в доступности тех или иных типов семян (больших и твердых или маленьких и мягких) влияли на то, какие вьюрки могли есть, поскольку у некоторых были клювы, подходящие лишь для одной из крайностей, и поэтому, например, вьюрки с меньшими клювами не могли справиться с более крупными, жесткими семенами, когда был дефицит более мелких семян. После нескольких лет обильных осадков, когда семена

были в изобилии, птицы с более мелкими клювами имели преимущество перед своими более крупными собратьями и могли процветать, потребляя больше калорий и делая это быстрее.

Межпоколенческое изменение формы среди вьюрковых контрастирует с сохранением общего плана тела акулы, который почти не изменился за 420 миллионов лет. Мы часто сталкиваемся с тем, что геологическое время трудно оценить, поэтому, чтобы добавить этой временной шкале контекста, упомянем, что млекопитающие начали появляться лишь около 250 миллионов лет назад, отделение человекообразных обезьян от остальных обезьян произошло примерно 220 миллионов лет спустя, и общий предок шимпанзе и людей существовал еще 6 или 7 млн лет назад. То есть менее чем за 2% общего времени существования акул форма человека эволюционировала от чего-то, напоминающего шимпанзе, к нашей нынешней анатомии. Секрет успеха акул в такой невероятной последовательности с течением времени заключается не в какой-то регулярной рутине ухода за собой, а в основном в постоянстве их экологии.

Эволюционная история стопы человека подобна обзору прогрессивных стадий развития автомобиля. Ибо в обоих случаях каждое улучшение по сравнению с грубой исходной моделью имело функциональное значение, которое становится более впечатляющим и лучше понимаемым по мере того, как мы знакомимся с породившими его условиями.

Мортон, «Человеческая стопа», 1935

Экология, с которой сталкивается вид, оказывает огромное влияние на его форму. Изменения климата, доступ к пище и конкуренция с другими видами являются лишь одними из многих факторов, оказывающих влияние на ту нишу, в которой существуют виды (см. рис. 2.2). Появление крупного хищника

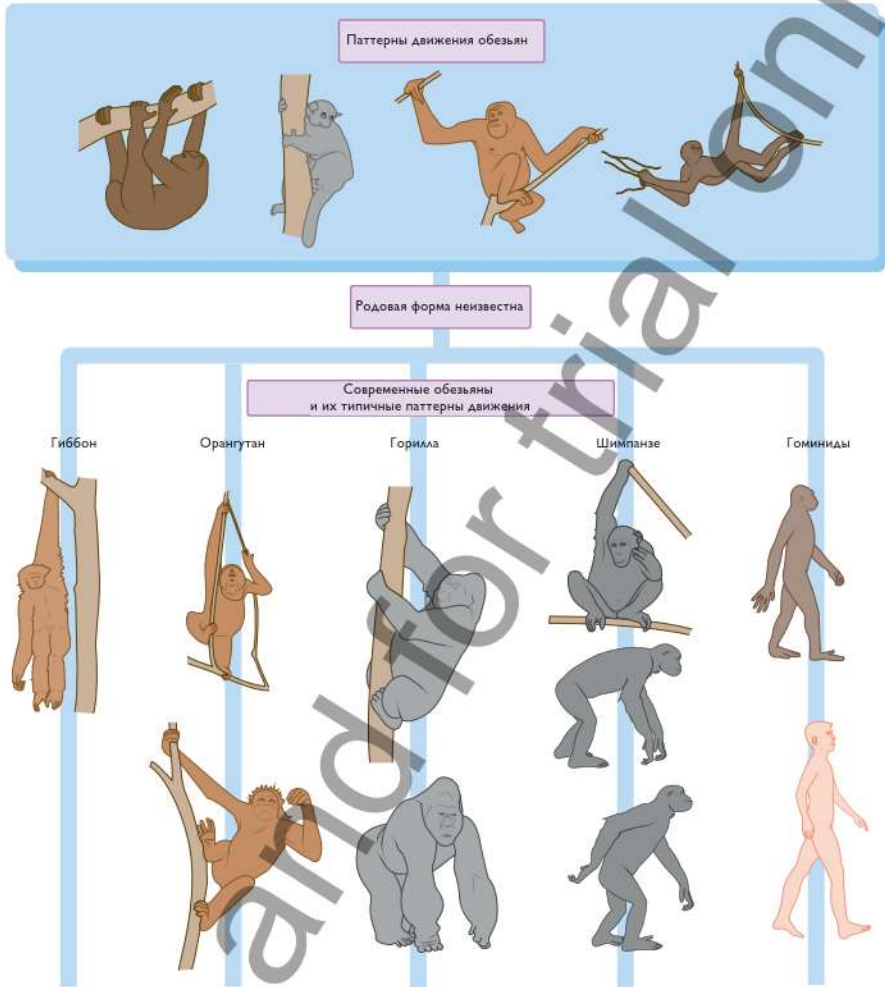


Рисунок 2.2. Обезьяны демонстрируют ряд стратегий перемещения по деревьям (верхняя часть иллюстрации) — ходьба по ветке или под ней, лазание, прыжки, раскачивание или вис на руках. Благодаря сложному взаимодействию между двигательным стилем, анатомией и экосистемой каждая из обезьян (гиббон, орангутан, горилла, шимпанзе и человек) развила свою собственную специфику движений. Хотя у каждой из них есть целый ряд вариантов перемещений и положений, гиббоны специализируются на раскачивании на руках, орангутаны также используют свои верхние конечности, чтобы держаться за верхние ветви, когда они идут по более прочным нижним ветвям. Поскольку шимпанзе и гориллы проводят меньше времени на деревьях, в качестве основной формы наземного передвижения они развили ходьбу на костяшках пальцев. Только люди постоянно ходят в вертикальном положении. Хотя все остальные обезьяны также могут стоять и ходить на двух ногах, от них это требует определенных усилий, вызванных согнутыми бедрами и коленями. Анатомия каждого вида специализировалась на том, чтобы облегчить их модели перемещения, и эти модели передвижения можно интерпретировать по форме, расположению и размеру их костей.

может загнать тот или иной вид на деревья, размер ветвей повлияет на те виды, которые передвигаются с ветки на ветку; более легкие виды, как правило, живут выше в кронах деревьев, более тяжелые — ближе к их основанию, где ветви толще. Масса тела определяет количество пищи, необходимое для выживания, что может

влиять на размер помета и скорость размножения, что также оказывает влияние на скорость эволюции вида.

Хотя существует множество движущих факторов эволюции, о чем свидетельствуют постоянство черт акулы и быстрота изменений выюрков, наиболее распространенным из них, вероятно,

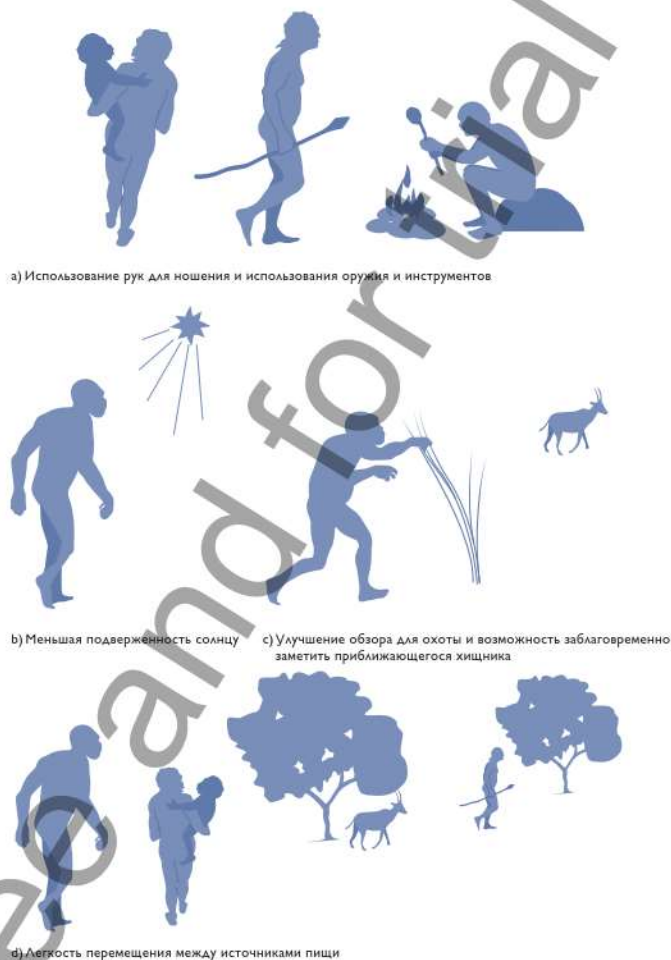


Рисунок 2.3. Многие преимущества ходьбы на двух ногах предлагались в качестве движущей силы эволюции. Однако маловероятно, что это можно объяснить каким-то одним фактором; скорее, речь идет о совокупности вкладов каждого из них, которая и подпитывала круговой процесс к нарастающему вертикальному положению. (Адаптировано из Fleagle, 2013.)

являются колебания климата. Хотя мы и не знаем этого наверняка, вполне вероятно, что именно изменение климата поставило нас на путь прямохождения. Стандартная история из учебника гласит, что генеалогическое древо человека возникло где-то в эпоху среднего и позднего миоцена (16–5,3 млн лет назад) — периода времени, характеризовавшегося значительными климатическими изменениями, которые сократили древесный покров в районах, населенных обезьяноподобными приматами.

Уменьшение древесного покрова и увеличение пастбищ поставило живущие на деревьях виды в трудное положение. Деревья обеспечивают пищу, защиту от непогоды и безопасность от хищников, и предполагается, что развитие вертикального положения помогло смягчить потерю древесного покрова. Вертикальное положение освободило руки от двигательных функций и позволило нашим предкам переносить инструменты и оружие и манипулировать ими; в вертикальном положении под полуденным солнцем оказывается лишь макушка головы, что помогло снизить метаболические затраты на терморегуляцию (создавая возможность полуденной охоты, когда другие животные отдыхают); более высокое положение глаз также обеспечивало лучший обзор для охоты и раннего обнаружения других хищников; и, конечно, ходьба на двух ногах менее затратна с точки зрения метаболизма, что увеличивает ежедневный диапазон перемещений (рис. 2.3). Кроме того, расширение диапазона перемещений, возможно, помогло нам быть менее восприимчивыми к локальным изменениям: если нам не нравились местные условия, мы могли просто подняться и пойти дальше.

Переход к жизни на земле, вероятно, не был мгновенным или абсолютным. Деревья по-прежнему обладали теми же преимуществами, что и раньше, изменилась лишь их близость расположения и изобилие. Наша линия гоминидов (см. рис. 2.2 и 2.11) демонстрирует целый диапазон видов между моментом отделения наших общих предков от других человекообразных обезьян и нашей нынешней, современной анатомией. Наиболее вероятный сценарий, который подтверждают найденные ископаемые, заключается в том, что наша анатомия постепенно

адаптировалась к жизни на земле, поскольку мы стали меньше полагаться на деревья и все больше стояли на собственных ногах.

■ ФОРМА И ФУНКЦИЯ

Хотя мы можем использовать и другие критерии для определения видов, с точки зрения наших функциональных целей нас прежде всего интересует изменение формы, происходившее параллельно с адаптацией к новым условиям. Форму можно определить как сочетание двух характеристик — размера и очертания. Как мы видели выше, размер играет важную роль в определении того, в какую экосистему получится вписаться: тонкие верхние ветки не выдержат более тяжелого веса, а клюв меньшего размера ограничивает выбор семян, которые можно съесть. Другим аспектом формы является очертание, которое играет существенную роль в определении наших функциональных способностей в той нише окружающей среды, в которой мы находимся.

Очертание играет важную роль в биологии, и именно изменения очертаний дают нам информацию о паттернах и способностях к движению, однако очертания сложнее определить так, чтобы это позволило нам измерять различия между видами. Очертание может варьироваться внутри вида в зависимости от окружающей среды, возраста или стадии развития, и для определения вида можно использовать вариации формы. Проблема сравнения вариаций была частично решена с помощью математического анализа очертаний с использованием процесса, впервые разработанного шотландским эрудитом Д'Арси Вентвортом Томпсоном (1860–1948).

В своем классическом труде «О росте и форме» Томпсон предположил, что сравнения очертаний можно анализировать, если нанести на декартову сетку сопоставимые фиксированные ориентиры — это поможет количественно определять различные деформации (рис. 2.4). К счастью, вычислительная мощность значительно улучшилась с тех пор, как Томпсон впервые разработал свои идеи в начале двадцатого века. Мощный компьютерный анализ теперь способен обрабатывать

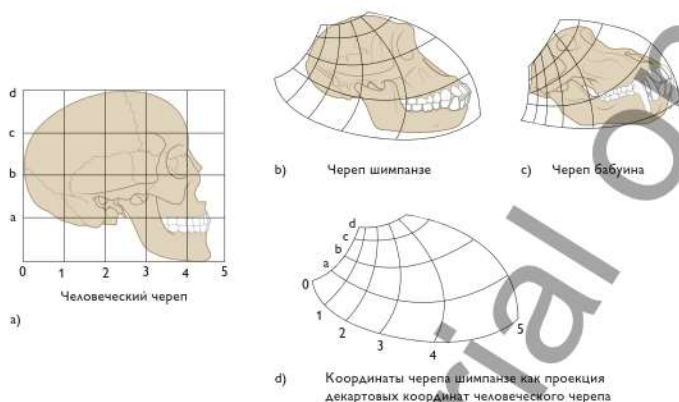


Рисунок 2.4. Если мы уберем переменные размера и направления, то единственная переменная, которая останется, — «очертание». Для возможности сравнить и сопоставить очертания между образцами на декартовой сетке отмечаются базовые ориентиры: в данном случае используется череп взрослого человека (а), который затем сравнивается с положениями ориентиров у других видов — шимпанзе (b) и бабуина (c). Полученные рисунки, такие как (d), обеспечивают визуальное и математическое сравнение, иллюстрируя, например, меньшие размеры мозговых оболочек и увеличенную челюсть шимпанзе. (Адаптировано из Томпсона, 1968 г.)

большие объемы трехмерных данных и обеспечивать углубленный статистический анализ вариаций очертаний. Такой математический тип измерения «формы и функций», известный как геометрическая морфометрия, позволяет исследователям лучше идентифицировать кости неизвестных видов и дает новое представление о видах и функциональных вариациях.

Хотя на рис. 2.5 показана лопатка, а не стопа, она дает четкий пример того, как одна кость различается в зависимости от вида и стиля локомоции. Анализ лопатки был проведен по методике, аналогичной той, которую предложил Томпсон, и математическое сравнение показало, что большая часть вариаций между видами происходила по двум направлениям изменения очертаний, показанным на рис. 2.5. Направления изменений нанесены вдоль каждой оси графика и известны как «основные компоненты». Ось x'' оценивает изменение

угла ости лопатки; обратите внимание, как суставная ямка направлена вверх на лопатке, расположенной наверху слева, и в большей степени сбоку — на лопатке в правом верхнем углу. Различия в границах надостной ямки нанесены по оси y'' ; у лопатки внизу справа очень мало места для надостной мышцы, при этом ямка становится все более и более развитой (указывает на большую мышечную массу) по мере того, как мы перемещаемся по направлению к верхней лопатке.

Анализ формы лопатки знакомит нас со многими преимуществами использования математического подхода. На диаграмме количество образцов каждого вида представлено цветными точками. Разброс для каждого вида указывает на степень вариации формы как внутри, так и между видами. Мы можем видеть некоторое совпадение очертаний между видами, особенно между шимпанзе и гориллами, но мы также видим, что усредненные очертания (показаны более темным цветом) сильно отличаются друг от друга.

* Анализ основных компонентов сложен и обременен бестолковой терминологией — можно рассматривать основной компонент просто как направление, в котором происходят изменения.

** Зная, что меня тоже трудности с заполнением школьной математики: ось x — горизонтальная ось.

*** И ось y — вертикальная ось.

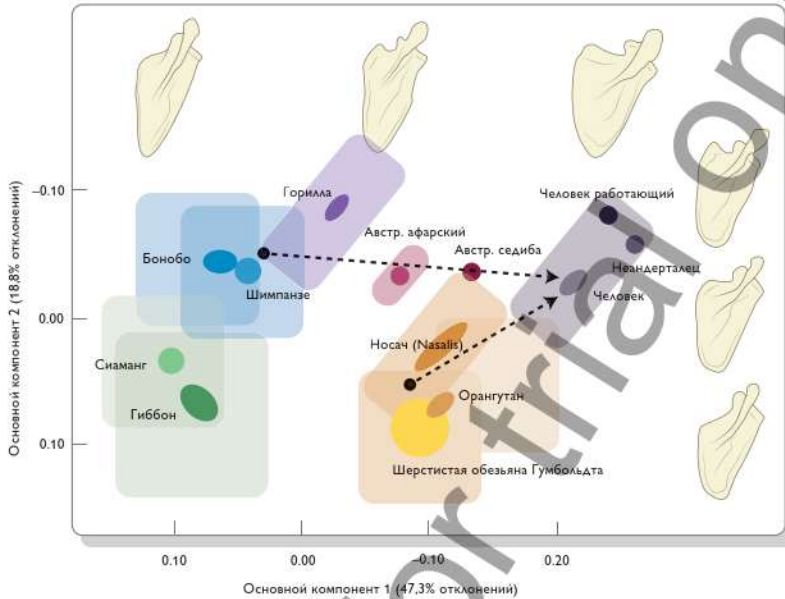


Рисунок 2.5. Чтобы обеспечить математическое сравнение, на лопатке каждого вида были отмечены ориентиры, которые затем подверглись геометрическому морфометрическому анализу. Результаты показали, что большая часть вариаций очертаний происходила вдоль двух осей изменений — угла ости лопатки (основной компонент 1, объясняющий 47,3% отклонений) и границ надостной ямки (основной компонент 2, 18,8% отклонений). График показывает сильную тенденцию группировки видов в соответствии с видами и паттернами движения. Более древесные виды располагаются ближе к нижнему левому углу графика, а наземные виды — к верхнему правому. Цветные точки обозначают отдельные образцы; темные эллипсы обозначают 90%-й доверительный интервал для среднего; светлые эллипсы — 90%-й доверительный интервал выборки. (Адаптировано из Young и др., 2015.)

Эти данные полезны для идентификации костей неизвестных видов.

Одним из многочисленных преимуществ геометрической морфометрии является то, что она устраняет из измерений фактор предвзятости. Данные об ориентирах неопознанной кости можно подвергнуть анализу, обозначив ее положение на аналогичном графике. Близость к очертаниям других видов может затем помочь идентифицировать вид, к которому принадлежит данная кость, и, на основе дополнительных изменений очертаний с течением времени, в некоторых случаях анализ очертаний может помочь определить эволюционные взаимоотношения с другими видами.

Как мы упоминали в начале этой главы, мы часто рассматриваем эволюцию как движение в сторону улучшения, апогеем которого являемся мы. Однако сравнение с нашими предками показывает, что мы не лучше и не хуже — мы просто другие. В правой верхней части графика на рис. 2.5 представлены данные по двум вымершим видам, *Homo neanderthalensis* и *Homo ergaster*. Изменения очертаний происходят в направлении верхнего правого квадранта, но *Homo sapiens* оказывается внутри крайней фигуры, — означает ли это, что у нас менее развиты лопатки? Нет, у нас просто другие потребности в другой экологии.

Профессор Даниэль Либерман утверждает, что одной из многих проблем, возникающих

при обсуждении эволюции стопы, является сосредоточение внимания на ходьбе, но стопа должна выполнять гораздо больше задач, которые не ограничиваются только лишь походкой. Стопа также должна обеспечивать нам способность поворачиваться, приседать, ползти, толкать, тянуть, прыгать, приземляться и, что важно для Либермана, бегать. Большая часть дискуссий на тему эволюции связана с почти бинарным сравнением лазающих по деревьям и двуногих существ, но влияние реального мира, окружающей среды и потребности в функции редко поддается четкой классификации.

В настоящее время существует тенденция рассматривать человеческую стопу как воплощение эволюции, но это не так. Человеческая стопа прекрасно приспособлена ко многим предъявляемым к ней требованиям, но она не идеальна для лазания, не приспособлена для борьбы и не идеальна для бега на длинные дистанции. Она может делать многие из этих вещей. Как сказал Леонардо да Винчи, человеческая стопа — это «шедевр инженерной мысли и произведение искусства», но мы не должны поддаваться искушению воспевать человеческую исключительность. Мы эволюционировали не больше и не меньше, чем другие наши соседи-животные, мы все пришли сюда через процесс изменений, и мы все еще продолжаем меняться.

■ ЭВОЛЮЦИЯ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ

Будем честными, мы не единственные существа, которые ходят на двух ногах. Это делают птицы, кенгуру, даже голодные шимпанзе. Хотя у нас есть множество важных отличий.

В литературе говорится, что мы единственные «облигатные стопоходящие двуногие», но что это означает?

Ну, во-первых, облигатное прямохождение означает, что хождение на двух ногах является нашим основным способом передвижения. Мы можем ходить и бегать на всех четырех конечностях, но предпочитаем этого не делать, в основном по причинам,

изложенным в предыдущей главе: это метаболически затратная и тяжелая работа, которую можно использовать как один из вариантов тренировок, если это необходимо. Другие четвероногие приматы иногда используют ходьбу на двух ногах (в этом случае ее называют «факкультативным прямохождением»), но она не является их основным выбором, и они в этом не эффективны.

Птицы скачут на двух ногах, но они не являются стопоходящими, их пятки (в нашем случае это пяточная кость) не касаются земли, и их стиль передвижения — это в большей степени подпрыгивание, чем перекат, о котором говорилось в главе 1. Кенгуру и другие представители семейства кенгуровых (животные с большими стопами) ходят на подошвах стоп и используют при ходьбе пятку, но при этом пятке также помогают их большие мускулистые хвосты, которые часто используются как своего рода пятая конечность.

Существует множество споров об истоках и движущей силе эволюции двуногости человека, и здесь следует предупредить любого, кто хочет углубиться в хитросплетения посвященной эволюции литературе. Есть множество работ, в которых дается четкий и подробный анализ окаменелости, с уверенностью определяется ее положение и предоставляется функциональная интерпретация. Тем не менее в конкурирующих журналах можно найти одну-две статьи, написанных с одинаковой скрупулезностью и вселяющих одинаковую уверенность, но с противоположных точек зрения. Как это часто бывает, ситуацию еще более запутывают упрощенные презентации в прессе и соцсетях. В основе всех этих отчетов лежит наше огромное желание найти самых древних двуногих, но при этом они не сообщают нам о всей хрупкости приводимого ими анализа.

Палеоантропология — молодая наука с очень небольшим размером выборки окаменелостей (рис. 2.6). Большинство ископаемых находок не содержит мелкие кости стопы, а интерпретация тех из них, которые были найдены, ограничена размером выборки, при этом их реконструкция связана с рядом трудностей (как мы увидим ниже) и иногда основана на непроверенных предположениях (DeSilva и др.,

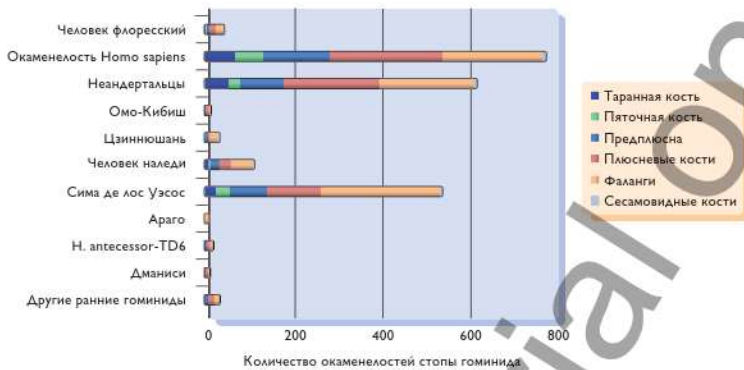


Рисунок 2.6 Если говорить об абсолютных цифрах, то крайне мало окаменелостей стоп, которые можно было бы отнести к различным видам Homo. (Адаптировано из Pablos, 2015 г.)

2018). К сожалению, дебаты о развитии прямохождения иногда воспринимаются как свидетельство недостаточного доверия к теории эволюции, но это наивное понимание научного процесса. Любая молодая наука требует времени для накопления доказательств, аналитических инструментов и литературы, которую можно было бы подвергнуть серьезному обсуждению.

Часто говорят, что теория эволюции — это всего лишь «теория», но самый важный аспект теории заключается в том, что ее можно проверить. Можно делать прогнозы на основе теории, а затем анализировать результаты любого эксперимента, чтобы подтвердить или опровергнуть ее. До сих пор не было выявлено никаких существенных доказательств, опровергающих эту «теорию». Конечно, по мере совершенствования методов или совершения новых открытий, мы постепенно улучшаем теорию, однако основополагающая динамика изменений с течением времени не улучшилась с тех пор, как Дарвин и Уоллес впервые ее предложили.

Профессор Нил Шубин применил прогностическую способность теории эволюции для открытия *Tiktaalik roseae* (см. рис. 2.7), переходного вида от рыб к амфибиям. Описывая процесс поиска в своей книге «Ваша внутренняя рыба», Шубин рассказывает, как он понял,

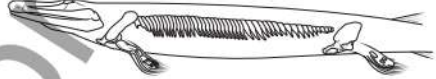


Рисунок 2.7 *Tiktaalik roseae*, проживавший 375 млн лет назад, была одной из первых амфибий и демонстрирует многочисленные адаптации к жизни на суше, а не в море. К ним относятся плоская голова, шейный отдел позвоночника и более развитый плавниковый аппарат, который мог поддерживать его тело на суше. (Из Шубина и др., 2014)

что лишь немногие окаменелости демонстрируют переходные черты между рыбой и амфибией. Он подсчитал, что черты амфибий должны были появиться в животном мире около 375 млн лет назад, и поэтому начал проверять геологические записи. Он искал участки каменных отложений правильного возраста, пережившие соответствующие климатические условия, которые могли бы поспособствовать эволюционному переходу от воды к суше. Было определено несколько таких возможных местонахождений, и после нескольких посещений острова Элсмир в Канаде была обнаружена *Tiktaalik roseae*.

Окаменелость, широко известная как тиктаалик, имеет черты рыбы (чешуя и жабры), однако при этом она также обладает уплощенной головой, имеет шейные позвонки и развитые кости плавников, которые могли использоваться

для поддержки тела в условиях действия силы тяжести, т. е. это был один из первых видов, вышедших из воды. Чтобы приспособиться к действию силы тяжести (вместо сопротивления воды), потребовалось такое изменение анатомии, при котором возможно было бы держать голову и продвигать тело вперед за счет отталкивания от земли, а не от воды. Но вклад тикталика намного больше, чем просто обеспечение поддержки своего тела, — открытие тикталика также подтверждает применение научного метода к эволюции в простом трехэтапном процессе.

1. **Постановка вопроса.** Анализ «летописи» окаменелостей выявил пробел — так называемое «недостающее звено» или переходные виды. Можно ли найти переходную окаменелость?
2. **Формирование гипотезы.** Датировка разрыва привела к гипотезе о том, что в геологии той эпохи будут обнаружены ископаемые виды с переходными чертами.
3. **Проверка гипотезы.** Теория была проверена поиском на соответствующих сайтах и в данном случае оказалась верной.

■ ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМЫ

Одной из многих ступенек, которые помогли Дарвину приблизиться к его теории эволюции, была организация природного мира в семейства, роды и виды. Разрабатывая свою систему классификации, шведский зоолог Карл Линней (1707–1778) использовал физические признаки для разделения животных и растений на группы. Линней совершенствовал свою систему на протяжении всей своей жизни, по мере того как он приобретал новый опыт и получал больше доступа к информации; этот процесс продолжается и по сей день, пока мы пытаемся найти лучшие, более последовательные способы классификации видов.

Использование общих анатомических признаков для определения вида было заменено в учебниках концепцией биологических видов, введенной Эрнестом Майром в 1940-х годах. Майр предложил определять

вид по его неспособности воспроизводиться вне своей группы. Однако идея репродуктивно изолированных видов сталкивается со многими проблемами, включая бесполое размножение и гибридизацию, и не дает определенности при работе с вымершими видами.

Благодаря существованию лигров и зонки*, а также многих других явно смешанных видовых гибридов, принять возможность размножения между родственными видами было легче. Принятие репродуктивной мобильности между видами дополнило и без того сложную картину происхождения человека. Если когда-то еще существовала надежда на то, что от *Homo sapiens* и других обезьян можно протянуть прямую линию родства к общему предку, то сейчас это больше напоминает сеть с многочисленными линиями, которые то ответвляются, то возвращаются обратно по мере того, как они снова взаимодействуют с мигрирующими видами (см. рис. 2.13).

Несмотря на обилие внимания со стороны средств массовой информации и на количество научных статей, которые они публикуют, находки окаменелостей гоминидов редки. Это затрудняет функциональную интерпретацию и идентификацию видов и часто вызывает горячие споры (отсюда и количество написанных статей). Вместо того чтобы следовать общепринятой (и довольно утомительной) практике перечисления и анализа каждой находки по очереди, на протяжении всего текста мы делаем соответствующие противопоставления, помогающие выделить важные функциональные различия (если это необходимо, особо увлеченный исследователь может также изучить дополнительные тексты, перечисленные в библиографии и по ссылкам). Для наших целей нет необходимости в подробном обсуждении механики ископаемой стопы, однако все же полезно иметь некоторое понимание механизмов анатомических изменений, поскольку в эволюционной динамике существует много недопонимания.

Как упоминалось выше, по-прежнему существует общее представление о гибридных

* Лигр — это помесь самца льва и самки тигра, а зонки — это помесь зебры и любой другой лошади.

формах, оказавшихся в эволюционных ответвлениях между видами. Также по-прежнему популярна идея о том, что мы развились от шимпанзе или от кого-то, по своей анатомической форме очень похожего на нынешнего шимпанзе. Правда, на которую указывают генетические и ископаемые свидетельства, заключается в том, что у нас был общий предок, но и шимпанзе (включая их двоюродных братьев-бонобо), и люди изменились с тех пор,

как мы в последний раз делили трапезу более 6 млн лет назад.

Наша анатомия указывает на общее происхождение не только с другими обезьянами, но и с остальным миром позвоночных. Все позвоночные имеют схожее строение, которое у каждого вида менялось в контексте его собственной эволюционной истории. Это схожее строение, проявляющееся в скелетном расположении рук и ног (см.

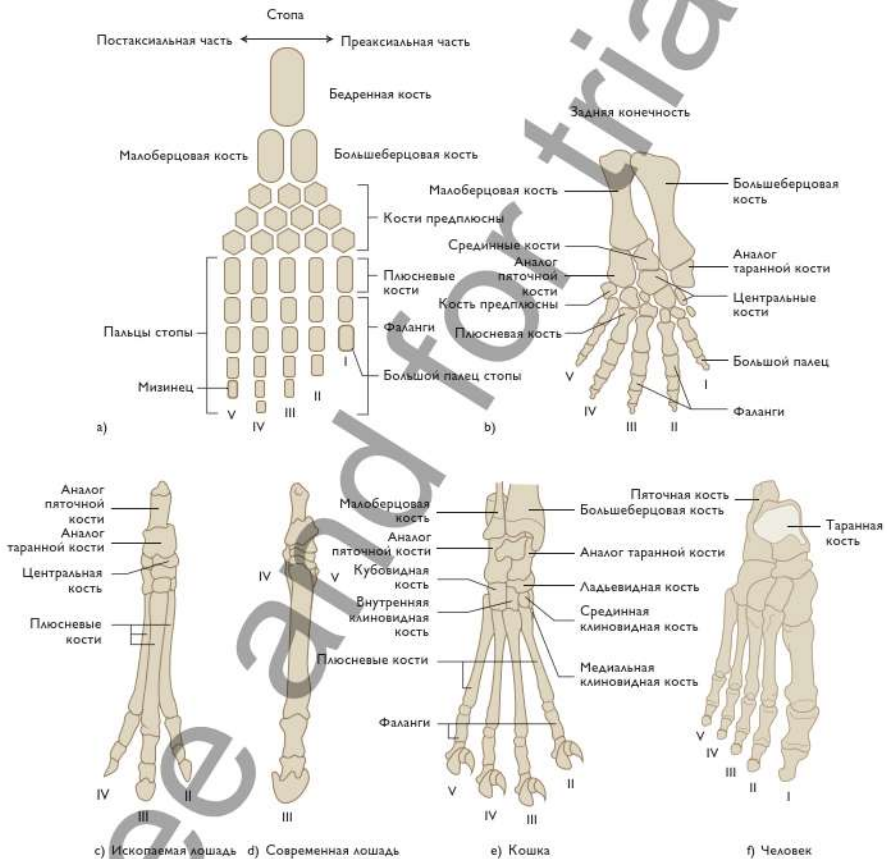


Рисунок 2.8 Базовая форма стопы (а и б) легко угадывается в расположении костей у других видов (с-ф). Произшедшую специализацию можно увидеть, например, по редуцированию плюсневых костей IV и II у современных лошадей по сравнению с ископаемыми (с и d), по длинным отдельным плюсневым костям у хищной кошки (е) и по форме стопы современного человека, исследуемой в данном тексте (f).

рис. 2.8), было впервые обнаружено отцами сравнительной анатомии Виллемом де-Азиром (1748–1794) и сэром Ричардом Оуэном (1804–1892, основатель Лондонского музея естественной истории).

В своем недавнем тексте «Требуется сборка» (2020) Нил Шубин (исследователь, открывший тиктаалик) дает превосходный обзор современного понимания эволюционных изменений. Шубин объясняет, что вскоре после публикации книги Дарвина «Происхождение видов» (1859) многие люди возражали против идеи Дарвина о постепенном изменении с течением времени, поскольку они не могли понять, как животное может выжить с половиной крыла или частью клюва. По словам Шубина, Дарвин добавил пять важных слов к шестому изданию «Происхождения видов» (1876), когда отвечал критикам своей идеи, и предположил, что «естественный отбор не способен объяснить зарождающиеся стадии полезной структуры. Эта тема тесно связана с градацией характеристик, часто сопровождаемой изменением функции».

Дарвин правильно заметил, что у организмов редко развиваются новые структуры, скорее они «перепрофилируют» старые: так, плавательные пузыри рыб превратились в легкие амфибий, а жаберные дуги рыб в конечном итоге образовали человеческую челюсть, среднее ухо, горло и гортань. Такого рода анатомическое перепрофилирование может произойти потому, что каждый вид эволюционировал по этому первоначальному образцу позвоночных. Мы по-прежнему наблюдаем общее строение у эмбрионов разных видов (см. рис. 2.9), но его изменение у разных видов происходит благодаря генетическим механизмам, которые были обнаружены только во второй половине двадцатого века.

Только после смерти Дарвина были обнаружены скрытые силы, ответственные за анатомические изменения. Открытие и быстрое применение генетической теории к наследственности укрепило и расширило наше понимание эволюции. Хотя, как и в случае с палеоантропологией, анализ ДНК по-прежнему является молодой наукой, он дал много важных открытий. Одним особенно важным

элементом анализа формы было открытие генов гомеобокса.

В то время как общий геном обеспечивает так называемый «рецепт», по которому строится тело, гены предоставляют код для ингредиентов и сообщают клеткам, какие белки следует производить. Гены гомеобокса определяют тайминг производства белка, они отвечают за общую структуру тела, например, за расположение конечностей. Один тип генов гомеобокса, ген *Нох*, управляет развитием структур тела на их правильном месте. Когда мы смотрим на базовое расположение костей конечностей, мы видим, что оно почти не меняется от вида к виду. В зависимости от типа вида различаются их относительная форма и размер, но при этом общий рисунок остается прежним (рис. 2.8).

Конечность последовательно развивается в трех зонах — верхней (надплечье/бедро), средней части (предплечье/голень) и дистальной (кисть/стопа), при этом контроль за каждой секцией осуществляют соответствующие гены *Нох*. Скрученная структура нитей ДНК делает их восприимчивыми к дальнейшему скручиванию, вызывая изменения в расположении генетических «переключателей» для экспрессии белка. Перемещение положения белковых «переключателей» изменяет тайминг их сигналов, что, в свою очередь, оказывает влияние на размещение, форму и размер кости. Например, *Sonic hedgehog*, хорошо известный пример гена *Нох*, отвечает за количество пальцев и участвует в случаях полидактилии*. Когда исследователи изучали ген *Sonic hedgehog*, мутация была обнаружена не в самом гене, а скорее в генетическом «переключателе», определяющем, когда должен активироваться ген *Sonic hedgehog* и насколько долго он будет активен.

Хотя ген *Sonic hedgehog* задействован в развитии многих органов, включая сердце и спинной мозг, любая мутация в части, контролирующей конечности, влияет только на конечности. Уподобляя такое строение устройству системы центрального отопления, Шубин предлагает рассматривать ген *Sonic hedgehog* как печь,

* Порок развития, при котором на руках или на ногах больше пальцев, чем предполагается.

которая может влиять на отопление во всем доме. Выключение всего гена, как это произошло со змеями, полностью останавливает развитие конечностей. В большинстве случаев ген остается активным, но настройки регулируются генетическими «переключателями», расположенными дальше по последовательности ДНК, и эти «переключатели» изменяют выработку определенного белка, действуя как термостаты в каждой комнате.

Использование включения/выключения и точно настроенных генетических «переключателей» для воздействия на рост каждой кости имеет ряд преимуществ. Такое устройство позволяет наследовать общее строение тела (что видно по эмбриональной общности, рис. 2.9), которое затем уже получает специфические

для каждого конкретного вида адаптации посредством точного контроля белковых «переключателей». И, что важно, любые мутации, скорее всего, будут ограничены одной областью (как в случае с полидактилией).

Хотя Дарвин и не знал о гене Нох, именно устройство этого гена является тем механизмом, который позволяет модифицировать существующие структуры и частично объясняет, почему мы можем иметь значительную долю генетического материала, принадлежащего обезьянам (96 % с шимпанзе), кошкам (90 %) и даже бананам (60 %), но имеем совершенно разные формы. Формы определяются не только генетическим кодом, но и временем включения и выключения кодов, регулирующих производство белка.

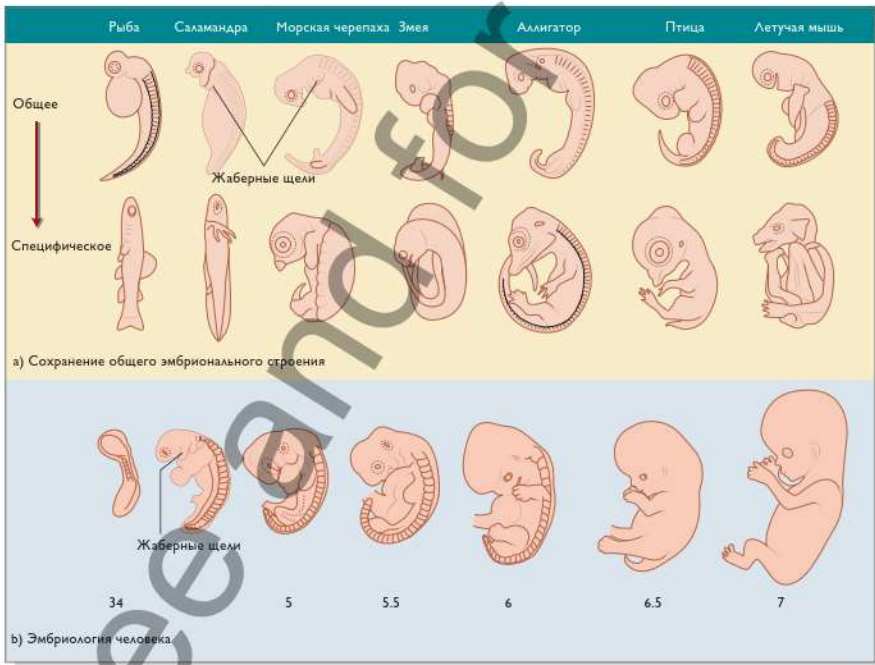


Рисунок 2.9. Эмбрионы многих видов имеют общее строение на ранних стадиях развития, до того, как начинается специализация. Это особенно ясно видно по трем жаберным щелям, которые во время внутриутробного развития перепрофилируются в соответствии со очертаниями взрослого представителя, в случае человеческой формы превращаясь в челюсть, среднее ухо, горло и гортань.

■ НАХОДКИ ИСКОПАЕМЫХ И ТО, О ЧЕМ ОНИ СВИДЕТЕЛЬСТВУЮТ

Первые шаги, предпринятые тиктааликом (или другим подобным земноводным), впервые подвергли животный мир действию силы тяжести. Мортон считал силу тяжести основным фактором, оказавшим влияние на эволюционное моделирование нашей стопы, и сделал смелое предсказание того, как может выглядеть переходный вариант от древесной стопы к наземной (рис. 2.10а). В 1935 году Мортону было доступно очень мало окаменелостей, поэтому он размышлял об анатомии неизвестных ему переходных видов.

Мортон предположил, что такого рода «переходная» стопа должна быть организована по принципу мозаики, то есть наряду с хватательными чертами обладать и новыми чертами, необходимыми для двуногого передвижения. Хватательная, цепкая стопа обезьяны позволяла сделать предположение о том, как мог выглядеть такой переходный вариант по мере того, как менялось выравнивание, а большой палец все меньше использовался для хватания и все больше становился параллельным другим пальцам, способствуя длинному шагу по прямой. Через некоторое время после смерти Мортон оказалось, что он был прав: в пещере в Стеркфонтейне, Южная Африка, была обнаружена окаменелость. Таранная, ладьевидная, медиальная клиновидная и первая плюсневая кости ископаемого скелета, получившего название «Маленькая ножка», были впервые обнаружены в 1980 году, однако его фрагменты хранились в музейном ящике с неправильной маркировкой вплоть до 1994 года, когда они были правильно идентифицированы палеоантропологом Рональдом Кларком. Кларк признал окаменелости гоминидами и повторно посетил место первоначальной находки окаменелостей, где ему удалось извлечь весьма цельным скелет, по общему признанию, принадлежащий виду *Australopithecus africanus* (рис. 2.10б и 2.11).

Хотя «Маленькую ножку» и другие подобные экземпляры нередко относят к гибридным «недостающим звеньям», в действительности таковых не существует, равно как не существует



Рисунок 2.10. а) В 1935 году Мортон нарисовал «гипотетическую дочеловеческую стопу», которая сочетала в себе ряд признаков древности и двуногости. б) Реконструкция «Маленькой ножки», похоже, соответствует предсказанию Мортон. Окаменелость была отнесена к виду *Australopithecus africanus* и датируется периодом в 3,6 млн лет назад.

и «крокоуток», воображаемой химеры общего предка крокодила и утки. Однако существует

* Забавно ради попробуйте поискать в интернете «крокоуток». Дальнейшее исследование связанных с эволюцией аргументов можно найти в отличной книге Джерри Коина «Почему эволюция верна» (2014).

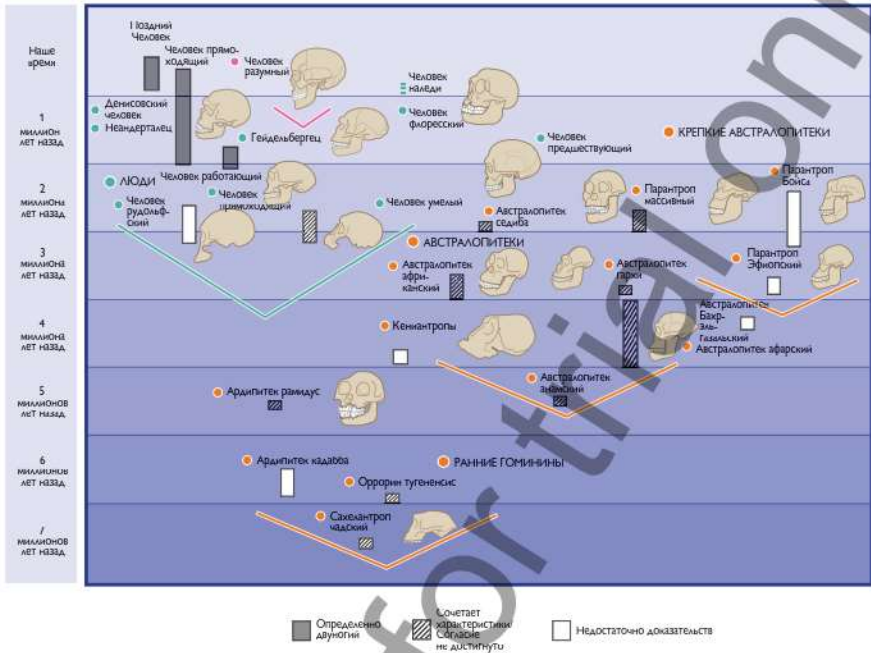


Рисунок 2.11. Виды с признаками, указывающими на облигатное прямохождение, появляются в «летописи» окаменелостей совсем недавно. Прямохождение как определяющая характеристика семейства *Ното* коррелирует с увеличением размера черепа и уменьшением размера челюсти.

множество окаменелостей, которые указывают на адаптивную способность к изменениям во времени. Окаменелость «Маленькая ножка» обладает как примитивными (унаследованными от предка), так и производными (новыми адаптациями) чертами. Она унаследовала противопоставленный большой палец, но при этом и большой палец, и пяточная кость значительно более мощные, нежели у его предшественников. Подобное сочетание черт по принципу мозаики указывает на то, что «Маленькая ножка» является одним из многих переходных ископаемых*.

* Каждый вид в некоторой степени является переходным видом, поскольку все виды наследуют черты своих предшественников, обладая при этом новыми характеристиками, которые отличают их от других.

Как уже упоминалось ранее, легко может сложиться впечатление, будто эволюция происходит линейным образом, однако это далеко не так. Было бы крайне заманчиво создать повествование, показывающее постепенный переход от стопы наших предков к современной стопе, но это невозможно по многим причинам. Основной причиной является скудость палеонтологических летописей (см. рис. 2.6).

Окаменелости формируются не настолько легко, поскольку, вопреки распространенному мнению, это не остатки костей, а минералы, заменившие ткань.

Для того чтобы минералы заменили костную ткань, необходимы соответствующие условия, а кости должны оставаться неповрежденными, свободными от поглотителей, эрозии и движения. Найти и идентифицировать окаменелости

тоже сложно, поскольку нужно знать, где именно искать и как распознать их среди различных других типов фрагментов — как в случае с «Маленькой ножкой».

Обнаружение ископаемых останков связано с еще одной чередой трудностей, поскольку их необходимо датировать, классифицировать, реконструировать и интерпретировать. К счастью, существует несколько надежных методов датирования, а у литературы есть возможность сосредоточиться на интересных дискуссиях, касающихся отнесения к тому или иному виду и интерпретации функций различных шишек, выпуклостей и борозд кости. Каждая характеристика кости может предоставить некоторую информацию о прикреплении мягких тканей и направлении воздействия напряжения (см. также главу 3), однако это неточная наука со многими непроверенными предположениями (DeSilva и др., 2018). Например, даже общепринятая идея об упомянутой в главе 1 прочной пяточной кости, развившейся для амортизации при касании пяткой, еще не подтверждена должным образом (Holowka и Lieberman, 2018).

Хотя временная шкала на рис. 2.11 постоянно обновляется в ответ на новую и более качественную информацию, мы можем видеть, что *Australopithecus africanus* (вид «Маленькая ножка») и *Australopithecus afarensis* помещены в разветвление «Y». Похоже, что после возможных ранних двуногих, *Sahelanthropus tchadensis*, *Ardipithecus kadabba* и *Ardipithecus ramidus*, происходит отделение от вида австралопитеков. Левая часть диаграммы отражает изменения на пути к семейству Номо, а правая часть переходит в *Paranthropus*, крепких австралопитеков, которые исчезли около 15–2 млн лет назад.

Находясь в центре «Y», австралопитеки представляют собой еще один поворотный момент в нашей эволюционной истории. Два основных вида, *afarensis* и *africanus*, различаются формой стопы и общими очертаниями тела. Будучи чуть более поздним из двух видов, *Australopithecus africanus* — вид, реконструи-

рованный Кларком и Тобиасом (1995), — часто выделяется как имеющий более прямую связь с семейством Номо, и Мортон, несомненно, поддержал бы это утверждение. Возможно, на Кларка и Тобиаса повлиял набросок Мортон или какое-то бессознательное предубеждение, но более поздние реконструкции показали, что у «Маленькой ножки» первая плюсневая кость была в большем приведении, и, вполне возможно, речь шла о более эффективном двуногом, нежели предполагалось изначально (DeSilva и др., 2018).

Субъективность и предвзятость могут вызвать путаницу в любой дисциплине, и палеоантропология также не застрахована от своих форм борьбы и соперничества. Можно устранить часть эмоций из дебатов, подвергнув данные математическому анализу, например, такому, как упомянутый выше геометрический морфометрический анализ. Именно это было сделано в отношении образцов пяточной кости и таранной кости (рис. 2.12), и оба анализа показали, что форма кости *Australopithecus afarensis* ближе к форме кости современного человека (DeSilva и др., 2018; Sorrentino и др., 2020).

Большинство окаменелостей, приписываемых *Australopithecus afarensis*, были найдены в Восточной Африке, преимущественно в одноименном регионе Афар. К этому виду принадлежит и Люси^{***}, которая, возможно, является наиболее известной из всех ископаемых находок. Найденные в 1974 году Дональдом Йохансоном и названные в честь песни «Битлз», 40% неповрежденных скелетных останков Люси дали много информации о потенциальных способах передвижения более ранних гоминидов^{****}.

^{**} Официально признана под номером SHW 573 (StW относится к Стерксфонтейну в Южной Африке, первоначальному месту находки окаменелостей).

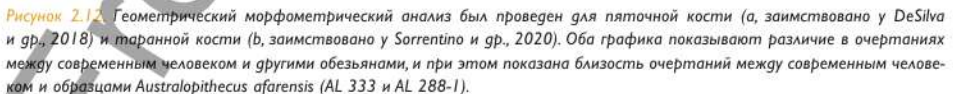
^{***} Люси был присвоен номер A.L. 288-1 (особенности — на графике на рис. 2.13б). Такой номер говорит о том, что Люси была найдена в регионе Афар в Эфиопии.

^{****} Если вдруг вы когда-нибудь захотите подбокутать людям на званых обедах, знайте: гомининами называют людей, шимпанзе и их общих предков; к гомининам (*homininae*) относятся горилла, к гоминидам (*hominid*) — orangutana, и только гоминидами (*hominidae*) включают всех человекообразных обезьян, включая в группу гиббонов. Однако, к сожалению, существуют и иные соглашения, поэтому спорить о них не стоит.

* *A. africanus* жил примерно между 3,7 и 2 млн лет назад, в то время как *A. afarensis*, по-видимому, исчез из палеонтологических летописей почти на 1 миллион лет раньше (3,9–2,9 млн лет назад).

■ МЫ ХОДИЛИ, А ЗАТЕМ МЫ СТАЛИ БЕГАТЬ

Либерман утверждал, что последние штрихи в современную анатомию намного



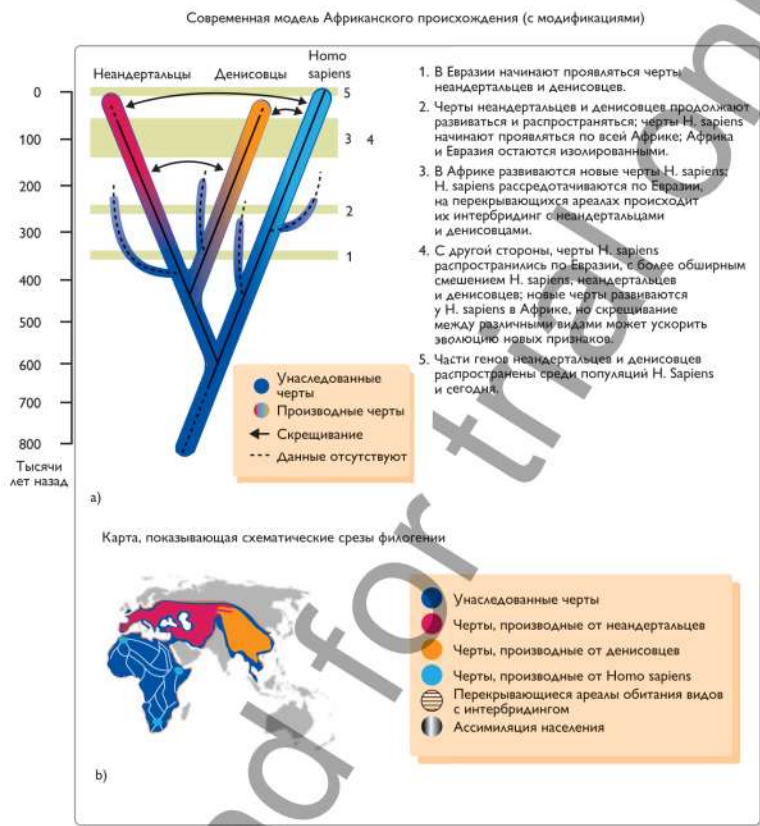


Рисунок 2.13. а) Негативные находки позволяют предположить, что предки людей покинули Африку как минимум двумя волнами. Более ранняя волна в Европу, на Ближний Восток и в некоторые части Азии привела к появлению двух групп, известных как неандертальцы и денисовцы (денисовский человек). Затем они скрещивались с анатомически современными людьми, которые развились в различных частях Африки около 300 000 лет назад. б) Предполагаемая схема распространения примерно 250 000 лет назад показывает три местонахождения современных людей в Африке, неандертальцев — по всей Европе, и денисовцев — в Азии. (Заимствовано у Galway-Witham и Stringer, 2018.)

в большей степени внес бег, нежели ходьба, о чем он подробно написал в своей влиятельной статье, опубликованной в 2004 году вместе с Деннисом Брамблом. Брамбл и Либерман утверждают, что многие изменения скелета свидетельствуют об адаптации к бегу на длинные дистанции и не являются необходимыми для эффективной ходьбы. Эти изменения включают в себя более длинную талию, более

развитый затылочный выступ и, что наиболее важно для нашей области интересов, некоторые существенные изменения в стопах: укорочение пальцев, удлинение пятки и увеличение высоты арки стопы.

Либерман в 2014-м и Холовка и соавт. в 2018-м году утверждали, что эти адаптации помогают во время бега и не нужны для экономической ходьбы. Считается, что эффективный

бег на длинные дистанции открыл новые возможности для охоты, которые обеспечивают дополнительное потребление калорий при минимальном расходе калорий. Работа Либермана была популяризирована благодаря книге Криса Макдугалла «Рожденные бежать» и оказала огромное влияние на бегунов на длинные дистанции и поклонников «босоногого» подхода к движению и здоровью. Популярность бега босиком совпала с ростом популярности «функциональной тренировки», которая строится на различных нагрузках, направлениях и задачах и часто выполняется босиком.

Многие сторонники «функционального движения» любят указывать на то, что их подход к упражнениям отражает

эволюционное наследие нашей анатомии. Хотя наш скелет эволюционировал — на рис. 2.14 показаны как различия, так и выявленные сходства при сравнении черт шимпанзе, австралопитека и современного человека, — и современные люди развили особенности, которые облегчают эффективный бег и ходьбу, эти особенности не мешают нам карабкаться по деревьям или раскачиваться на них. Наши варианты мобильности отражены в нашей анатомии; происходящие эволюционные изменения не являются абсолютными, и поэтому, как указывает Либерман, скелетные адаптации может быть трудно отнести к таким бинарным категориям, как «наземные» или «древесные». Как показано на рис. 2.5 на примере

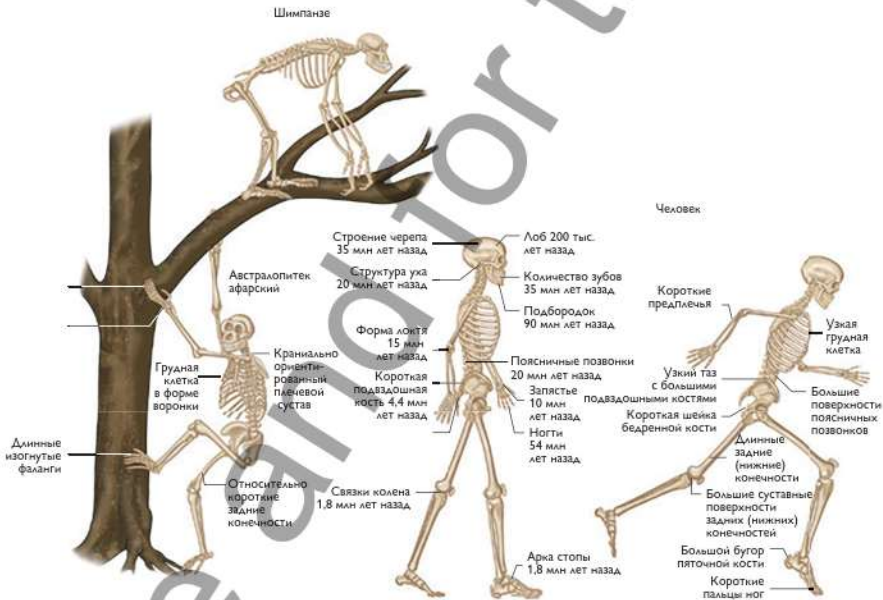


Рисунок 2.14. Хотя наш последний совместный предок неизвестен, считается, что его телосложение очень похоже на строение тела шимпанзе. Австралопитек афарский (*Australopithecus afarensis*) — один из ряда видов гомининов, которые, по-видимому, являются переходными между последним совместным предком и современными людьми. Скелетные изменения происходили на разных этапах, что позволяло более эффективно ходить и, в конечном итоге, эффективно бегать. По оценкам, основные изменения в сторону современного человека произошли примерно 2 млн лет назад, с появлением Человека работающего (*Homo ergaster*) и Человека прямоходящего (*Homo erectus*), что совпало с последними адаптациями, которые сделали возможным бег на длинные дистанции. Считается, что анатомически современные люди эволюционировали примерно 2–300 000 лет назад. (Заимствовано у Fleagle, 2013.)

лопаток, правда зависит от шкалы переменных. Мы адаптировали нашу анатомию к наземному передвижению, сохранив при этом некоторые анатомические элементы нашего древнего прошлого.

Окаменелости *Homo erectus* указывают то, что у данного вида была длинная талия, более крупные полукружные каналы в ушах для лучшего баланса и координации и ярко выраженная вейная связка для стабилизации головы — все это является неотъемлемой частью привычного и эффективного перемещения на двух ногах по земле длинными шагами. Движение должно было быть эффективным, поскольку эволюционирующие виды предъявляли более высокие требования к метаболизму. Размер тела и размер мозга увеличились, а продолжительность беременности и время до зрелости у их детенышей увеличились (Aiello and Wells, 2002). При таких вводных выбор делался в пользу любой анатомической адаптации, которая могла бы сэкономить несколько калорий, чтобы хоть как-то компенсировать все эти потребности, и, конечно, эти изменения не происходили в какой-то четкой последовательности. Это был не первый случай развития эффективного движения для облегчения возросших метаболических потребностей, и, очевидно, что не конкретно данные метаболические потребности создали потребность в адаптации движения, — вероятно, все это развивалось постепенно, поколение за поколением.

Прежде чем *Homo erectus* смог совершать длинные шаги на прямых ногах, его форма должна была претерпеть целый ряд изменений, которые в том числе включали в себя изменения в стопах. Длинному шагу способствует увеличение разгибания пальцев стопы для фазы схождения с пальцев и повышенная прочность и округлость пяточной кости для касания пяткой (Holowka и Lieberman, 2018; Webber и Raichlen, 2016). Разгибание, достигаемое при сходе с пальцев, позволяет свободной ноге перенестись вперед и выпрямиться, чтобы приземлиться на пятку. Посмотрите еще раз на рис. 1.6, чтобы сравнить углы в суставах для каждого изображенного вида. Все более ранние виды обладали более коротким шагом, и лишь у австралопитеков (4,5–1,9 млн

лет назад) была обнаружена некоторая степень разгибания пальцев ног; что же касается анатомически современного человека, он демонстрирует увеличенное разгибание суставов по всей системе — от пальцев ног до колена, бедра и позвоночника.

Касание пяткой и схождение с пальцев коррелируют с двумя пиками силы, которые мы видели на рис. 1.8, и лишь очень небольшое давление приходится на среднюю часть стопы. Наоборот, все другие виды обезьян демонстрируют некоторую степень высокого давления на среднюю часть стопы, что указывает на гибкость средней части стопы и их неспособность приземляться на пятку или разгибать пальцы стопы. Наблюдая за ходьбой шимпанзе, бонобо и гориллы, мы видим, что стопа опускается на землю почти плоской. Как мы увидим в главе 4, ограниченное разгибание пальцев у лазающих по деревьям видов происходит из-за направленного вниз изгиба костей. Направленный вниз изгиб облегчает хватание, но препятствует разгибанию при ходьбе по плоской поверхности — прекрасный пример того, как форма определяет функциональные способности.

Кости стопы современного человека выстроились в куполообразную арку, но до сих пор не ясно, когда именно это произошло. Знаменитые следы в Лаэтоли*, которые скорее всего были оставлены тем же видом, к которому относится Люси, *Australopithecus afarensis*, демонстрируют способность приземляться на пятку и сходить с пальцев почти тем же способом, что и современные люди, и могут являться индикатором появления ранней арки. Тем не менее некоторые исследователи утверждают, что отсутствие давления на среднюю часть стопы указывает только на то, что стопа напрягается при подъеме пятки и продвижении стопы к носку для схода с пальцев и что необходимую жесткость стопе могли обеспечивать как минимум два механизма, не зависящие от наличия высокого свода стопы (Sorrentino и др., 2020). Опять же,

* Серия следов двуногой походки, найденных в Танзании, сохранилась в застывшем вулканическом пепле возрастом 3,7 млн лет.

отсутствие ископаемых останков ограничивает наши шансы на уверенность.

Стабилизирующие механизмы, используемые для обеспечения «жесткого рычага» стопы, будут подробно рассмотрены в следующих главах, но их кратко можно описать как использование комбинации динамик геометрического и силового замыкания. Геометрическое замыкание является результатом плотного прилегания костей друг к другу в ответ на проходящее через стопу естественное движение — организация, для которой требуется, чтобы кости располагались в форме сводчатого купола. Это контрастирует с силовым замыканием, которое создается натяжением окружающих стопу мягких тканей,

и сближением костей, которые они поддерживают. Участвующие в этом мягкие ткани располагаются как внутри самой стопы (так называемые внутренние мышцы), так и снаружи (более известные мышцы голени).

Действие обоих механизмов — и геометрического, и силового замыкания — обеспечивается длинным шагом. Как мы увидим, супинация стопы происходит благодаря ротации голени, и более длинный шаг как раз обеспечивает эту ротацию костей, создавая геометрическое замыкание. Для того чтобы была возможность приземлиться на пятку, необходимо, чтобы разогнулись пальцы задней стопы. Разгибание пальцев придает жесткость мягким тканям

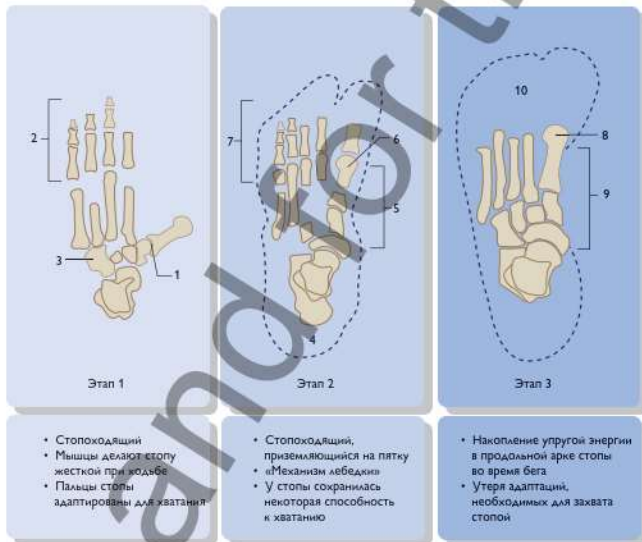


Рисунок 2.15. Три основных этапа эволюции стопы, предложенные Holowka и Lieberman (2018). Каждый проиллюстрированный вид приведен в качестве примера, другие виды также могут соответствовать указанным критериям.

Этап 1 — *Ardipithecus ramidus* демонстрирует большой палец стопы, способный к отведению и обладающий возможностью противопоставляться другим пальцам стопы (1), и длинные пальцы стопы (2), но при этом обладает удлинённой средней частью стопы (3).

Этап 2 — *Australopithecus afarensis* обладает способностью к касанию пяткой (4), низкой медиальной продольной аркой стопы (5), слегка отведенным большим пальцем стопы (6) и длинными пальцами стопы (7). Пунктирная линия обрисовывает след, оставленный Лазтоли.

Этап 3 — *Homo habilis* и *erectus* имеют полностью приведенный большой палец стопы (8), медиальную продольную арку стопы, как у человека (9), и, судя по следам из Илефета, Кения (пунктирная линия), короткие пальцы на ногах.

на подошвенной поверхности стопы и запускает «механизм лебедки», способствуя увеличению общей жесткости стопы и предотвращая перелом средней части стопы, описанный в главе 1, создавая силовое замыкание.

В поддержку своей модели эволюции человека, основывающейся на беге на длинные дистанции, Либерман указывает, что две недавно сформировавшиеся черты — короткие пальцы ног и высокая арка стопы — не нужны для эффективной ходьбы. Изогнутая стопа и участвующие в этом мягкие ткани действуют, как пружина, только во время бега, поскольку бег деформирует арку стопы гораздо больше, чем ходьба, и создает более высокие напряжения в мягких тканях. Мягкие ткани в этом случае обладают лучшей способностью возвращать энергию, способствуя продвижению вперед, — этот механизм почти полностью отсутствует при ходьбе из-за меньших усилий.

Увеличенные силы реакции опоры, проходящие через стопу во время бега, частично контролируются сгибателями пальцев стопы, когда тело проходит над стопой и суставы пальцев разгибаются. Меньшая длина пальцев ног сокращает объем работы, необходимой

для управления задействованными силами (Rolian и др., 2009). Оба эти изменения — длина пальцев стопы и высота арки стопы — не влияют на рабочую нагрузку при ходьбе, но обеспечивают преимущество во время бега за счет снижения энергозатрат.

Оценка той роли, которую играет в различных двигательных паттернах форма стопы, позволила Holowka и Либерману (2018) представить эволюционный путь стопы, состоящий из трех этапов (рис. 2.15). Данная схема ведет нас от отведенного большого пальца стопы у длиннопалого ардипитека через приведение большого пальца с сохранением длиннопалости у австралопитеков к линии Номо, обладающей такими характеристиками, как короткие пальцы стоп и высокие арки стопы.

Развитие упругой арки стопы позволило снизить затраты на передвижение и открыло новые возможности для охоты. Структурные и, следовательно, функциональные изменения ранних Номо — лишь один из нескольких факторов, позволивших перераспределить энергию в пользу питания нашего увеличившегося мозга. Замедление темпа жизни (с точки зрения



Рисунок 2.16. Многочисленные анатомические и перцептивные изменения шли рука об руку, способствуя увеличению размера мозга. (От Navarette и др., 2011 г.)

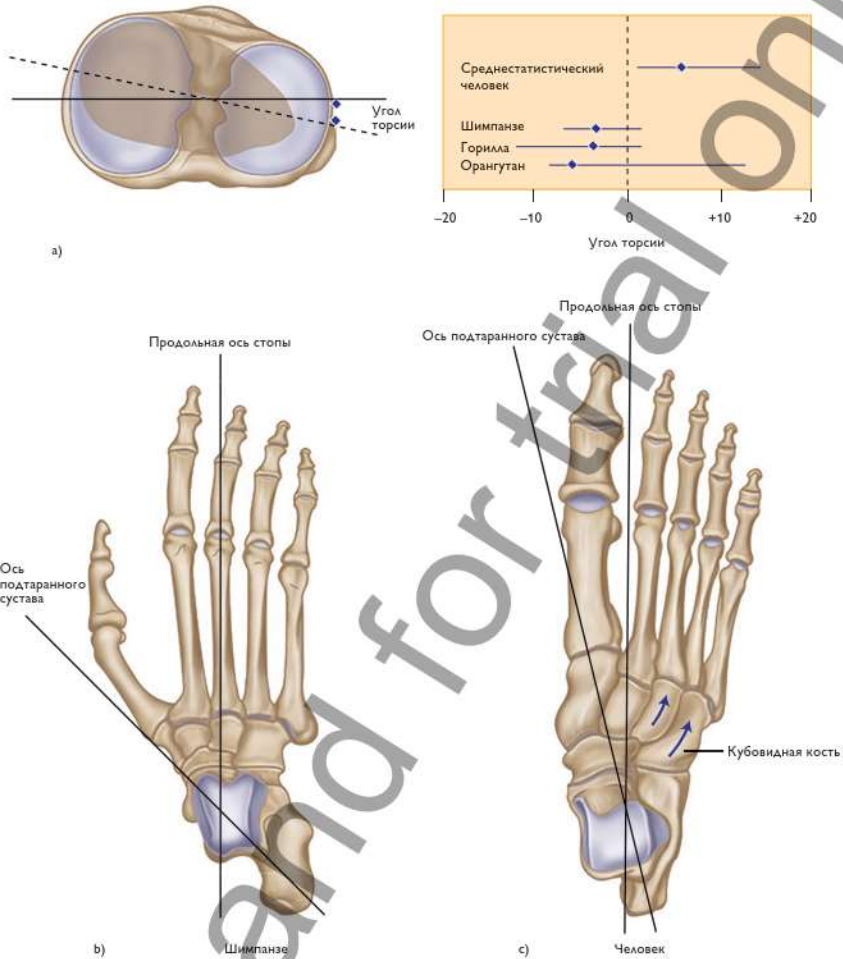


Рисунок 2.17. (а) Торсия (поворот) большеберцовой кости измеряется путем сравнения изменения угла между мыщелками бедренной кости (сплошная линия) и двумя лодыжками (пунктирные линии). На схеме показано, что шимпанзе, гориллы и орангутаны имеют внутреннюю торсию, в отличие от латеральной торсии большеберцовой кости человека. (б и в) Прямое сравнение стопы человека и обезьяны в целом показывает приведение большого пальца ноги, удлинение латеральной части предплюсны и перестройку подтаранного сустава в стопе человека. Здесь также показано, как меняет свое положение большой палец ноги человека: если у обезьян он обращен к стопе, то в стопе современного человека он обращен к земле.

темпов роста и размножения, а не в смысле расслабленного лежания на диване!), улучшение качества и регулярность поступления пищи,

а также формирование сотрудничающих групп — все это благотворным образом способствовало улучшению соотношения размера

нашего мозга и тела' (рис. 2.16, Navarrete и др., 2011). Перераспределение ресурсов в пользу размера мозга инициировало относительно быструю смену форм тела, каждая из которых соответствовала своему видовому назначению, — *Homo habilis* (Человек умелый), *Homo erectus* (Человек прямоходящий), *Homo heidelbergensis* (Гейдельбергский человек) и *Homo nealedi* (человек наледи), и это лишь некоторые из них.

До сих пор ведутся споры о том, какой требовался порядок изменения форм для развития куполообразной упругой стопы. Мортон подчеркивал, что важную роль в приведении большого пальца стопы сыграло скручивание плюсневой кости (1935) (см. также главу 4), другие считали, что этому способствовало удлинение латеральной части переднего отдела стопы, которое приблизило плюсневые кости к большому пальцу (Кидд, О-Хиггинс и Окснорд, 1996), или смещение оси подтаранного сустава. Независимо от того, какое изменение произошло первым, вся структура стопы стала куполообразной, что привело к приведению большого пальца стопы, выстроило линию относительно выровненных головок плюсневых костей и обеспечило упругость арки стопы, а также способствовало ряду изменений в костях голени.

Сравнение покрывающих таранную кость лодыжек приматов показывает, что человеческие голени имеют способность скручиваться в латеральном направлении по сравнению с их родственниками-приматами (рис. 2.17). Мы продолжим изучение функциональной взаимосвязи между таранной костью и большеберцовой и малоберцовой костями в следующих главах, поскольку два лодыжечных отростка костей голени охватывают и могут контролировать таранную кость стопы. Тесная взаимосвязь этих трех костей означает, что если одна из них меняет свое направление или выравнивание, то и остальные, скорее всего, последуют

за ней. Если большеберцовая кость скручивается латерально, то для того, чтобы пальцы стоп могли коснуться земли, потребуются вышеуказанные изменения (приведение большого пальца стопы, скручивание плюсневых костей и удлинение латеральной части стопы). Хотя было бы заманчиво обнаружить, какая именно кость изменилась первой, не менее вероятно и то, что адаптация происходила одновременно во всем комплексе стопы, поскольку любое изменение в одной области меняет силы, получаемые через остальную часть структуры.

Что оставляет нас с вопросом: где бы мы сейчас были, если бы не развили пружинистость нашего шага?

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

Похоже, что в своей совокупности данные согласуются с прогнозом Мортон, как уже обсуждалось в начале этой главы: прямохождение снижает метаболические затраты на передвижения, а изменения в стратегиях движения отражены в тех изменениях, которые содержат в себе скелетные и палеонтологические летописи. Эти изменения формы тесно переплетены с экологией, поскольку любое изменение в окружающей среде влияет на открывающиеся для нас ниши и формирует нескончаемую петлю обратной связи, которая стимулирует эволюцию. Но эволюцию не в смысле прогресса, а в смысле изменения и адаптации, нацеленных на то, чтобы найти наилучшее соответствие той нише, в которой мы находимся.

Мы начали эту главу с трех основных вопросов о том, откуда взялась стопа, почему она похожа на многие другие и в чем уникальность человеческой стопы? Мы разобрали, как первые стопы оказались на суше, и исследовали механизмы, с помощью которых тело накапливает изменения с течением времени. Созданная на основе того же «строительного плана», что и у других позвоночных, человеческая стопа уникальным образом адаптировалась к управлению силами окружающей среды, — сначала к прямохождению, а затем к бегу, — сохраняя при этом способность стоять, карабкаться, бороться, тянуть и толкать.

* Абсолютный размер мозга не настолько важен; у слонов и китов мозг больше. У людей высокий коэффициент энцефализации — большой мозг по сравнению с размером их тела; у китов и слонов этот коэффициент меньше. Форма и пропорции областей мозга также являются важными факторами когнитивного процесса. Так что размер — не единственный важный фактор.

Хотя Мортон сказал, что «история о том, как человек стал двуногим, — это история, написанная на языке биомеханики», мы могли бы заменить это на «...на языке «формы»». Новые инструменты для анализа формы позволили исключить из анализа фактор предвзятости. И чтобы понять биомеханику, чтобы составить представление о том, что может и чего не может делать та или иная

форма, мы действительно должны понимать язык формы.

Любой изучающий анатомию человек изучает форму, поэтому мы не оставим нашу сравнительную анатомию в этой главе, а возьмем ее с собой в наше путешествие. Разобраться в том, какую роль играет форма в движении и связанных с ним силах, — важная цель этой книги, которая плавно подводит нас к следующей главе.

ФОРМА КОСТИ

Мое тело — это форма, в которой я живу,
и оно формирует то, как я живу.

Ракель Уэлч

■ ВВЕДЕНИЕ

Как мы уже видели до сих пор, чтобы понять стопу, мы должны разобраться во множестве функций ее костей и в том, как их форма влияет на наши движения. Движущемуся телу необходим некоторый элемент жесткости в качестве основы для движения. В то время как у позвоночных можно обнаружить множество стратегий увеличения жесткости, позвоночные решили справиться с этой потребностью посредством развития костей. Кость играет важную роль в калейдоскопе тенсегрального баланса тела, и эта сложная роль требует постоянного мониторинга и обновления морфологии костей.

Кость формируется на двух разных уровнях развития, во-первых, посредством эволюционного наследования (или филогенеза) — общая

схема количества и положения костей определяется генетическим наследием и секвенированием генов Нох. Общее строение костных «каркасов» позвоночных было относительно постоянным на протяжении 500 миллионов лет (Gould 1989, цитируется у Carter и Beaupré, 2001). Как мы видели на рис. 2.9, каждая составляющая очень консервативного каркаса скелета была адаптирована, изменена и перепрофилирована, чтобы обеспечить каждому из видов новые стратегии движения в их среде. После рождения унаследованная форма кости будет влиять на общие возможности движения, однако система позволяет отдельным костям формироваться в соответствии с требованиями к движению, предъявляемыми конкретно данной средой. Этот второй механизм позволяет обновлять и корректировать эволюционный план в ходе развития (или онтогенеза).

В этой главе мы исследуем онтологическое развитие кости. Функциональные и механические требования, предъявляемые к телу на протяжении всей его жизни, приводят к сложным

* Подробное введение во взаимосвязи между формой, функцией, скелетом и генетической адаптацией можно найти в книге Нила Шубина «Требуется сборка» (One World, 2020).

взаимодействиям внутри каждого типа тканей. В случае с костной тканью существует петля обратной связи, позволяющая специализированным клеткам ощущать испытываемую костью нагрузку, чтобы затем эти клетки могли управлять строительством и поддержанием состояния кости.

Этот механизм, действующий в режиме реального времени, позволяет костям постоянно, хотя и медленно, обновлять свою форму в ответ на воздействие окружающей среды. Это немного похоже на настройку вашего компьютера на автоматическую загрузку и обновление для новых операционных систем: при условии, что у вас включено питание и компьютер имеет доступную вычислительную мощность, он позаботится о себе сам. Однако чтобы наши кости выполняли аналогичную работу, необходимо создать правильные условия питания и движения.

Костная ткань откладывается в ответ на общую механическую среду, и передача силы от кости к кости прекрасно проиллюстрирована на рентгеновском снимке стопы (см. рис. 1.15). Трабекулярный паттерн иллюстрирует тот факт, что в действительности сила передается через систему, а не через совокупность костей, которые каким-то образом образуют череду арок. Понимание того, как тело проявляется и организует себя, редко исследуется в текстах такого типа, поэтому мы посвятим некоторое время тому, чтобы оценить сложности формирования и строения кости в целом, прежде чем погрузимся в особенности костей стопы в главе 4.

Натяжение и сжатие, определяющие силы систем тенсегрити, являются основными формирующими силами кости, поскольку кость может ощущать механическую среду и реконструировать себя, чтобы оптимизировать свою форму. Механорецептивная способность кости позволяет моделям деформации ткани управлять клеточным действием и обеспечивать самоорганизующуюся систему, которая удовлетворяет конкурирующие потребности в легкости, гибкости и прочности.

В этой главе мы исследуем способность тела ощущать, распределять и реагировать на напряжение, динамику, которая была

исследована в контексте тенсегрити (подробный обзор см. в Solórzano, 2020). В этом тексте мы узнаем о сложном взаимодействии между более жесткой тканью кости и тем, как тело использует сократительные мягкие ткани для регулировки натяжения и для поддержки скелета. Скелет, в свою очередь, обеспечивает ту жесткость, которая необходима для того, чтобы удерживать мышцы и сухожилия в постоянном балансе между натяжением и сжатием, являющемся основополагающей динамикой при определении формы кости.

■ СПОСОБНОСТЬ КОСТИ САМОМОДИФИЦИРОВАТЬСЯ

Хотя кость в основном рассматривается как стабилизирующий элемент, мы не должны рассматривать ее лишь с такой ограниченной точки зрения. Для полного понимания нам следует изучить взаимосвязь между структурой кости, ее свойствами и ее часто противоположными потребностями. Эти потребности включают в себя способность костей создавать более стабильные условия, которые облегчают движение, обеспечивают защиту (для себя и различных других мягких тканей) и адаптируются к различным напряжениям, которым подвергается движущееся тело, — растяжению, сжатию, сдвигу, изгибу и скручиванию (рис. 3.1). При этом кость также должна быть достаточно податливой, чтобы не только поглощать некоторые из этих сил, но и ощутить организационную динамику движения.

Податливость кости в ответ на движение сил позволяет ей самомодифицироваться, поскольку клетки, содержащиеся в структуре кости, чувствуют и реагируют на повторяющиеся изменения в силовой среде. Эта динамическая характеристика помогает костям самоорганизовывать свою структуру в контексте общей силовой среды, поскольку проходящие через кость напряжения создают непрерывную петлю обратной связи: движение — нагрузка — реакция — строительство/реконструкция — движение — нагрузка — реакция — и т. д.

Сжатие и растяжение трудно воссоздать в чистом виде: кости чаще всего также

испытывают изгибающие силы. Изгиб создает натяжение с одной стороны и сжатие с другой, и воздействие этих сил направляет клетки внутри кости, чтобы они подстроили ее форму (рис. 3.1). Тем не менее сгибание длинных костей потенциально опасно, поскольку допускает растяжение и сжатие с обеих сторон кости, что может привести к появлению зоны уязвимости: как только структура начинает сгибаться, приложение большего усилия будет сгибать ее еще больше. Противодействием такой появляющейся в результате сгибания уязвимости было бы создание костей, которые не сгибаются, но это сделало бы их хрупкими: воздействие любой изгибающей силы приводило бы к перелому, так что в некоторых случаях полезно иметь немного гибкости.

Кость — это действительно удивительная плотная материя, достойная тех метаболических затрат, которые необходимы для ее создания и постоянного присутствия в нашем теле. В процессе развития наше тело работает над поиском оптимального баланса между потенциально противоположными

потребностями использования достаточного количества правильных материалов, чтобы обеспечить поддержку в рамках предела погрешности, не создавая при этом слишком больших метаболических затрат. К счастью, как мы увидим ниже, природа предоставила целый ряд подходящих решений этой головоломки.

■ РАЗНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ РАЗНОГО РОДА РАБОТ — КОРТИКАЛЬНАЯ И ГУБЧАТАЯ КОСТИ

Кость имеет две основные формы: прочную и плотную внешнюю оболочку и плетеный сетчатый внутренний каркас (рис. 3.2). Этот внешний слой кости, известный как кортикальная или компактная кость, плотно упакован, обладает относительной жесткостью и прочностью (см. также рис. 3.4). Но будучи плотным, он также тяжелый и составляет примерно 80% костной массы. Чтобы облегчить себя, кость строит внутреннюю каркасную систему, известную

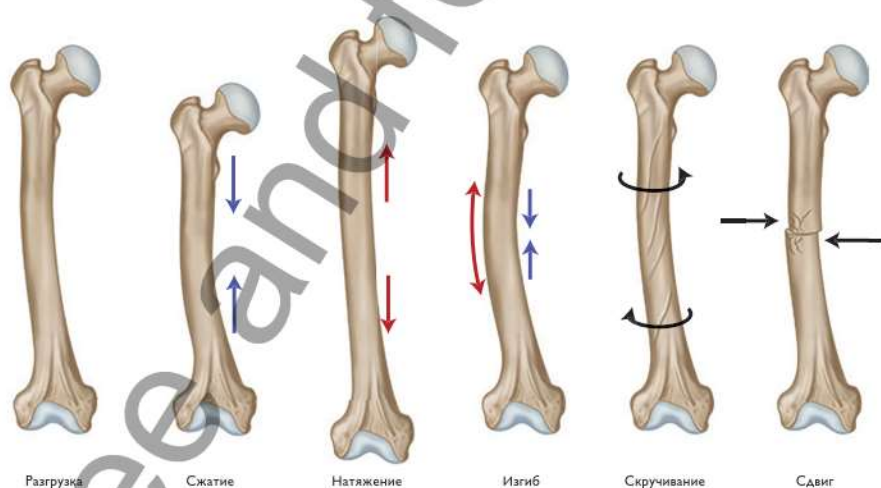


Рисунок 3.1 Хотя силы никогда не возникают по отдельности, полезно дать определение каждому типу. Сжатие и растяжение являются противоположными силами, либо непосредственно сближающими ткани, либо растягивающими их. Большинство конструкций испытывает некоторую степень изгиба, что создает напряжение с одной стороны и сжатие с другой. Скручивание является результатом скручивающего действия или крутящего момента. Сдвиг происходит тогда, когда на ткань действуют две противоположные силы.

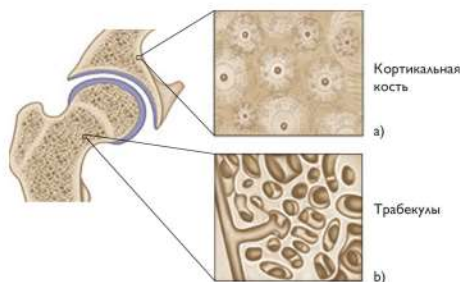


Рисунок 3.2. а) Кортикальная кость плотная (составляет примерно 80% костной массы) и гладкая. Покрывающая ее надкостница обеспечивает место прикрепления для различных мягких тканей. б) Трабекулы (лат. «маленький пучок», также известный как «губчатая кость») формируются в длинных костях, образуя каркас, который одновременно укрепляет и (поскольку он обладает меньшей плотностью) облегчает общую структуру.

как губчатая или трабекулярная кость. Эта внутренняя конструкция относительно слабее, но позволяет кости сгибаться под нагрузкой и, следовательно, делает кость менее хрупкой.

Терминология

В тексте мы будем обсуждать напряжение и деформацию. Если это новая для вас терминология, не впадайте в панику. Со временем, по мере того как в разных главах мы будем рассматривать эту тему с разных сторон, все обретет свой смысл, и каждая глава поможет вам построить целостную картину. Ниже мы приводим официальное определение, но возможно, вам будет легче запомнить, что применяется нагрузка, а ощущается деформация.

Нагрузка является мерой силы, действующей на ткань.

Деформация — это реакция ткани.

Нагрузка = сила, деленная на площадь поверхности, или количество силы, приложенной к измеряемой площади.

Деформация = реакция конструкции; измеряется изменениями длины или объема.

Как правило, если деформация создает растяжение, произойдет реакция удлинения, а если деформация вызывает сжатие, будет реакция уплотнения.

Приведем реальный пример.

Подумайте о разнице между ходьбой по деревянному полу в туфлях на плоской подошве и на шпильках.

На полу не останется следов от плоской подошвы, но, скорее всего, останутся вмятины от каждого приземления шпильки. Вес тела одинаков в любой обуви, но при ношении шпильки он сосредоточен на меньшей площади. Вот почему нагрузка измеряется как сила (вес тела, умноженный на силу тяжести), деленная на площадь (обувь на плоской подошве или на остроконечном каблук).

Поскольку та же самая сила (вес тела и гравитация) сосредотачивается на меньшей площади (шпильке), на пол приходится больше нагрузки. В результате деревянный пол деформируется.

Для простоты давайте сравним каблук-шпильку с площадью поверхности 1 см^2 с каблуком лофера с площадью поверхности 35 см^2 : в случае шпильки площадь, на которую распределяется действие силы, в 35 раз меньше.

Или, говоря иначе, под шпилькой пол получит в 35 раз больше нагрузки.

Конечно, можно произвести множество вычислений, используя новую и относительно сложную математику, но они доступны в большинстве текстов по биомеханике. Для нас же сейчас важна не столько математика, сколько принципы нагрузки и деформации.

Каждая кость будет иметь уникальное соотношение и расположение типа кости в соответствии с нагрузками и деформациями, которым она подвергалась. Соотношение кортикальной и губчатой костей является одним из способов адаптации организма путем размещения нужных материалов в нужном месте в ответ на комплексный анализ соотношения затрат и выгод.

В качестве аналогии рассмотрим расходы на строительство небоскреба в Лондоне с умеренным климатом только для того, чтобы его немедленно перенесли в Москву и подвергли воздействию экстремальных условий российской погоды. Использовали бы вы все дорогостоящие материалы, необходимые для утепления небоскреба в Москве, если бы думали, что он останется в Лондоне? Вероятно, нет, так как это было бы дорогостоящим и неэффективным использованием материала. Таким образом, наш перенесенный небоскреб, «спроектированный для Лондона», теперь будет испытывать колебания температуры, которые могут создать структурные дефекты и в конечном итоге привести к обрушению здания. А что, если бы материалы могли автоматически, хотя и медленно, подстраиваться под требования окружающей среды?

Точно так же, как кто-то возражал бы против использования московских уровней изоляции для здания в Лондоне, тело пытается найти правильный баланс материалов, соответствующий его механической нагрузке, — с этой

динамикой вы, возможно, знакомы из закона Вольфа.

Вдохновленный наблюдениями фон Мейера о сходстве между трабекулами в головках бедренных костей и опорами мостовых кранов, Юлиус Вольф опубликовал свой хорошо известный «закон трансформации костей» в 1892 году (Barak и др., 2011). Однако идея строгого математического закона подверглась тщательному анализу в последние 20–30 лет, поскольку закон Вольфа, с акцентом на слове «закон», говорит о механической силе как об основном конструктивном факторе, тогда как реальность намного сложнее. Возраст, травма и уровень гормонов — все это влияет на размер и форму кости, поэтому вместо закона Вольфа для описания формирования и моделирования кости был предложен термин «функциональная адаптация кости» (Ruff и др., 2006). Тем не менее механическая нагрузка остается основным определяющим фактором, который все еще можно использовать для прогнозирования и интерпретации трабекулярных паттернов в соответствии со стратегиями локомоции (Barak и др., 2011) и который облегчает интерпретацию и сравнение ископаемых останков и родственных видов, которые мы видели в главе 2.

Возможность спроектировать небоскреб, который может адаптироваться к различным средам, потребует коммуникации через множество различных уровней и материалов, используемых при его строительстве: стены, окна, трубы для кондиционирования воздуха, электрические каналы и все связанные с ними болты, винты и гвозди и т. д. должны будут координироваться по мере добавления новых слоев, а для изменения путей по мере адаптации здания потребуются служебные воздуховоды. Процесс изменений потребует множества инструкций для того, чтобы многочисленные архитекторы, менеджеры, супервайзеры и рабочие смогли передавать туда и обратно соответствующую информацию и наилучшим образом использовать доступные материалы и ресурсы.

Кость (и многие другие ткани тела) должна самоорганизовываться аналогичным образом,

и она делает это с помощью иерархического ряда тканей, подобных архитекторам, менеджерам, надзирателям и рабочим в нашем фантастическом небоскребе. Многие утверждают, что морфология скелета является выражением генетических и механобиологических «морфогенетических правил» (Carter и Beaupré, 2001), — фраза, указывающая на взаимосвязь между механикой и клеточной экспрессией, — а также общего генетического плана, т. е. представляет собой смещение филогенетических и онтогенетических процессов.

Это захватывающее взаимодействие между клетками и их механической средой было исследовано Ченом и Ингбером (1999), которые предположили, что каждый уровень организации, от клетки до ткани и органа, является частью взаимодействующей иерархии, устроенной таким образом, чтобы облегчить структурную оптимизацию посредством механотрансдукции — преобразования механической силы в электрохимические стимулы для производства, поддержания и изменения ткани.

Определенные клетки в тканях организма чувствуют механическую нагрузку. Затем эти клетки могут отправить сигнал, чтобы посредством соответствующих реакций скорректировать величину напряжения таким образом, чтобы сбалансировать конфликт мобильности/стабильности. Даже при использовании минимального количества материала, но при построении с соответствующими запасами прочности, кость имеет идеальную форму для того, чтобы выдерживать ежедневные нагрузки, которым она подвергается. Натяжение и сжатие, возникающие во время движения, обеспечивают элемент стимула в петле обратной связи, поскольку кость использует свои механорецепторы, чтобы структурировать и направлять ремоделирование отдельных костей.

■ РЕАКЦИЯ КОСТЕЙ И ДРУГИХ ТКАНЕЙ НА ДЕЙСТВИЕ СИЛ

Как упоминалось выше, потребность тела в «твердом» каркасе ставит перед костями противоречивые требования: быть достаточно плотными, чтобы создать надежную опору для движения и поглощения сил, но быть как можно более легкими, чтобы уменьшить потребность в затрачиваемых калориях и способствовать более быстрому ускорению отдельных частей тела и всего тела в целом.

Положение, размер и форма кости в сочетании со стилем передвижения определяют углы, амплитуду и скорость силовых взаимодействий. Квадратные кости стопы четвероногого подвергаются сильной компрессии, верхняя конечность брахиатора будет испытывать значительное растяжение, а бедренная кость двуногого будет испытывать компрессию, приводящую к изгибающим силам (рис. 3.3). Форма и размер (особенно длина) кости влияют на действующие на нее силы и на общую биомеханику животного.

Квадратные кости обеспечивают прочную опору для областей с высокой нагрузкой, а длинные кости обеспечивают эффективное движение. Наши более длинные нижние конечности, например, являются одной из причин нашей экономичной ходьбы, поскольку они позволяют делать более длинные шаги. Наличие всего двух длинных костей — бедренной и большеберцовой — между нашим тазом и стопами значительно увеличивает длину шага. Длинные кости также обеспечивают механическое преимущество, поскольку они увеличивают расстояние между суставами и улучшают рычаги.

Мы уже упоминали идею о том, что стопа становится «жестким рычагом» в точке схождения с пальцев. Создание «твердой» стопы между пальцами ног и голеностопным суставом улучшает нашу способность создавать силу для продвижения вперед. Преимущество более длинной кости можно легко визуализировать с помощью ставших популярными металлических палок, используемых собаководами по всему миру. Длинный пластиковый рычаг палки значительно увеличивает расстояние, которое мяч преодолевает без особых дополнительных усилий.

* В данном случае иерархия основывается на уровнях сложности тканей и выражается по принципу «от простого к сложному», но в действительности ни один из этих уровней не является более «важным», чем другие, и в этом смысле это действительно еще одна гетерархия.

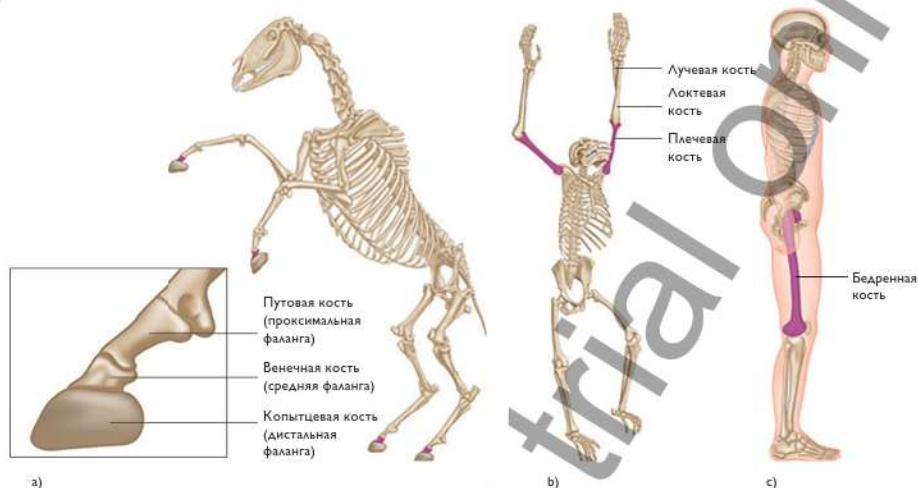


Рисунок 3.3. Форма и размер костей адаптировались к их функции. а) Фаланга лошади приобрела кубическую форму, став более прочной, чтобы противостоять компрессионным силам. б) Кости верхних конечностей гиббона удлиннились, чтобы облегчить брахиацию и справиться с силами натяжения. в) Длинная бедренная кость человека имеет дело с компрессионными силами, которые могут вызвать изгиб кости.

Наличие более длинных «рычагов» в ногах и стопах обеспечивает нас аналогичным преимуществом, но недостатком длинных костей является то, что они склонны к изгибу и требуют дополнительного контроля, направленного на предотвращение их чрезмерно сильного изгиба. Человеческое тело поместило маленькие квадратные кости вокруг задней части стопы, куда приходится большее действие сил, и приберегло «длинные» кости для плюсневых костей*. В следующих главах мы увидим, что стопа использует целый ряд хитроумных стратегий для удовлетворения конкурирующих функций амортизации и производства силы, и это частично достигается за счет формы ее костей.

Кость должна справляться с компрессионной от удара, с растяжением, со сдвигом и с изгибом, и каждая отдельная кость со временем адаптировалась таким образом, чтобы справляться с силами, которым она подвергается в окружающей среде. Однако создание

полностью твердой костной системы, которая самостоятельно управляла бы всеми силами, было бы метаболически затратным с точки зрения производства и поддержания костного материала, а также тяжелым и дорогостоящим с точки зрения перемещения. Тело позвоночных разработало несколько решений этой проблемы за счет изменения формы и размера костей, а также за счет развития разнообразия тканей — костей, связок, сухожилий и мышц. Каждая ткань имеет различные свойства и играет свою роль в управлении силами.

Из тех тканей, которые изображены на рис. 3.4, кость имеет наибольшую степень жесткости, которая является мерой ее устойчивости к нагрузкам (оба термина определены выше**).

** Ганс Селье, который разработал знаменитый анализ общей системы адаптации реакции человека на стресс, сказал, что он сожалел о своем непонимании английского языка, поскольку он использовал бы лучшее слово, чем «стресс», для описания нашей реакции на стрессора. Стресс/нагрузка — это измерение приложенной силы, «деформация» — правильный термин для обозначения реакции на стрессор. <https://www.stress.org/what-is-stress>. Нагрузка и деформация более подробно рассматриваются в главе 5.

* В действительности плюсневые кости не очень длинные, но анатомически они классифицируются как таковые.



Рисунок 3.4. Каждая ткань имеет уникальную реакцию на нагрузку в зависимости от свойств материала и от общей формы. Показанные здесь линии иллюстрируют среднестатистическую реакцию для каждого типа ткани — кортикальной и губчатой костей, связки и сухожилия. Их способность удлиняться измеряется как деформация по горизонтальной оси графика, а приложенная сила (нагрузка) измеряется по вертикальной оси. Оба типа костного материала не сильно удлиняются до достижения длины пластичности и разрушения, но для разрушения кортикальной кости требуется приложение большей силы. Связки и сухожилия будут удлиняться больше, чем кость, достигая деформации в 10–13%, прежде чем они потеряют свою целостность. Снижение кривых для связок и сухожилий указывает на то, что они частично утратили свою целостность и будут удлиняться при меньшем приложении силы. Говорят, что после пика кривой они вступили в пластическую фазу. Пластическая фаза — это когда материал деформируется и не может вернуться к своей первоначальной длине; он деформирован навсегда. Если усилие будет увеличиваться дальше, ткань в конечном итоге достигнет предела и полностью разорвется. Прежде чем любой материал войдет в свою пластическую фазу, он имеет возможность вернуться к своей первоначальной длине и, следовательно, является упругим — он может вернуться обратно в исходное положение. (Нагрузка и деформация более подробно рассматриваются в главе 5.)

Небольшой градиент изгибов у связок и сухожилий контрастирует с изгибами костей, показывая, что они менее плотные. Однако хотя кость прочнее в том смысле, что она может выдерживать большие усилия до разрушения, она не сильно деформируется (удлиняется) в ответ на нагрузку (приложенную силу). Связки и сухожилия могут удлиняться намного больше, чем кость, при низких нагрузках, прежде чем достичь фаз пластичности и разрушения, поэтому они менее прочны, но более эластичны

и упруги, чем кость. Кость, связки, мышцы и сухожилия работают вместе, чтобы справиться с действующими на них силами; при этом, в отличие от обеспечивающих жесткость костей, связки и сухожилия обеспечивают эластичную поддержку и гибкость.

Факторы, влияющие на реакцию кости на нагрузку, многочисленны и сложны, и они включают состав (баланс между минералами, органическим материалом и содержанием воды), тип (кортикальная кость или трабекулы), плотность и ориентацию трабекул, длину кости, поперечное сечение и положение в суставе. Например, бедренная и большеберцовая кости — обе они являются длинными костями — иллюстрируют, как разные потребности коррелируют с разными характеристиками. Бедренная кость имеет способность изгибаться в ответ на нагрузку, в то время как большеберцовая кость — в меньшей степени. Бедренная кость имеет относительно круглое поперечное сечение по диафизу по сравнению с более треугольной большеберцовой костью, которая является более толстой костью, и именно ее треугольная форма делает большеберцовую кость более прочной и менее подверженной изгибу (см. рис. 3.5 и 4.8).

Мортон говорил о локомоции (перемещении) как о взаимодействии, и то же самое верно в отношении анатомии. На реакцию кости влияют не только ее материальные свойства, но и ее непосредственное окружение. Бедренная кость окружена прочной сократительной тканью, и ряд исследований демонстрирует способность мышц сохранять целостность кости и, возможно, создания воздействующей на нее компрессии (Duda и др., 1998; Lutz и др., 2016), см. рис. 3.6.

Как упоминалось выше, сгибание кости увеличивает возможность того, что она согнется еще больше и в конечном итоге сломается — сгибание длинных костей под большими нагрузками опасно. Можно провести простой эксперимент с карандашом, чтобы увидеть, насколько легко его сломать, если его согнуть, и насколько это будет нелегко, если попытаться сжать его, толкая внутрь с любого конца. Однако мы не можем анализировать

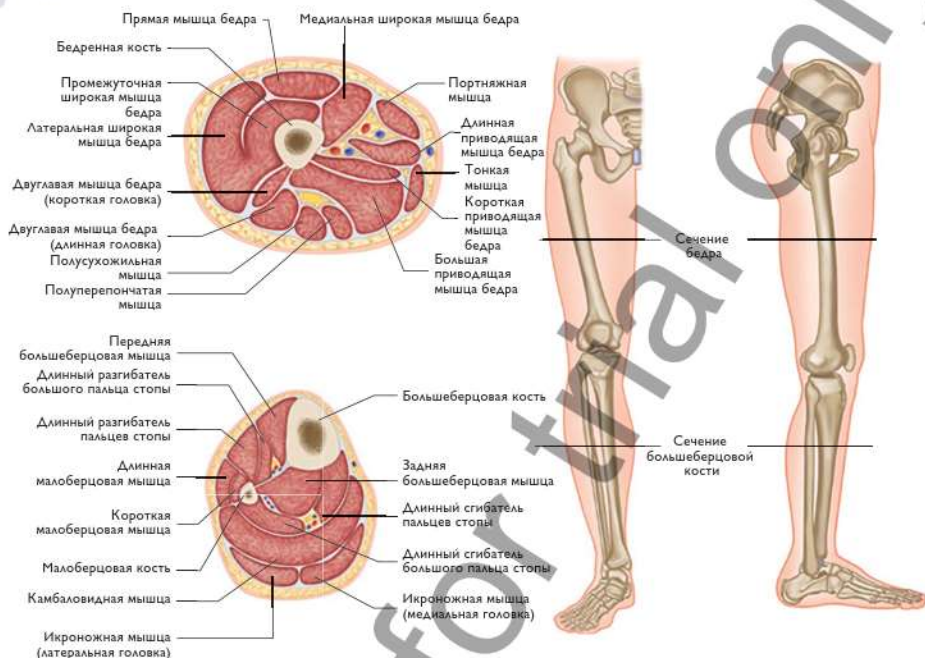


Рисунок 3.5. Геометрия поперечного сечения кости влияет на окружающую среду и зависит от нее. Бедренная кость, самая длинная кость тела, наклонена внутрь от бедра до колена и слегка изогнута вперед/назад. Она окружена крупными сильными мышцами и заканчивается наверху подвижным суставом. Напротив, большеберцовая кость расположена вертикально между голеностопным и коленным суставами, ни один из которых не имеет большого количества степеней свободы. Поперечное сечение большеберцовой кости также демонстрирует наличие у нее толстого, плотного кортикального слоя, что еще раз указывает на ее менее податливую природу.

форму кости и свойства материала, как если бы они были отделены от остальной окружающей среды. Используя комплексный анализ, Лутц и его коллеги (2016) показали, что сокращение мышц вокруг бедренной кости значительно снижает изгибающие силы, которые она испытывает при высокой нагрузке (рис. 3.6). Окружающие мышцы влияют на реакцию кости, и их вовлечение сводит к минимуму ее изгиб при высоких нагрузках.

Таким образом, оказывается, что длинные кости способны сгибаться при нормальных нагрузках, но сжимаются (т. е. не сгибаются) при высоких нагрузках, что обеспечивает более безопасный баланс характеристик. Однако,

как мы видели на рис. 3.3, некоторые кости рассчитаны на сжатие — они короткие и квадратные, поэтому вряд ли будут изгибаться и испытывать растяжение.

Требования в системе с ограниченными ресурсами и разумным уровнем предсказуемости лучше всего удовлетворяются при использовании материалов, которые поддерживают и усиливают структуру в определенных направлениях. Возвращаясь к аналогии с небоскребом, было бы напрасно тратить материалы, строя конструкцию, способную противостоять сильным ветрам со всех сторон, если бы бури дули только с запада. Чтобы сэкономить на строительных материалах, биологические ткани

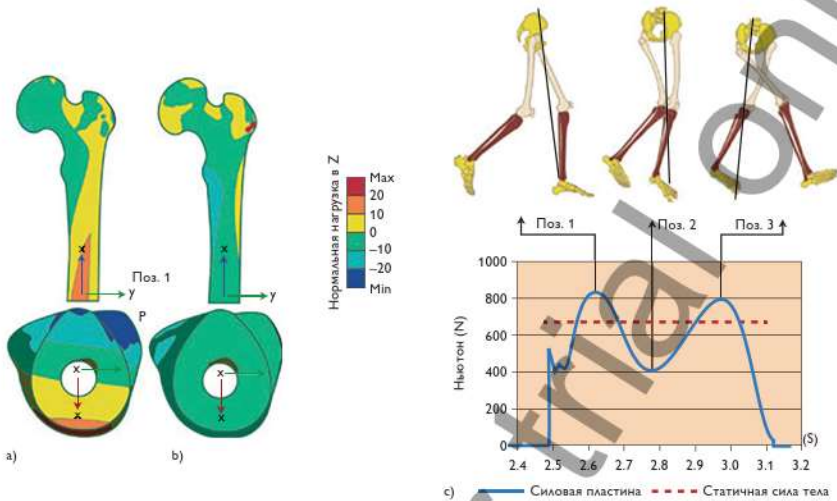


Рисунок 3.6. Несколько экспериментов, в которых использовалось сложное компьютерное моделирование, известное как анализ конечных элементов, показали, что длинные кости могут испытывать почти чистое сжатие во время пиковой нагрузки. Распределение нагрузки, показанное на (a) и (b), представляет собой реакцию кости при касании пятки (позиция 1, (c)). Изображение взято из статьи Lutz и др. (2017), где они использовали новый метод расчета с использованием реальных данных. Сплошная цветовая схема на поперечном сечении (b) указывает на то, что кость не изгибается, в отличие от кости (a), которая имеет диапазон измерений нагрузок, указывающий на растяжение и сжатие.

демонстрируют различную степень анизотропии, т. е. их способность противостоять силам зависит от направления их действия (рис. 3.7). Это еще один признак способности кости активно и локализованно перестраиваться в ответ на повторяющуюся стрессовую среду, в которой она находится (Чен и Ингбер, 1999).

Создание последовательных слоев плотно уложенной твердой кости было бы метаболически затратным. Компромисс заключается в создании жесткого внешнего слоя и каркаса, который иногда может быть полым внутри. Внешний слой плотной, компактной кости обеспечивает прочность всей конструкции.

Как мы уже видели на примере различий между бедренной и большеберцовой костями, тело изменяет толщину кортикального слоя и размеры поперечного сечения, чтобы приспособиться к силам, действующим на кость (Main и др., 2010). Компактная кость также обеспечивает прочность периостальных соединений с мышечно-сухожильными



Рисунок 3.7. Анизотропия кости. Кость не имеет единой кривой нагрузки/деформации: из-за различий в ее форме и трабекулярной ориентации, она по-разному реагирует в зависимости от направления нагрузки и может демонстрировать слабость при нетипичных векторах воздействия.

сократительными тканями и хрящевых взаимодействий на суставных поверхностях, а также укрепляет области компрессии, как показано

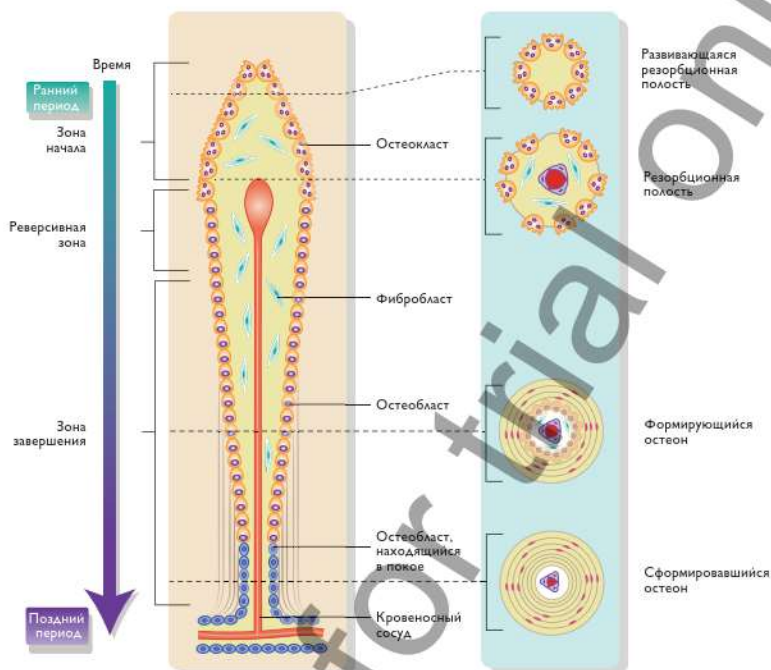


Рисунок 3.8. Сечение конуса, показывающее узор concentрических колец, созданный последовательно остеобластами после разрушения остеокластов. Обратите внимание на захваченные остеобласты, теперь уже ставшие остеоцитами, внутри завершённого остеона. (Иллюстрация из Standring, 2008.)

на рис. 3.4. Тело изменяет толщину кортикального слоя и размеры поперечного сечения, чтобы приспособиться к проходящим через кость силам (Main и др., 2010; Chen и Ingber, 1999).

Твердый кортикальный слой компактной кости также защищает внутренние отделы костей, пористую трабекулярную кость (см. рис. 3.2) (Standring, 2008). Преимущества наличия твердой части снаружи и трабекулярной — внутри заключаются в снижении общей плотности и, следовательно, в снижении метаболических затрат на производство, поддержание и движение кости (Chen и Ingber, 1999), а также в обеспечении пространства для костного мозга или газа (Currey, 2002). Распорки (стойки) трабекулярной кости, как и каналы Фолькмана (рис. 3.9), расположены таким образом, чтобы обеспечивать максимальную прочность путем триангуляции

их связей (Chen и Ingber, 1999). Триангуляция распорок, как мы уже видели на рис. 1.15, помогает распределять нагрузку, как это заметил фон Мейер в стрелах кранов еще в 1890-х годах.

■ КЛЕТЧНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ И МАТЕРИАЛЫ

Развитие и поддержание состояния кости происходит благодаря действию и взаимодействию ее клеток: остеобластов, остеокластов и остеоцитов, показанных на рис. 3.8. Эти клетки образуют строительную систему, в которой каждый тип клеток играет свою роль — строители (остеобласты) и бригады по сносу (остеокласты) реагируют на сигналы от менеджеров (остеоцитов), которые способны чувствовать,

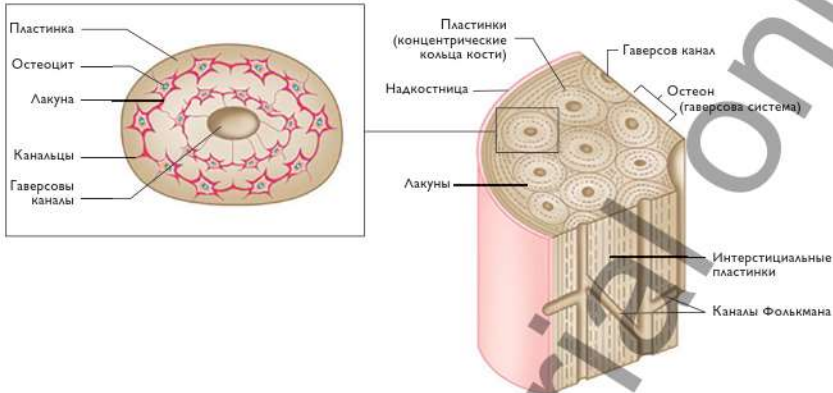


Рисунок 3.9. Схематичное изображение, показывающее основные свойства кости (Иллюстрация из Standing, 2008.)

как их локальная область реагирует на стрессовую среду, и давать соответствующие инструкции. Остеоциты чувствительны к изменениям давления и напряжения и действуют как механорецепторы кости в системе, которая еще полностью не изучена.

В то время как в других источниках доступно гораздо больше подробностей, приведенное ниже схематичное описание предназначено для того, чтобы дать представление о взаимодействии между механикой и поведением клеток; более подробная информация доступна в других источниках. Вкратце основная идея звучит следующим образом: при правильной питательной среде кость должна быть способна самостоятельно оптимизировать свою форму в ответ на окружающую ее механическую среду. Таким образом, если хотите, вы можете пропустить этот раздел, но в этом случае вы упустите множество интересных вещей и небольшое повторение базовой анатомии костей.

Физические свойства кости создаются балансом между податливостью коллагена и стабильностью кристаллических элементов. Эти материалы выделяются остеобластами, расположенными на поверхности кости, под надкостницей (фиброзная выстилка кости, ее поверхность контакта с сократительными тканями) (см. рис. 3.9). Остеобласты часто находятся в состоянии покоя как «клетки,

выстилающие кость», пока их не «вызовут» изменения нагрузки (Currey, 2002). Получив стимуляцию к действию, остеобласты начинают производить материалы, включая тропоколлаген — одноцепочечный коллаген, и остеоид — исходный белок волокнистой сети для кости. Оказавшись вне остеобласта, волокна тропоколлагена соединяются вместе и образуют коллагеновые волокна типа I и некоторые волокна типа V (Standing, 2008). Эти волокна создают основу для кристаллов гидроксиапатита (кальций, который придает кости большую часть ее жесткости), которые лежат между нитями коллагена (Currey, 2013).

Коллагеновые фибриллы, особенно типа I, придают кости эластичность и гибкость, а кристаллы сульфата кальция и гидроксиапатита обеспечивают ей прочность и жесткость. Расположение и соотношение этих двух основных материалов, коллагена и кристаллов, может придать кости изменчивое и сложное расположение свойств вдоль оси «упругость — жесткость».

Этот процесс строительства контролируется балансировкой действий остеокластов и остеоцитов. Остеокласты удаляют ненужный или избыточный костный материал под руководством «чувствующих» остеоцитов. Остеокласты представляют собой полиморфные клетки (т. е. они принимают множество

форм и ролей в зависимости от потребности), которые растворяют костные минералы с помощью кислоты и разрушают сеть волокон с помощью коллагеназы (Standring, 2008). Активность остеокластов сдерживается сигналами, которые обрабатываются остеоцитами (высоко дендритными клетками, встроенными в пластинчатую кость). Этот процесс управляется в соответствии с локальными и системными потребностями в круговой петле обратной связи — сила, испытываемая костью, во многом определяет ее форму, а форма кости определяет, как она воспринимает силу.

■ РЕМОДЕЛИРОВАНИЕ КОСТИ

Существует множество теорий, объясняющих адаптивное моделирование кости остеобластами и остеокластами, и все они сосредоточены на характеристиках третьего типа костных клеток — остеоцитов (см. рис. 3.8 и 3.9). Остеоциты представляют собой перепрофилированные остеобласты, которые внедряются в зрелую кость во время процессов моделирования и ремоделирования.

В процессе ремоделирования (см. рис. 3.8) остеобласты остаются внутри «замыкающей зоны», в лакунах — пространствах в промежуточных слоях между кольцами роста гаверсовых каналов (см. рис. 3.9). Эти скрученные остеобласты перестают производить кость и образуют сложную дендритную сеть через каналцы (маленькие каналы) костного матрикса, меняя свою функцию и превращаясь в остеоциты. Остеоциты взаимодействуют друг с другом химическим и электрическим образом посредством своих дендритных ветвей и выполняют свою новую роль в мониторинге уровней питания и механических свойств кости (Currey, 2002).

Остеоциты ощущают локальные изменения напряжения или электрического тока, инициированные компрессией и растяжением, и, в свою очередь, организуют ремоделирование кости, чтобы сбалансировать напряжения, действующие через кость. Можно сказать, что остеоциты действуют как механорецепторы, расположенные в костях. Взаимосвязанное, напоминающее сетку размещение остеоцитов

внутри относительно гибкого ряда концентрических слоев дает им доступ к многочисленным источникам информации о действующих на кость силах. Информация поступает к остеоцитам через химические и электрические потоки, а также через изменения в гидромеханике, которые оказывают влияние на механическое напряжение вдоль их дендритов.

Через каналцы у остеоцитов есть пути доступа для «диффузии питательных веществ, газов и продуктов жизнедеятельности» (Standring, 2002, стр. 88), поэтому само собой разумеется, что остеоциты как передают, так и получают информацию в самых различных формах, обмениваясь ею между собой и с окружающей средой. Этот обмен включает в себя степени обмена механическими силами (включая количество, скорость и амплитуду), которые обеспечивают клеточную регуляцию посредством механохимического паттерна — системы, предложенной Ченом и Ингбером (1999).

Способность кости к саморегуляции в ответ на механические потребности хорошо документирована (Currey, 2013) и часто наблюдается клиницистами. Однако следует предположить, что такая оптимизация будет происходить лишь в отношении более типичных схем загрузки, которые и приводят к ремоделированию. Тело должно обладать определенной степенью устойчивости, слишком большая экономия на строительных материалах приведет к хрупкости. Точно так же конструкция «на все случаи жизни» была бы слишком дорогостоящей и тяжелой для перемещения. Модернизация включает в себя собственную систему обратной связи, которая помогает найти баланс между слишком большой и слишком слабой поддержкой в ответ на нагрузки.

В поддержку идеи системной оптимизации были проведены эксперименты по ремоделированию краниальной и каудальной частей лучевой кости лошадей (Batson и др., 2000). Ремоделирование выравнивало коллагеновые волокна ламеллярных слоев таким образом, чтобы они могли лучше справляться с компрессией при нагрузке на каудальный кортикальный слой. Хотя ремоделирование произошло за счет снижения прочности при растяжении, вероятность того, что эта область испытает

такое напряжение при нормальном использовании, невелика. Кость адаптировалась так, чтобы сопротивляться и выдерживать наиболее типичные нагрузки, при этом игнорируя возможность появления нетипичных нагрузок.

Похоже, у кости есть собственная команда дизайнеров, но для бесперебойной работы им необходим обмен информацией. Часть такой коммуникационной системы обеспечивается естественной архитектурой гаверсовых систем кости, которые создают области потенциальной концентрации напряжения. Канальцы, каналы Фолькмана и лакуны могут создавать слабые места (см. рис. 3.9). Вопреки ожиданиям, наличие каналов необходимо для многих других преимуществ, которые они приносят системе, — будучи помещенными в каналы, остециты обеспечивают механическую обратную связь, и им необходимо получать питание и рассекать свои отходы и сигнальные материалы. Кроме того, установлено, что угол различных каналов и ориентация лакун сводят к минимуму механическую деформацию, но только по типичным направлениям нагрузки, что позволяет экономить на расходах и весе (Currey, 2013, см. также рис. 3.7).

■ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ТЕНСЕГРИТИ

Как мы видели на рис. 3.7, кость готовится к деформациям в определенных направлениях, поэтому изменение направления силы изменит ее реакцию. Мягкие ткани также выравниваются в соответствии с расположением костей и суставов, а сеть натяжения, создаваемая сократительной тканью, помогает поддерживать и снижать уровень напряжения в костях. Любое изменение в одной системе влияет на реакцию другой, при этом реакция обеих систем может быть субоптимальной и вызывать разрушение тканей в случае воздействия неожиданных и нетипичных сил.

Однако эволюция, по-видимому, наделила нашу опорно-двигательную систему определенной степенью «антихрупкости» — способностью приспосабливаться к требованиям и использовать их для самоукрепления (Талеб,

2013). По словам Талеба, антихрупкость — это не то же самое, что устойчивость, поскольку устойчивость предполагает возвращение в исходное положение. Благодаря наличию у клеток петель обратной связи, постоянно реагирующих на изменения в нагрузке, система

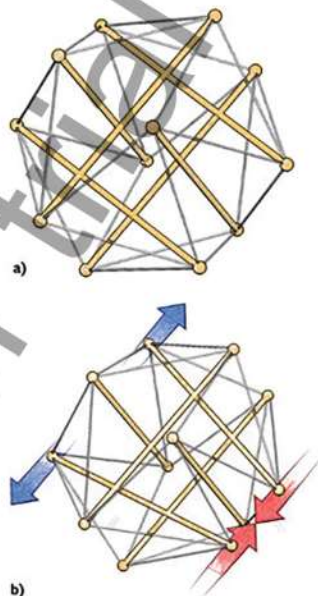


Рисунок 3.10. Тенсегрити. а) Эта упрощенная модель дает представление о более жестких элементах сжатия, подвешенных к элементам растяжения. В реальной жизни, однако, «компрессионные элементы» тела испытывают степень напряжения в пределах своего нормального уровня переносимости и сами сконструированы таким образом, чтобы подвергаться сжатию, когда окружающие сократительные ткани оптимально натянуты (см. рис. 3.6). б) Вся система тенсегрити тела реагирует на стресс, распределяя напряжение, вызывая одновременное присутствие напряжения и сжатия. Деформация кости воспринимается остеоцитами, механорецепторные остеоциты затем направляют остеобласты и остеокласты для ремоделирования кости таким образом, чтобы уравновешивать силы, так что при повторяющихся высоких нагрузках ощущается только компрессия кости. (Изображение из «Movement Integration: The Systemic Approach to Human Movement», Lundgren и Johansson, Lotus Publishing, 2019)

может адаптироваться к новым нагрузкам, действующим на организм.

Способность тела точно приспосабливаться к форме и свойствам материала в ответ на распределение деформации иллюстрирует свойственную ему тенсергити (рис. 3.10). Модель тенсергити — баланса между элементами натяжения и сжатия, передающими деформацию по всей системе, — это основной принцип организации тела. Она лежит в основе большей части работы Ингера и Чена по клеточным реакциям и объясняет, почему длинная бедренная кость при оптимальной нагрузке испытывает компрессию, а не сгибание.

Являясь самым жестким элементом тела, кость обеспечивает поддержку и рычаг для мягких тканей; однако необходимо также позаботиться о безопасности. Если бы длинные кости не могли сгибаться, они были бы хрупкими и могли сломаться при минимальной нагрузке (см. рис. 3.4). И наоборот, если они изгибаются слишком сильно, то могут оказаться слабыми при высоких нагрузках. Поэтому и сформировалась безопасная зона, в которой кость способна не только всегда поддерживать мягкие ткани, но и немного деформироваться, а напряжение и жесткость мягких тканей также помогают поддерживать и сжимать кость.

Натяжение окружающих мягких тканей препятствует изгибу бедренной кости и превращает ее в «жесткий рычаг», устойчивую опору между тазом и большеберцовой костью (как показано на рис. 3.6). Что же касается нашей текущей области интереса — стопы, — ее мягкие ткани действуют аналогичным образом в отношении ее костей, стягивая их вместе, чтобы обеспечить стабильность между суставами пальцев ноги и голеностопным суставом. К счастью, у нас есть скелетно-мышечная система, основанная на тенсергити, которая адаптируется к требованиям наших паттернов движения.

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

Возможно, в этой главе много незнакомой и сложной терминологии. Но общий вывод

прост: общая форма и положение кости изначально определяются генетическим наследием, а далее ее строение и содержание корректируются в соответствии с данными, получаемыми посредством петли обратной связи, чувствительной к изменениям нагрузки.

Или, если выражаться языком «жаргона», морфогенетическая модель адаптации кости сочетает в себе филогенетическую и онтогенетическую динамику, описывающие то, как форма кости адаптируется для выполнения своей функции.

У нас есть динамика самоорганизации, используемая для моделирования и ремоделирования кости; кроме того, существует взаимосвязь между формой кости и движением. Форма кости будет влиять на возможности движения, а нагрузка, создаваемая движением, будет влиять на форму кости. Мы видели, что квадратные кости способны выдерживать большие силы, в то время как длинные кости могут способствовать созданию большей силы, но при этом являются достаточно хрупкими при изгибе, и эта хрупкость уменьшается за счет напряжения окружающих их мышц.

Адаптация наших костей к механической среде позволяет нам производить некую интерпретацию ископаемых останков, как мы видели это в главе 2. Форма, размер и ориентация костей и их трабекул создают ископаемые артефакты, по которым можно прочесть, для чего они использовались и которые позволяют нам интерпретировать паттерны движения давно вымерших видов.

Итак, мы возвращаемся к циклу постоянной обратной связи, упомянутому в начале главы: движение — нагрузка — реакция — строительство/реконструкция — движение — напряжение — реакция... И все повторяется заново.

Тенсергити тела представляет собой самоорганизующуюся систему, которая приспосабливается к повторяющимся нагрузкам и позволяет тканям постоянно реконструировать себя, используя механорецепторные клетки, которые посылают сигналы и определяют форму кости. Мы рассмотрим то, как этот механизм работает в стопе, в главе 4.

КОСТИ СТОПЫ

Легкость нашего шага создает впечатление простого действия.

Но поскольку оно включает некоторую степень движения во всех частях нашей физической структуры, действие в целом является очень сложным.

Мортон, «Передвижение человека и форма тела».

■ ВВЕДЕНИЕ

Наш герой, Мортон, регулярно обсуждал способности стопы справляться с действием сил локомоции и силы тяжести. Как мы видели в главе 3, кость адаптируется через постоянную петлю обратной связи, при этом механорецепторные остециты управляют балансом строительства и «разрушения» остеобластами и остеокластами. Глядя на трабекулярный рисунок костей стопы на рентгеновском снимке (см. рис. 4.1), мы можем оценить непрерывность передачи силы от одной кости к другой — прекрасная

иллюстрация распределения деформации и тенсегрити в контексте.

Если мы посмотрим на общую картину, то увидим две важные особенности.

1. Трабекулярные линии имеют общий переднезадний паттерн, указывающий на сильно парасагитальный паттерн использования стопы в момент, когда мы перекатываемся с пятки на носок. Конечно, в них также присутствуют скручивания и повороты в каждом направлении, но основной вектор деформации проходит спереди назад.
2. Узор расходится веером вниз и наружу от (или вверх и внутрь) таранной кости. Таранная кость представляет собой вершину полукупола и является местом взаимодействия голени и стопы. Таким образом, таранная кость согласовывает поток силы вверх от пятки, а также от передней части стопы, с потоком сил, идущих вниз от голени.

Основываясь на представленном в конце главы 1 изображении стопы в виде полукупола, мы продолжим выстраивать подробную картину стопы как структуры, которая может быть достаточно подвижной, чтобы способствовать

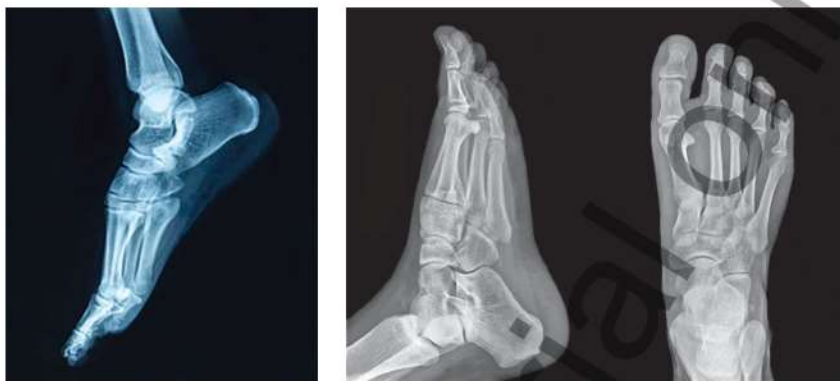


Рисунок 4.1. В предыдущей главе мы рассмотрели, как сила формирует отдельные кости. Эта серия рентгеновских снимков иллюстрирует непрерывность силовой передачи от одной кости к соседним, что говорит о том, что они действуют как одна функциональная единица.

пронации, и в то же время обеспечивает «жесткий рычаг» для двух точек повышенного напряжения — при касании пяткой и сжатии с пальцев стопы (см. рис. 1.7).

но на данный момент это лучший описательный язык, который у нас есть, и в большинстве случаев он прекрасно работает.

Те, кто занимается изучением тенсегрити, приводят сильный аргумент, что «в теле нет такого понятия, как рычаг». И это верно: механических рычагов в биологических структурах действительно не существует. Однако я считаю, что мы можем использовать принципы рычага, чтобы понять многие — хотя и не все — взаимодействия между костями и суставами во время движения в обычной жизни. Например, развитие более длинных нижних конечностей сделало локомоцию более экономичной благодаря тому, что наши длинные бедренная и большеберцовая кости позволяют нам «перепрыгивать» через опорную ногу, что удлиняет наш шаг. Аналогичным образом, как при попытке открыть коробку, наличие более длинного инструмента для работы может обеспечить механическое преимущество, обычно называемое «рычагом».

Как только появится лучший, более точный словарь терминов, я с радостью им воспользуюсь,

Можно легко заметить, что бедренная кость представляет собой жесткую кость между двумя относительно ограниченными суставами (коленным и тазобедренным). Гораздо сложнее разоб- рать подобным образом целую совокупность костей причудливой формы с многочисленными окружающими их тканями и суставами, которую мы называем стопой. Тем не менее принципы, действующие для тканей стопы, те же, что и для тканей бедра, поскольку положения с высоким уровнем нагрузки также вызывают высокий уровень деформации и напряжения тканей. Как мы видели в главе 3, бедренная кость обладает некоторой присущей ей жесткостью, но в хитром взаимодействии между формой и силой именно напряжение окружающих мягких тканей обеспечивает жесткость кости. Чтобы понять, как и почему это происходит в стопе, нам в первую очередь необходимо разобраться с формой и функцией кости.

Чтобы получить представление об адаптивности стопы, встаньте, удобно расположив

стопы под тазобедренными суставами, и поверните голову вправо, чтобы посмотреть через правое плечо, — повернитесь настолько далеко, насколько сможете, позволяя туловищу и тазу следовать за вашим взглядом, но сохраняйте при этом стопы на месте. Сделайте паузу в конце комфортного для вас диапазона движения и почувствуйте реакцию своих стоп. Если вы позволите движению пройти через таз, в вашей левой стопе произойдет пронация, а в правой — супинация. Эта способность замыкаться (пронировать) и замыкаться (супинировать) обусловлена костной структурой стопы и голеностопного сустава. Понимание формы и взаимодействия костей поможет нам понять, как и почему стопа реагирует именно таким образом, и мы вернемся к этому упражнению в конце главы, чтобы показать, чем же эта реакция настолько универсальна.

■ СТОПА В ЦЕЛОМ И ПО ЧАСТЯМ

26 костей стопы имеют самые разнообразные формы и размеры, а также не менее запутанные названия, которые сложно произносить и выговаривать по буквам. Как и в случае с большей частью (конечно, не со всей!) анатомии, за каждым из этих названий скрывается определенная логика, но лишь в том случае, если вы хорошо знаете греческий и латинский языки.

Есть несколько способов того, как можно осваивать стопу. Один — по группам костей — предплюсневым, плюсневым и фалангам, — и они приводят нас к греческому и латинскому языкам. Как и многие носители английского языка, я испытываю сложности с другими языками, но как только я начал понимать значение этих странных многосложных терминов, я понял, что они весьма уместны и даже облегчают жизнь. Другой способ разделить стопу — по областям: задний отдел стопы (пяточная и таранная кости), средний отдел стопы (клиновидная, ладьевидная и кубовидная кости) и передний отдел стопы (плюсневые кости и фаланги). Поэтому я рекомендую вам дать себе некоторое время, чтобы каждый термин стал для вас привычным. Многие суставы названы в соответствии со связанными

с ними костями, и знание названий групп костей, а также отдельных костей помогает перейти от костей и суставов к связкам.

Обязательно потратьте немного времени на то, чтобы понять логику этой системы прямо сейчас, поскольку это поможет легче понимать остальную анатомию по мере нашего продвижения вперед. Я часто обнаруживал, что одна из основных причин, по которой люди теряются в анатомии, заключается в том, что они не начали с освоения основных составных элементов словарного запаса.

■ КОСТИ ПРЕДПЛЮСНЫ, ПЛЮСНЕВЫЕ КОСТИ И ФАЛАНГИ

Кости предплюсны представляют собой группу из семи костей: таранной, пяточной, трех клиновидных, ладьевидной и кубовидной. Предплюсна — tarsal — в переводе с греческого означает «плетеная корзина». Посмотрите на рентгеновские снимки и представьте трабекулы в виде замысловатого переплетения корзины. Если вы повернете книгу так, что подошва окажется направленной вверх, вы сможете (приложив немного воображения) увидеть внутреннюю часть полукупола как внутреннюю часть корзины.

Как мы увидим позже, эта область действительно может действовать как плетеная корзина, которая то натягивает, то ослабляет плетение в зависимости от нагрузки и направления ее действия. Таким образом, корзина является полезным образом для понимания пронации и супинации. Представьте, что мягкие ткани и кости — это материал корзины, и они растягиваются и деформируются по мере того, как отверстия в корзине открываются, — пронация. Скрутите корзину в другом направлении — и отверстия закроются; плотно стянутая корзина — аналог супинации и положения жесткого рычага. При условии, что плетение остается безупречным, корзина ни при каких обстоятельствах не теряет свою целостность. Независимо от того, расширено или стянуто ее плетение, корзина сохраняет свою прочность.

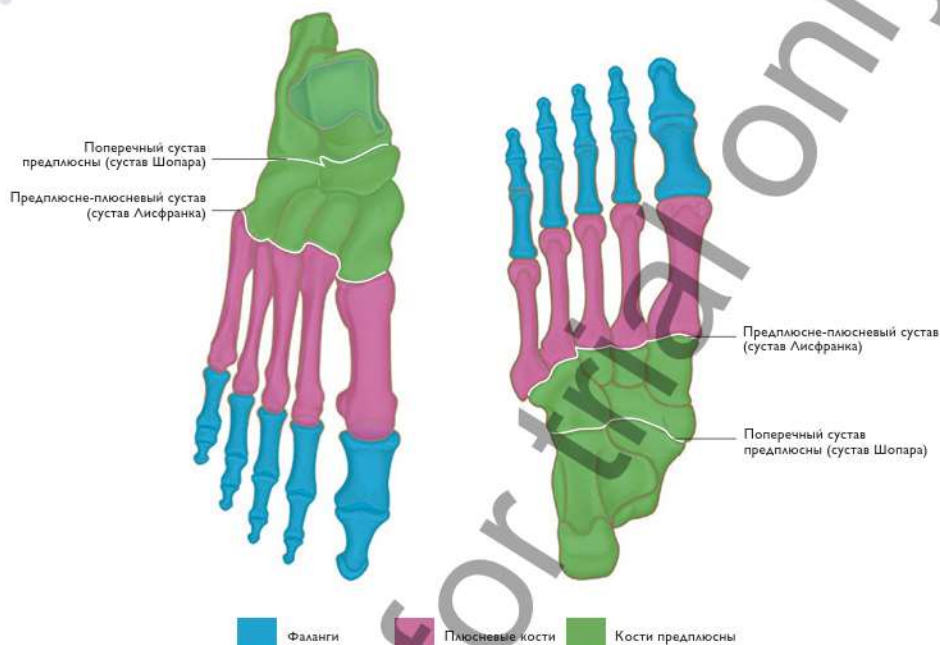


Рисунок 4.2. Отделы стопы. Кости предплюсны образуют задний (пяточная кость и таранная кость) и средний (клиновидные, кубовидная и ладьевидная кости) отделы стопы. Передний отдел стопы состоит из плюсневых костей и фаланг. Два важных сустава, пересекающих стопу, — это поперечный сустав предплюсны (или «сустав середины предплюсны», или сустав Шопара) и предплюсне-плюсневый сустав (или сустав Лисфранка). Поскольку они включают в себя несколько костей, их называют сложными суставами.

Кости предплюсны образуют задний и средний отделы стопы, а плюсневые кости составляют большую часть переднего отдела стопы. Если вы имели преимущество классического образования, то, вероятно, вам уже знакомо, что приставка «мета» означает просто «за пределами» (подумайте о физике и метафизике — «метафизический» означает «не поддающийся объяснению физикой»). Передний отдел стопы состоит из множества длинных прямых костей, сначала из пяти плюсневых костей, а затем из 14 фаланг пальцев.

В общих чертах, длинные кости обеспечивают рычаги, а короткие — адаптивность. Подумайте, например, о бедренной

и большеберцовой костях — их длина обеспечивает значительную двигательную эффективность, а коленный сустав — значительный рычаг. Но за рычаг приходится платить, поскольку чем длиннее рычаг, тем больше силы требуется для его стабилизации и контроля. Относительные пропорции стопы человека обеспечивают эффективный рычаг, но этот длинный рычаг должен быть устойчивым. Стабильность частично обеспечивается уникальным, похожим на плетение корзины строением костей предплюсны, которые скручиваются и замыкаются, образуя жесткий рычаг, а затем раскручиваются, чтобы расправиться, тем самым позволяя мягким тканям деформироваться при амортизации удара.

В стопе человека есть две линии сложных суставов* — предплюсне-плюсневый сустав и поперечный сустав предплюсны (рис. 4.2), которые облегчают стопе выполнение некоторых из ее уникальных функций. Дистальная линия сустава, проходящая поперек стопы, представляет собой взаимодействие между предплюсневыми и плюсневыми костями и имеет мягкое название «предплюсне-плюсневый сустав». Линия предплюсне-плюсневового сустава напоминает карту побережья с грубыми очертаниями заливов и выступов. Такое неровное расположение сцепленных костей обеспечивает некоторую естественную стабильность линии сустава, помогая предотвратить ее сдвиг.

Более проксимальный поперечный сустав предплюсны также широко известен как «сустав середины предплюсны», поскольку он находится примерно в середине предплюсны. Как при взгляде сверху, так и при взгляде снизу эта линия демонстрирует элегантные изгибы; однако эта кривая создает потенциальную нестабильность, которую необходимо стабилизировать с помощью замыкающего механизма между пяточной и кубовидной костями (рис. 4.3). Поперечный сустав предплюсны также известен как сустав Шопара. Шопар был французским хирургом, который выбрал эту линию из-за простоты ампутации.

Предплюсне-плюсневый сустав, также известный как сустав Лисфранка (еще один французский хирург), страдает от того, что располагается у основания череды длинных костей. По аналогии с тем, как коленный сустав обычно страдает от травм из-за своего расположения между длинными костями, страдает и предплюсне-плюсневый сустав/сустав Лисфранка. Хотя травмы предплюсне-плюсневового сустава встречаются реже, чем в случае с коленом, его можно вывихнуть в результате падений и несчастных случаев.

Разобраться в греческих и латинских анатомических терминах достаточно сложно, и как только хирурги начинают называть вещи своими именами, мы действительно можем начать теряться, особенно если референты не могут решить, какую традицию наименований они хотят использовать. До недавнего времени я вполне мог начать искать такие новые для меня структуры, как сустав Шопара или Лисфранка (например), поскольку источники не давали никакого намека на то, что существуют альтернативные названия. По возможности в этом тексте я буду придерживаться анатомической терминологии,

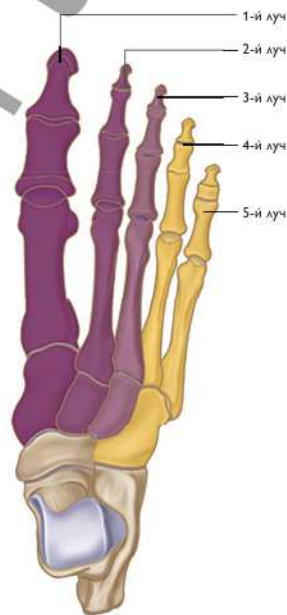


Рисунок 4.3. Стопу от медиального до латерального края также можно разделить на серию «лучей» или линий, которые пронумерованы в соответствии с пальцами стопы (от одного до пяти). Некоторые источники также любят выделять медиальную группу, включающую в себя лучи с первого по третий, выровненные с таранной костью, и четвертый и пятый лучи, выровненные с пяточной костью.

* Сложный сустав — это «сустав», состоящий из множества суставов. Я знаю, мне тоже это было непонятно, когда я впервые прочитал об этом. Но постепенно это будет становиться понятнее.

а не пытаться тешить мертвое эго. Вышедшие на пенсию французские хирурги упомянуты здесь исключительно для того, чтобы помочь вам избежать тех моментов замешательства, которые испытываю я сам.

Если мы посмотрим на группы костей в стопе — кости предплюсны, плюсневые кости и фаланги, а затем на суставы, которые мы разобрали к этому моменту, — поперечный сустав предплюсны и предплюсне-плюсневый суставы, — то станет понятно, что следующей областью взаимодействия является линия плюснефаланговых суставов. Эта линия суставов образует «подушечки стопы» (одна из областей, через которую происходит перекат стопы).

Наша последняя линия костей, фаланги, названа так потому, что они относительно длинные и прямые, как группа греческих солдат, марширующих в бой. Каждая стопа имеет 14 фаланг — по две на большом пальце и по три на остальных пальцах. Таким образом, суставы между ними являются межфаланговыми суставами, а поскольку в меньших пальцах стопы по три кости, у них есть проксимальный межфаланговый и дистальный межфаланговый суставы.

■ ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ДЕЛЕНИЕ

Следуя традиции называть одни и те же части по-разному, мы можем разделить стопу на функциональные единицы. Мы можем рассматривать стопу как две функциональные половины: медиальную часть составляют таранная, ладьевидная, клиновидные кости, а также плюсневые кости с первой по третью, а латеральную часть — пяточная и кубовидная кости и четвертая и пятая плюсневые кости (рис. 4.3).

Как мы увидим позже, деление стопы на медиальную и латеральную части соответствует той роли, которую играет каждая из этих частей во время переноса веса над стопой, а также функций каждой «половины» во время стояния и передвижения. Хотя мне не нравится делить стопу таким образом, поскольку я предпочитаю полноценное изображение

полукупола, медиально-латеральное деление может быть полезно для получения функционального представления о стопе.

В качестве другой распространенной терминологии для обозначения областей стопы используется понятие «луч», например, в случае типичного диагноза гипер- или гипомобильности первого луча. Луч — это просто линия костей: линия от каждой дистальной фаланги до плюсневой кости составляет один луч. Лучи названы по номерам (пронумерованы), начиная от медиального к латеральному, т. е. большой палец ноги соответствует первому лучу, а мизинец — пятому лучу (см. рис. 4.3).

■ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С НОГОЙ

Стопу имеет смысл рассматривать только во взаимодействии с остальной анатомией нашего тела, особенно если речь идет о движении, а понимание цикла походки помогает составить представление о взаимодействии между стопой и ногой. Важно помнить, что анатомическое деление весьма произвольно: вся структура работает как единая система, которая ищет и находит самое необходимое для жизни — воду, калории, безопасность и секс. Как мы уже видели в главе 2, в истории становления прямохождения *Homo sapiens* нередко подчеркивается адаптация стопы, однако изменения стопы были неотъемлемой частью изменений всей нашей анатомии в целом.

В главе 2 мы рассматривали взаимосвязь между скручиванием большеберцовой кости, выравниванием стопы и приведением большого пальца стопы. Скручивание внутри стопы обеспечивает формирование полукупола — подвижной амортизирующей системы, которая передает усилие вверх к остальным частям тела. «Завал» стопы в пронацию корректируется супинацией обратно в «жесткий рычаг», помогающий контролировать силы, действующие при сходе с пальцев. Большая часть этой коррекции в стопе происходит за счет движения остального тела, которое передается через кости ноги (голень и малоберцовая кость) в таранную кость (рис. 4.4). Таким образом, комплекс голеностопного сустава (соотношение



Рисунок 4.4. Центр тяжести таранной кости (выделен розовым цветом) располагается немного медиальнее центра тяжести пяточной кости. Таранная кость лежит на выступающем бугре пяточной кости, называемом опорой таранной кости (*sustentaculum tali*). Этот костный выступ поддерживается снизу сухожилием длинного сгибателя большого пальца стопы. Следует также отметить, что лодыжки костей голени как бы «обхватывают» таранную кость.

между большеберцовой, малоберцовой, таранной и пяточной костями) играет важную роль в определении направления и выравнивания стопы.

Комплекс голеностопного сустава образован тремя суставами: нижним межберцовым суставом, голеностопным суставом и подтаранным суставом. В первые два сустава вовлечены три кости: большеберцовая и малоберцовая кости составляют нижний межберцовый сустав, а большеберцовая, малоберцовая и таранная кости — голеностопный сустав. Подтаранный сустав обеспечивает взаимодействие между пяточной и таранной костями.

Хотя поначалу вся эта терминология может показаться крайне сложной, ее можно разбить на более понятные части. Как упоминалось выше, многие суставы названы по названиям участвующих в них костей, например, большеберцовый сустав. То же самое относится и к голеностопному суставу: нам просто нужно знать, что голень — это часть нижней конечности между коленом и лодыжкой. Голень — это сокращение, в данном случае,

для обозначения большеберцовой и малоберцовой костей. Таким образом, голеностопный сустав — это просто сокращение от таранно-большеберцово-малоберцового сустава. Подтаранный сустав будет рассмотрен позже в этой главе, так как он описывает взаимодействие между таранной костью и костями под ней.

Таранная кость (от латинского *talus* — «лодыжка») расположена непосредственно под прочной треугольной и предназначенной для весовой нагрузки большеберцовой костью (рис. 4.4). Обе кости голени, большеберцовая и малоберцовая, имеют костные выступы, известные как лодыжки (лат. *malleoli* — «молоточки»), которые обхватывают таранную кость с обеих сторон. Вершина таранной кости, также известная как купол или блок (греч. *trochlea* — «шкив») таранной кости, образует область второго из четырех перекатов стопы (см. рис. 1.7 и 4.5). Купол таранной кости (или блок) принимает на себя вес, нисходящий от большеберцовой кости, а расположение трех костей подразумевает, что голеностопный сустав обеспечивает тыльное сгибание и подошвенное сгибание (см. рис. 4.6).

Такое костное расположение создает соединение по принципу «шип в гнездо» — столлярный термин, обозначающий конструкцию, когда один кусок дерева вставляется между двумя выступами без использования клея. Соединив таким образом вместе два куска дерева, можно получить очень прочное соединение по всем осям, кроме плоскости, по которой выровнены соединения: стабильность в этой плоскости обеспечивается плотностью посадки — определяющей характеристикой мастерства плотника. Нам не нужна та же степень конгруэнтности в голеностопном суставе, поскольку он даже выигрывает от небольшой подвижности, но, как всегда, в теле необходим баланс между подвижностью и стабильностью.

Угол, создаваемый обхватывающими таранную кость лодыжками, допускает движение преимущественно в сагиттальной плоскости. По этой оси большеберцовая и малоберцовая кости двигаются вместе над таранной костью (см. рис. 4.6b), или же таранная кость и остальная часть стопы двигаются под костями голени

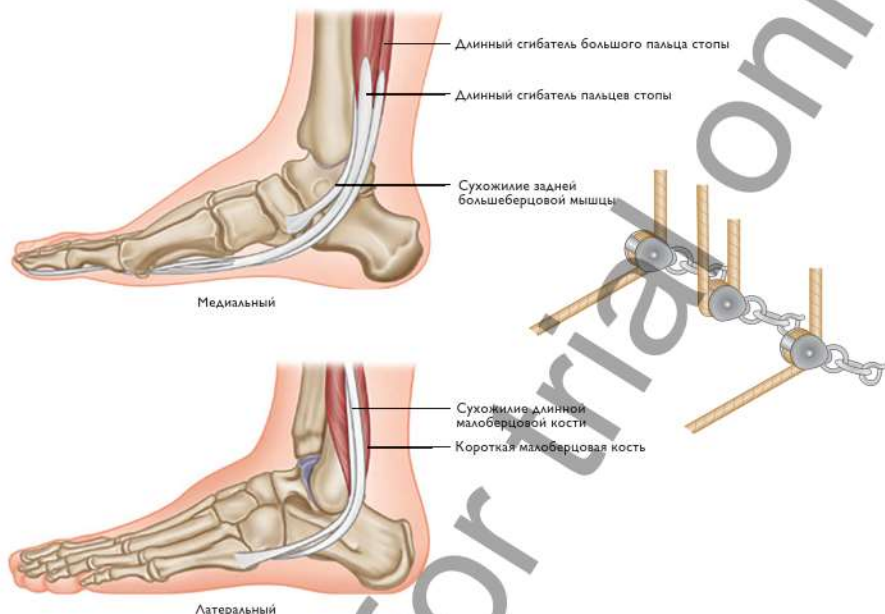


Рисунок 4.5. Блок (купол) таранной кости переводится с греческого языка как «шкив», а весь голеностопный комплекс можно рассматривать как шкивную систему. Korga голеностопный сустав переходит в тыльное сгибание, сухожилия, проходящие вокруг костей, натягиваются и помогают стабилизировать стопу.

(см. рис. 4.6с). Блок таранной кости обеспечивает гладкую округлую поверхность для этого действия. Блок действует подобно бороздке в шкиве, облегчая движение проходящих вокруг него тросов, — и это в точности соответствует переводу этого термина с греческого языка.

Купол (вертел) таранной кости широкий спереди и узкий сзади (см. рис. 4.6а). Независимо от того, происходит ли движение в открытой или в закрытой цепи, когда голеностопный сустав находится в относительном тыльном сгибании, взаимодействие происходит на более широкой передней части таранной кости. Чтобы соответствовать такому дополнительному расширению, большеберцовая и малоберцовая кости должны немного сместиться (см. рис. 4.11).

Большеберцовая и малоберцовая кости удерживаются вместе фиброзным слоем между

двумя костями (рис. 4.7), и волокна этой межкостной мембраны упорядочены вдоль общих линий растяжения. В верхней части мембраны наблюдается перекрестное расположение волокон: они идут сверху в латеральном направлении от большеберцовой кости и сверху в медиальном направлении от малоберцовой кости. Это контрастирует с тем, что происходит в области нижних двух третей: волокна проходят вниз и наружу от большеберцовой кости к малоберцовой кости. Такой перекрестный паттерн помогает стабилизировать проксимальную часть от чрезмерного смещения вверх или вниз, фиксируя проксимальную малоберцовую кость в обоих направлениях и защищая проксимальный сустав. Тем не менее в дистальном направлении направленность волокон вниз и наружу позволяет малоберцовой кости двигаться немного вверх и в сторону от большеберцовой кости, чтобы принять блок

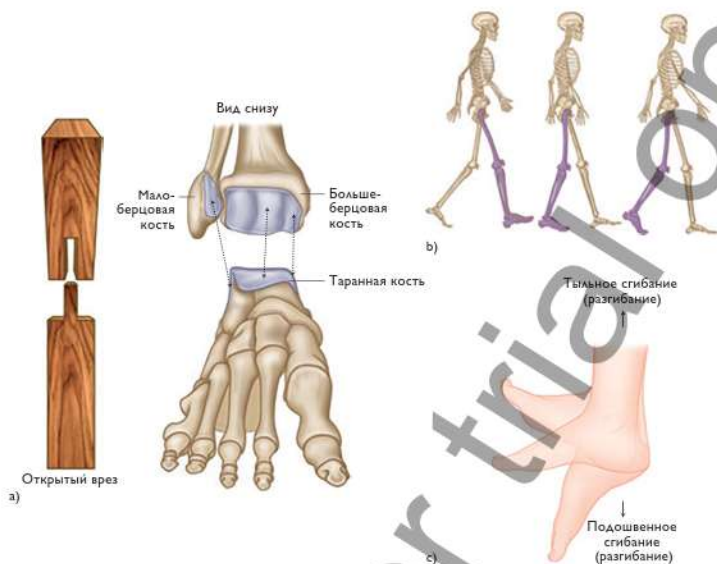


Рисунок 4.6. Медиальная и латеральная лодыжки, обхватывающие таранную кость, образуют в голеностопном суставе соединение по принципу «шипа и гнезда» (а). Строение сустава способствует тыльному и подошвенному сгибанию, но ограничивает ротацию. Во время фазы опоры при ходьбе большеберцовая и малоберцовая кости перемещаются над стопой в закрытой цепи (b). При движении в открытой цепи стопа двигается под ногой (c).

таранной кости, когда сустав переходит в тыльное сгибание.

ФОРМА КОСТЕЙ И ФУНКЦИЯ МЫШЦ

Чтобы лучше понять взаимосвязь между формой и функцией, мы можем сравнить положение, роль и форму двух самых длинных костей тела — большеберцовой кости и бедренной кости (см. рис. 4.8). Тело бедренной кости, имеющее каплевидную форму, наклонено внутрь от таза к колену и имеет переднезадний изгиб по всей своей длине. Напротив, большеберцовая кость расположена относительно вертикально, имеет треугольную форму с толстым слоем кортикального слоя кости. Длинное тело бедренной кости окружено сильными мышцами, которые контролируют силы в колене и бедре. Хотя голень также обладает большой силой, большеберцовая кость не окружена мышцами; соответствующие мышцы в основном расположены кзади от кости.

Вполне вероятно, что контраст между положением и формой этих двух костей подчеркивает их разные роли, хотя этот момент не был полностью исследован и изучен. Поскольку тело бедренной кости полностью окружено мышцами, напряжение, создаваемое сокращением мышц, поддерживает кость и препятствует изгибу при высоких нагрузках (см. рис. 3.6). Большеберцовая кость не получает такой поддержки из-за отсутствия мышц на ее передне-медиальной стороне, и должна укрепляться дополнительной кортикальной костью; она также усиливается двумя относительно плоскими суставными поверхностями.

Большеберцовая кость довольно плотно прилегает к таранной кости, а верхняя суставная поверхность большеберцовой кости обеспечивает искусное взаимодействие с мышелками бедренной кости. Располагаясь между относительно плоскими суставными поверхностями, толстая треугольная большеберцовая кость получает ограниченный диапазон вполне предсказуемых

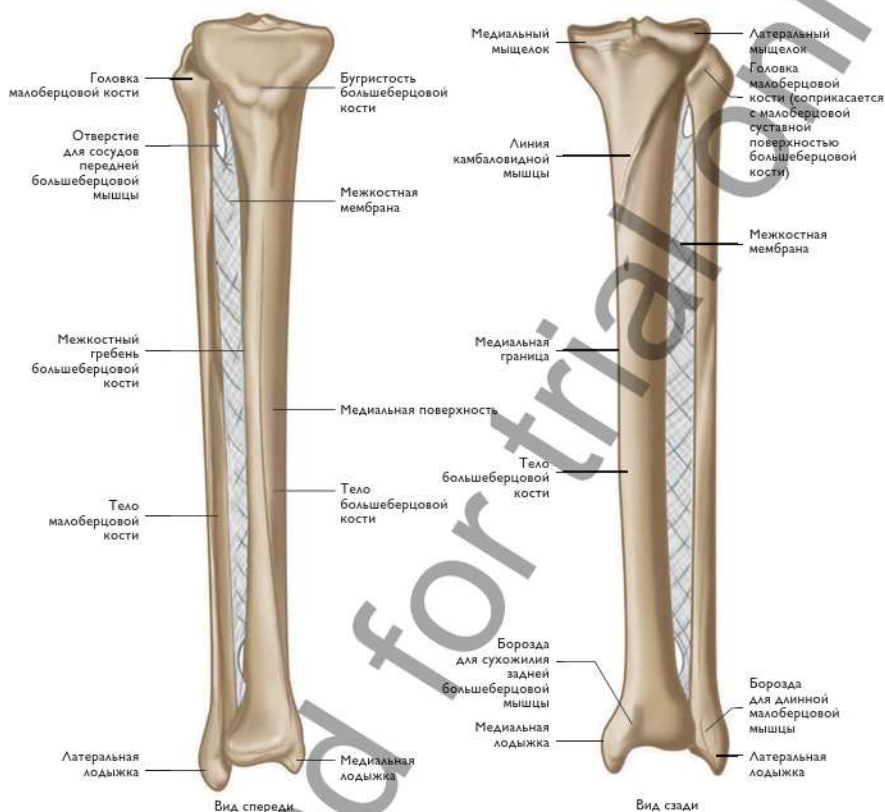


Рисунок 4.7. Синдесмоз большеберцовой и малоберцовой костей.

сил во время обычного движения. Однако шаровидный тазобедренный сустав позволяет бедренной кости двигаться в большом диапазоне во всех трех измерениях, значительную часть которого мы используем в нашей повседневной жизни. Как мы видели на рис. 3.6, бедренная кость окружена сократительной напряженной тканью, которая обеспечивает ей поддержку, позволяя при этом оставаться легкой. Подобное решение не требуется или невозможно для большеберцовой кости.

Движение большеберцовой кости на обоих концах ограничивается суставами. Лодыжки и купол таранной кости в голеностопном

суставе ограничивают большеберцовую кость преимущественно сагиттальной плоскостью движения. Надколенник в коленном суставе препятствует тому, чтобы коленный сустав выполнил разгибание далеко за пределы нейтрального положения. Поскольку движение в коленном суставе фактически ограничивается только сгибанием (в нем доступны лишь несколько градусов ротации и разгибания, но это очень мало по сравнению с диапазоном сгибания), то в ответ на сгибание коленного сустава большеберцовая кость продвигается вперед, создавая тыльное сгибание в голеностопном суставе. Расположение

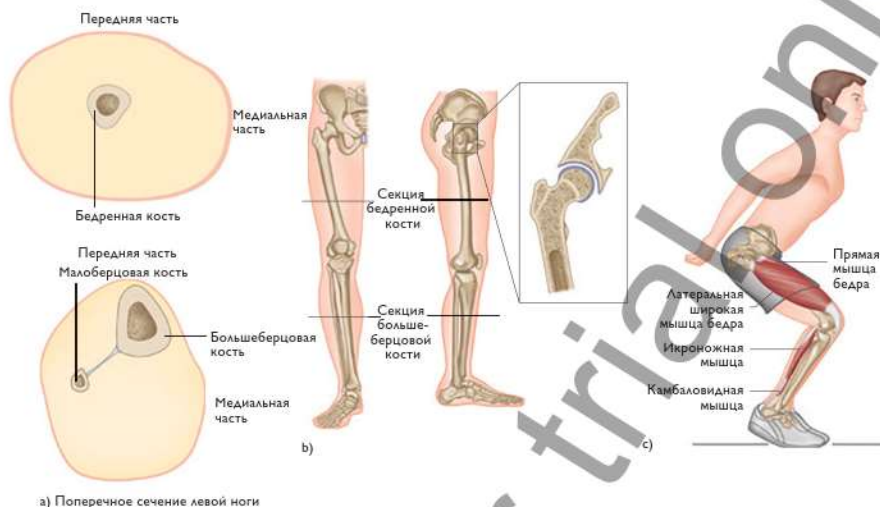


Рисунок 4.8. а) Бедренная кость имеет узкую каплевидную форму в середине диафиза, в отличие от более массивной большеберцовой кости, которая также имеет толстый слой прочной кортикальной кости (см. также рис. 4.9). Бедренная кость окружена сократительной тканью; у большеберцовой кости мягкие ткани располагаются преимущественно позади. б) Большеберцовая кость имеет две плоские поверхности, которые соприкасаются с относительно ограниченными суставами на обоих концах, а бедренная кость имеет шаровидный сустав с тазом, обеспечивающий большой диапазон движения. Таким образом, в отличие от бедренной кости, вертикально расположенная большеберцовая кость получает более предсказуемые силы. в) Надколенник препятствует переходу колена в разгибание. Это ограничение чаще всего вызывает тыльное сгибание в голеностопном суставе. В результате мышцы вокруг большеберцовой кости смещены в сторону замедления тыльного сгибания и, следовательно, преимущественно располагаются позади треугольной кости (см. также рис. 3.5).

суставов определяет их реакцию, а окружающие их мягкие ткани развиваются для замедления высоких и быстрых сил торможения (рис. 4.8с). Сочетание этих особенностей — положение костей и реакции соседних суставов — объясняет, почему большеберцовая кость меняет форму в процессе развития от относительно круглого поперечного сечения до треугольного поперечного сечения, указывая на то, что она укрепляется вдоль своей передней/задней оси (рис. 4.9, Gosman и др., 2013).

В отличие от вертикальной и прочной большеберцовой кости, малоберцовая кость человека не несет на себе вес тела и является более подвижной из двух костей голени (рис. 4.10 и 4.11). Малоберцовая кость человека отличается от малоберцовой кости шимпанзе, на которую приходится некоторый вес тела

и которая имеет соединение с таранной костью (рис. 4.10 и 4.15). Ноги шимпанзе искривлены, и им требуется более широкий диапазон движений, чтобы справиться с рельефом. Наши стопы и ноги адаптировались для того, чтобы свести к минимуму метаболические затраты на передвижение и поддержание вертикального положения; этому также способствовало преобразование конструкции большеберцовой кости в относительно вертикальную опору. Чтобы компенсировать «Q»-угол наклона бедренной кости внутрь от бедра к колену, в комплексе таза и бедра произошел целый ряд адаптаций мягких тканей, — в том числе подвздошно-большеберцового тракта и связанной с ним широкой фасции, — для распределения механических сил (Cowgill и др., 2010; более подробную информацию можно найти в книге «Рожденный ходить», 2020).

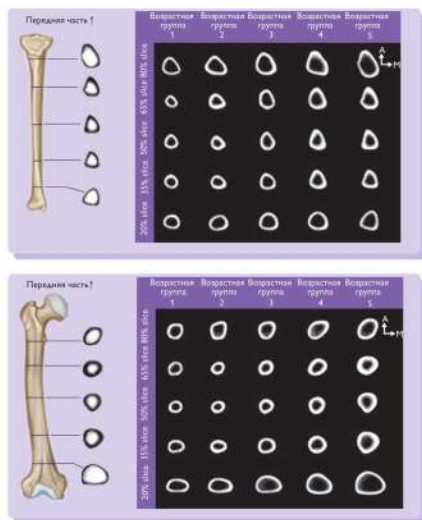


Рисунок 4.9 В своем исследовании Госман и соавт. (2013) сравнили форму поперечного сечения нескольких областей бедренной и большеберцовой костей для разных возрастных диапазонов. Были взяты поперечные срезы на уровне 20%, 35%, 50%, 65% и 80% длины каждой кости. На каждом участке видно нарастание асимметрии в ходе онтогенеза (развития) в ответ на воздействие внешней среды. Используемые возрастные группы: 0–1,9 года; 2–4,9 года; 5–8,9 лет; 9–13,9 лет; и 14–18 лет. (Займствовано у Gosman и др., 2013.)

Дистальный отдел большеберцовой кости лежит на вершине таранной кости, которая расширяется сзади вперед, что требует раскрытия сустава для того, чтобы принять переднюю

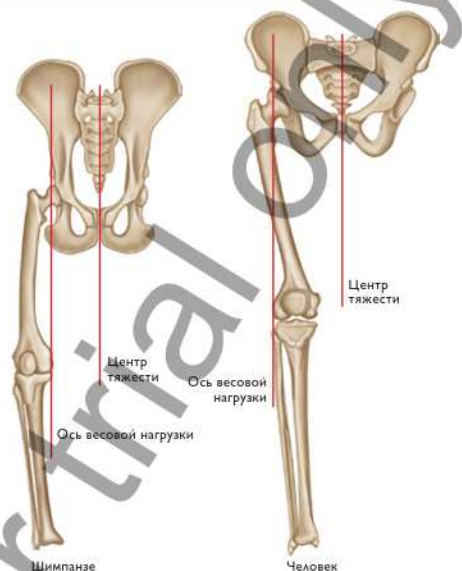
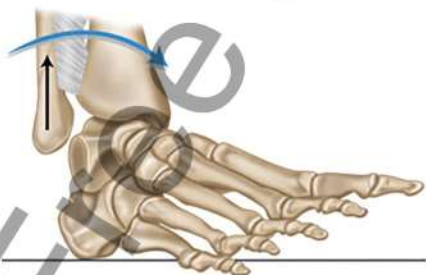


Рисунок 4.10. Несколько особенностей нижней конечности шимпанзе не позволяют ему быть эффективным двуногим. К ним относятся о-образные ноги и имеющие латеральный наклон большеберцовые кости, в отличие от вертикально расположенной большеберцовой кости человека. Угол «Q», образованный наклоном внутрь бедренной кости человека, требует повышенной мобильности и стабильности в тазобедренном комплексе, чему частично способствует расположение отводящих мышц бедра.

часть таранной кости при тыльном сгибании голеностопного сустава (рис. 4.11). Такое расширение сустава для приема более широкой части таранной кости натягивает мягкие ткани вокруг сустава (суставную капсулу, связки и межкостную мембрану) и создает «уплотнение» сустава. «Уплотненный» сустав обеспечивает устойчивое положение для обеспечения больших усилий,

Рисунок 4.11. По сравнению с нейтральным положением, при тыльном сгибании голеностопного сустава более широкая часть таранной кости толкает лодыжку малоберцовой кости вверх и латерально. Это действие обеспечивает дополнительное пространство для таранной кости и натягивает поддерживающие ткани. (Соотношения и изменения были преувеличены для более наглядного визуального представления.)

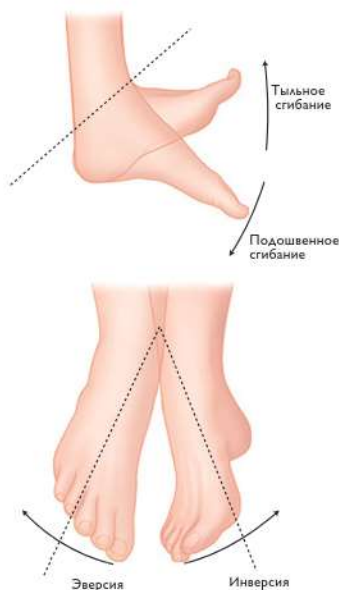


Рисунок 4.12. Устройство голеностопного сустава по принципу «вреза и шипа» обеспечивает 20–30° тыльного сгибания и 40–50° подошвенного сгибания. Инверсия и эверсия в основном происходят в подтаранном суставе, диапазон инверсии составляет 20–30°, а эверсии — 10–20°.

что является одним из объяснений того, почему спринт следует начинать из положения тыльного сгибания. Расширение сустава, которое происходит во время тыльного сгибания, можно пальпировать — как при самопальпации, так и при оценке со стороны. Легко коснитесь пальцами обеих лодыжек; мягкое движение малоберцовой кости можно пальпировать, когда голеностопный сустав приближается к концу диапазона тыльного сгибания.

В то время как расположение костей способствует тыльному и подошвенному сгибанию, выступающие лодыжки ограничивают ротацию в голеностопном суставе (см. рис. 4.8). Это «ограничение» не является отрицательным признаком, так как облегчает сопряженность ротационных движений от голени к таранной кости и от таранной кости к голени. Мы изучим влияние такой сопряженности

в ротации по мере чтения остальной части текста, но это сопряженное взаимодействие можно легко ощутить, если встать и повернуться вправо (как мы делали это в начале данной главы). Ротация вызывает предсказуемую реакцию: ваша левая стопа должна уйти в пронацию, а правая — в супинацию.

Как мы видели в главе 2, когда исследовали торсию большеберцовой кости, латеральная ротация скручивает стопу вверх в супинированный полукупол, а медиальная ротация приводит к пронации — реакция стопы в основном определяется направлением вращения костей голени. Ротация в нижней конечности и пронация/супинация «сопряжены» из-за обхвата лодыжками таранной кости: если одна кость в этом трио (большеберцовая, малоберцовая и таранная кость) выполняет ротацию, то и остальные последуют за ней. Движение трех костей голеностопного сустава происходит сопряженно при ротации в горизонтальной плоскости из-за строения по принципу «гнезда и шипа», но из-за расположения сустава они не связаны в сагиттальной плоскости. Во время тыльного и подошвенного сгибания кости голени и таранная кость могут двигаться относительно независимо в среднем диапазоне. Можно сказать, что таранная кость представляет собой кость голени при ротации, и кость стопы — при тыльном сгибании и подошвенном сгибании.

Как мы видели выше, большеберцовая кость является прочной несущей костью, в то время как малоберцовая кость, не несущая вес, располагается сбоку от нее. Сильная четырехглавая мышца бедра и подвздошно-большеберцовый тракт прикрепляются к верхней части большеберцовой кости. Эти и многие другие мышцы вокруг коленного комплекса помогают обеспечить поддержку и стабильность этой области. Напротив, единственная поддержка малоберцовой кости сверху обеспечивается двуглавой мышцей бедра (рис. 4.13). Малоберцовая кость обеспечивает места прикрепления для восьми мышц, спускающихся к стопе, что привело бы к стягиванию малоберцовой кости вниз, если бы не угол волокон межкостной мембраны и направленное вверх натяжение со стороны двуглавой мышцы бедра.

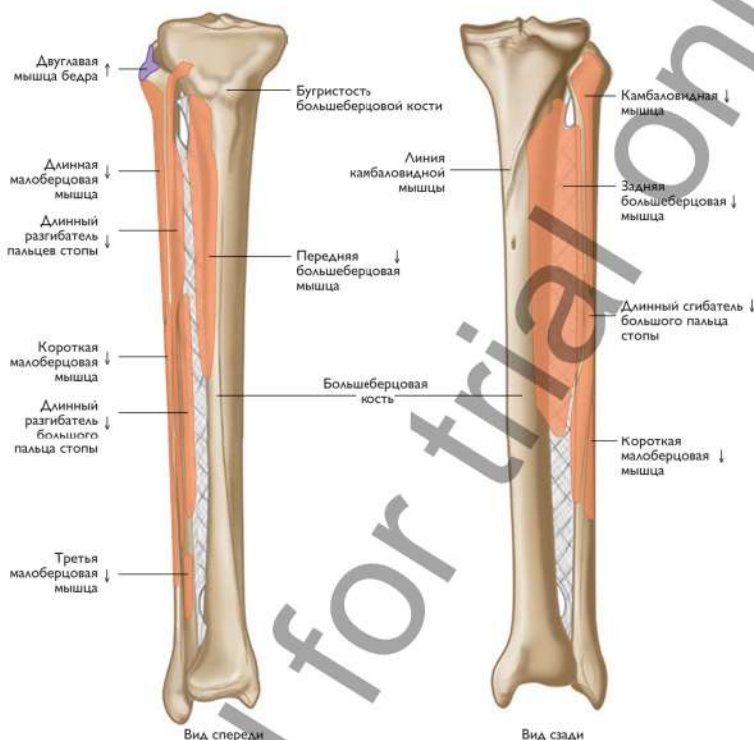


Рисунок 4.13. Прикрепления мышц на большеберцовой и малоберцовой костях. Несмотря на то, что малоберцовая кость более тонкая и не несет весовой нагрузки, она имеет девять мест прикрепления мышц, и только одна из них, двуглавая мышца бедра, тянет кость вверх.

Только приматы и хищники (например, кошки и медведи) имеют отдельные большеберцовую и малоберцовую кости с «отдачей» в области голеностопного сустава. Небольшое движение между двумя костями обеспечивает дополнительную подвижность и позволяет лучше справляться с деформациями, возникающими при сложных комбинациях движений в сагиттальной и горизонтальной плоскостях. Учитывая разнообразие ландшафта и требования к скорости поворотов, совершаемых этими проворными хищниками, становится ясно, что им требуется идеальное сочетание подвижности и устойчивости. Напротив, у оленей и жирафов нет малоберцовой кости, и хотя они преуспевают в грациозных

и элегантных прыжках, им трудно выполнять повороты.

Расположение синдесмоза голеностопного сустава человека облегчает мобильность и стабильность, тем самым способствуя разнообразию нашей локомоции. Расположение связок и межкостной мембраны вокруг комплекса голеностопного сустава обеспечивает малоберцовую кость некоторую свободу движений (см. рис. 4.14). Движение малоберцовой кости, в свою очередь, обеспечивает адаптивность, амортизацию и распределение силы, а также позволяет кости двигаться вниз при касании пяткой. Небольшое скольжение латеральной лодыжки вниз помогает стабилизировать голеностопный сустав, увеличивая «нахлест»

между таранной костью и лодыжкой малоберцовой кости, а также растягивая межкостную мембрану и межберцовые связки для распределения нагрузки на мягкие ткани (Aiello & Dean, 2002).

Малоберцовая кость в переводе означает «булавка» или «брошь», которая часто использовалась для закрепления одежды. Очевидно, что человеческая малоберцовая кость слишком длинная и недостаточно острая для этой цели, но аналогичная кость у курицы идеально соответствует форме и длине тех металлических булавок, которые было принято использовать.

Лодыжка малоберцовой кости человека простирается дальше дистально, чем лодыжка большеберцовой кости, и обеспечивает некоторую поддержку голеностопного сустава, создавая костный блок для растяжения связок при эверсии (см. также «безвыходное положение» в главе 8).

Задняя поверхность большеберцовой кости обеспечивает необходимое место прикреплению для сильной камбаловидной мышцы (см. рис. 4.13). Эту линию камбаловидной мышцы можно увидеть на любом скелете: она указывает на силу и, следовательно, на важность этой мышцы. По мере того как мы исследуем каждую кость, значение каждой линии, борозды, выпуклости, углубления, выступа и бугристости должно стать более очевидным, но это потребует постоянно перескакивать туда и обратно между функцией и скелетной и мышечно-сухожильной анатомией. Значение каждой особенности, такой как линия камбаловидной мышцы, раскрывается через понимание ее функционального контекста.

Куполообразное, напоминающее шкив расположение блока таранной кости (вершины таранной кости) дополняется двумя закругленными концами лодыжек (см. рис. 4.5).



Рисунок 4.14. Когда голеностопный сустав совершает тыльное сгибание при подготовке к касанию пяткой, малоберцовая кость оттягивается вниз, чтобы обеспечить голеностопному суставу дополнительную защиту и натянуть синдесмоз и связки. Лодыжка малоберцовой кости расположена более дистально, чем лодыжка большеберцовой кости, и блокирует эверсию, поэтому инверсионные растяжения связок встречаются чаще, однако при этом эверсионные растяжения связок более серьезны, поскольку они часто повреждают малоберцовую кость.



Рисунок 4.15. Большеберцовая кость и малоберцовая кость шимпанзе имеют многочисленные отличия от человеческой. Из-за о-образной формы нижней конечности (рис. 4.10) шимпанзе их малоберцовая кость несет большую часть массы тела и сочленяется с таранной костью, что частично снижает ее подвижность. Более крепкая большеберцовая кость человека выровнена по вертикали и имеет большее сочленение с таранной костью.

Медиальная лодыжка обеспечивает шкив для сухожилия задней большеберцовой мышцы, а латеральная лодыжка выполняет ту же роль для длинной и короткой малоберцовых мышц. Роли мягких тканей будут рассмотрены далее в следующей главе, но их также



Рисунок 4.16.

Пальпация — знакомство с комплексом голеностопного сустава

Кончиками пальцев нащупайте две лодыжки, как показано на рис. 4.16 (L. = маленький молоточек).

Медиальная лодыжка является проекцией большеберцовой кости, а латеральная — малоберцовой кости; обратите внимание, что медиальная лодыжка чуть больше выдвинута вперед.

Если колено согнуто (рис. 4.17), можно сравнить угол между осью коленного сустава (достаточно близкой к фронтальной плоскости) и углом, образованным воображаемой линией, проходящей между двумя лодыжками. Этот угол указывает на торсию большеберцовой кости — естественное скручивание большеберцовой кости, которое происходит во время развития. Нормальным считается диапазон латеральной ротации, равный 12–15°. Любые отклонения от этих значений будут



Рисунок 4.17.

влиять на траекторию движения голеностопного сустава и высоту свода стопы. Как мы уже разобрали выше в упражнении на ротацию, медиальная ротация уводит стопу в пронацию, а латеральная ротация — в супинацию. Таким образом, вполне нормально, что у человека с торсией большеберцовой кости менее 12° стопа более плоская, чем у кого-то с торсией большеберцовой кости больше 15°. У показанного здесь примера торсия составила 13° и, следовательно, находится «в пределах нормы». Поисследуйте диапазон движений в голеностопном суставе и наблюдайте, что происходит со стопой, когда вы переходите от подошвенного сгибания к тыльному сгибанию (рис. 4.18). Угол разницы между лодыжками приводит к смещению оси движения и сочетает различные степени инверсии при подошвенном сгибании и эверсии (выворачиванию) стопы при тыльном сгибании.



Рисунок 4.18.

необходимо упомянуть и здесь, чтобы еще раз отметить важность строения костей.

Дистальная суставная поверхность большеберцовой кости горизонтальна, что помогает большеберцовой кости «перепрыгивать» над шкивом блока таранной кости, однако блок таранной кости расположен под небольшим медиальным наклоном. В сочетании со смещением вперед-назад между окружающими блок

таранной кости лодыжками его угол наклона создает ротацию внутри сустава во время тыльного и подошвенного сгибания. Амплитуда ротаций варьируется и подвергается сомнению некоторыми исследователями (Brockett и Chapman, 2016), однако это стоит отметить в сложных случаях, которые могут демонстрировать необычные модели поведения.

Посредством сравнения комплекса нашего голеностопного сустава с таковым у наших кузенов-шимпанзе можно проиллюстрировать несколько выводов, которые уже были сделаны прежде (рис. 4.15). Малоберцовые кости шимпанзе более крепкие, имеют общую суставную поверхность с таранной костью и несут значительную часть веса тела. Это контрастирует с изящной малоберцовой костью человека, которая остается более верной своему «булавочному» названию. Большеберцовая кость и малоберцовая кость шимпанзе образуют округлый купол над таранной костью, что обеспечивает перекачивающуюся походку; что же касается большеберцовой кости человека, она остается относительно вертикальной, коррелируя с нашим прямолинейным скольжением.

■ МОБИЛЬНОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ СТОПЫ

Человеческая стопа обладает многими особыми способностями: наряду со способностью превращаться из подвижного «связующего звена» в жесткий рычаг, стопа может ощущать рельеф местности, передавать проприоцептивную информацию в центральную нервную систему, а также поглощать и перерабатывать кинетическую энергию для обеспечения двигательной эффективности. Такая комбинация способностей обеспечивается совокупностью тканей стопы, которые позволяют замыкать и размыкать ее форму. Чтобы по-настоящему понять идею Мортонa о том, что «стопа — это орган», требуется понимание экологии костей — их многочисленных взаимодействий с соседями, мягкими тканями и постоянно меняющимся силовым окружением.

Выше мы исследовали некоторые сложные суставы, но чтобы по-настоящему оценить

красоту этой коллекции костей странной формы, мы должны исследовать каждую кость по очереди. Каждая кость имеет свое место и свои функции, и мы продолжим раскрывать оба эти аспекта ниже.

Костное строение обеспечивает большую часть стабильности стопы. Ранее мы уже видели, как трабекулярный паттерн переходит от одной кости к другой, и мы также можем видеть, как кости переплетаются друг с другом: каждая форма аккуратно вставлена на свое место, обеспечивая одни движения и предотвращая другие — точно так же, как мы уже это видели в расположении большеберцовой, малоберцовой и таранной костей. Но для полной стабильности стопе требуется помощь мягких тканей, о чем мы подробнее поговорим в последующих главах. Костная форма стопы дополняется силой, обеспечиваемой сократительными тканями, для переключения между мобильностью и стабильностью.

Голландский физиотерапевт Андре Флеминг использует терминологию геометрического и силового замыкания для описания механики сложных крестцово-подвздошных суставов (КПС). Кости крестцово-подвздошных сочленений плотно прилегают друг к другу, обеспечивая поддержку за счет своей формы, но суставы по-прежнему нуждаются в дополнительном укреплении со стороны мышц, пересекающих линии суставов.

Концепция геометрического и силового замыкания идеально подходит для многих механизмов, которые мы наблюдаем в стопах. Архитектурное расположение костей фактически формирует самоподдерживающийся купол, но для плотного соединения костям требуется дополнительная мощная фиксация со стороны связок.

Взаимодействие между костными и мягкими тканями позволяет стопе выполнять три основные функции, перечисленные биомехаником Бруно Ниггом (Nigg, 2010).

1. Обеспечивать поддержку.
2. Обеспечивать защиту.
3. Действовать как система рычагов.

Как упоминалось выше, мы можем спорить об уместности использования этого

понятия и о том, что именно он сам подразумевал под словом «рычаг», но я сомневаюсь, что кто-то поставит под сомнение роль костей, обеспечивающих жесткость нашей опорно-двигательной системы. Это довольно просто в случае двух основных костей нижней конечности — бедренной и большеберцовой. Обе кости длинные и соприкасаются в коленном суставе, что является относительно простой организацией по сравнению со стопой.

Если мы рассмотрим основные кости и суставы нижней конечности — тазобедренный сустав, поддерживаемый глубокой вертлужной впадиной, длинную бедренную кость, напичканную связками коленный сустав, крепкую вертикальную большеберцовую кость на вершине таранной кости, содержащуюся в коробе лодыжек, — похоже, что каждый из этих сегментов имеет некоторую степень врожденной стабильности и поддержки. Стабильность и поддержка, доступные стопе, гораздо менее очевидны. Рассмотрите положение стопы в момент схода с пальцев, когда пальцы стопы разогнуты, пятка приподнята, и по всей ее длине, от голеностопного сустава и до пальцев ног, действует огромная сила. Это по-настоящему впечатляющее инженерное решение для коллекции из 26 костей странной формы с 33 суставами.

Стопа может размыкаться в пронацию, чтобы амортизировать удары и адаптироваться к поверхности местности, а затем снова собираться, создавая устойчивую структуру, которая достаточно прочна для того, чтобы выдерживать высокую силовую нагрузку при сходе с пальцев. Стопа способна это сделать благодаря сложному взаимодействию между формой и силой.

В предыдущей главе мы видели, как жесткость бедренной кости увеличивается из-за натяжения окружающих ее мягких тканей. Большеберцовая кость, поскольку она не окружена мягкими тканями и имеет более ограниченные требования к силе, прошла через путь изменения костной архитектуры, чтобы обеспечить жесткий рычаг. Каждая из этих областей, бедро и голень, состоит из одной основной несущей кости. С механической точки зрения создать жесткий рычаг легко, если

у вас есть только один элемент, лежащий между суставами. Каким-то образом стопа ухитряется обеспечивать жесткий рычаг от голеностопного сустава до пальцев ног, образуя составную (соединенную) кость.

Каждый сустав тела имеет определенную комбинацию геометрического и силового замыкания, т. е. архитектурной поддержки со стороны костей и поддержки определенного напряжения со стороны мышц. Тело бедренной кости стабилизируется силой окружающих его мышц, в то время как основным источником стабильности большеберцовой кости является ее форма. Составная кость — стопа как жесткий рычаг — объединила эти две стратегии, чтобы позволить свободно расположенным тканям удерживаться вместе как функциональное целое.

Изучая каждую кость как по отдельности, так и в небольших функциональных группах, мы должны помнить о более широком контексте костей — их роли в составной кости стопы.

■ ЗАДНЯЯ ЧАСТЬ СТОПЫ — ТАРАННАЯ И ПЯТОЧНАЯ КОСТИ

Таранная и пяточная кости образуют задний отдел стопы, и их основные функции заключаются в том, чтобы согласовывать силы, участвующие в касании пяткой, и передавать силы по голени вверх и от голени вниз.

Динамика таранного сустава, которую мы уже обсуждали ранее, выдвигает на первый план важные концепции сопряженности и несопряженности движений в суставах. Таранный сустав обладает достаточной свободой при сгибании в сагиттальной плоскости, при этом ограничен своей геометрией в ротации, что вызывает «сопряженную» ротацию одной кости вместе с соседними. То, как сила тяжести, сила инерции и сила реакции опоры проходят через суставы, напрямую зависит от степеней свободы, доступных в каждом суставе.

Есть несколько часто цитируемых фактов о таранной кости: это единственная кость без мышечных прикреплений; 70% ее поверхности составляет синовиальный хрящ; и она образует два важнейших голеностопных

сустава — таранный и подтаранный (рис. 4.19 и 4.20). Большая площадь хрящевой поверхности — область контакта с другими костями — свидетельствует о ее роли в качестве посредника в передаче усилий между соседними костями. Отсутствие мышечного прикрепления и, следовательно, мышечного контроля позволяют таранной кости свободно реагировать на проходящие через нее силы, а ее форма, в контексте ее суставов, передает эти силы другим костям и соответствующим мягким тканям.

Если вспомнить про трабекулярные паттерны, то мы уже видели, что все их основные линии направляются к таранной кости — вверх и вперед от пяточной кости, вверх и назад от средней части стопы (см. рис. 4.1). Я сравниваю таранную кость со стоящим посреди оживленного перекрестка регулировщиком, которому приходится справляться с потоками транспорта, идущими с разных направлений.

Если нам повезет, то таранная кость сможет продолжать этот танец грациозно, элегантно и в нужное время. Однако, если комплекс голеностопного сустава заклинит, то в этих потоках движения может начаться хаос.

Размер пяточной и таранной костей указывает на их несущую роль: таранная кость является первой из костей предплюсны, которая принимает на себя вес от большеберцовой кости и остального тела выше, а пяточная кость берет на себя большую часть первоначального удара при касании пяткой. Представьте, что таранная кость — это вершина пирамиды (рис. 4.19d): она имеет наклон вниз и назад к пяточной кости, а также вниз и вперед к ладьевидной кости через шейку, что соответствует тому описанию, которое мы использовали для трабекулярного паттерна, указывая на ту роль, которую она играет в управлении силами. Говоря простым языком, блок таранной кости принимает



Рисунок 4.19. Таранная кость находится непосредственно под большеберцовой костью (а) и с обеих сторон окружена лодыжками (б). Несмотря на то что к таранной кости не прикрепляются никакие мышцы, она со всех сторон «обрамлена» костными структурами, которые скреплены вместе прочными связками, помогающими контролировать поток сил при нормальном движении (б и с и рис. 4.22). Поверхность таранной кости на 70 % состоит из хряща из-за большой контактной поверхности с большеберцовой костью сверху, с пяточной костью снизу и с ладьевидной костью спереди (d–f). Головка таранной кости соединяется с ладьевидной костью и, как и в случае с верхней частью туловища, тело и головка таранной кости соединяются через шейку. Тело таранной кости обеспечивает подошвенное и тыльное сгибание и расширяется в передней части кости.

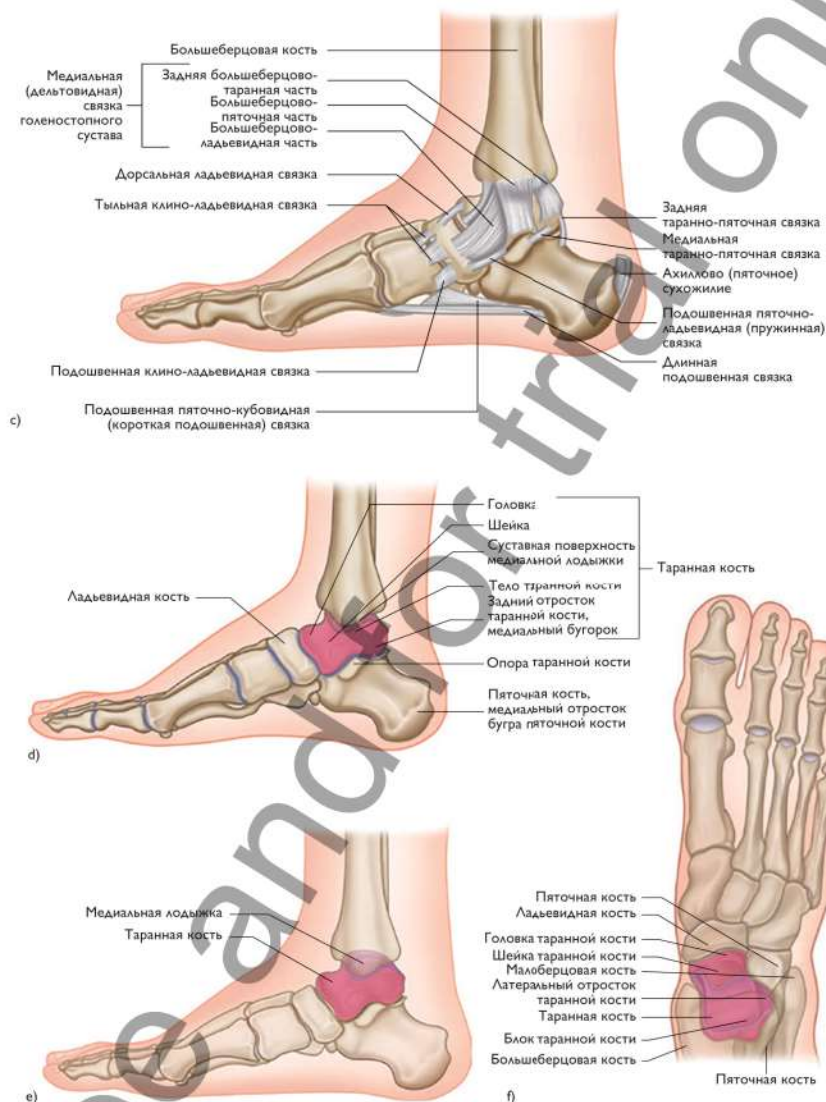


Рисунок 4.19. Продолжение.

на себя вес тела от большеберцовой кости и распределяет его вперед и назад, однако в действительности все немного сложнее, чем при ходьбе.

При касании пяткой на пяточную кость действует сила реакции опоры, которую она посылает вверх к таранной кости, а затем, когда

остальная часть стопы касается земли, передняя часть стопы посылает силу назад и вверх по стопе, к таранной кости. Таким образом, таранная кость находится в середине трехстороннего потока силы, нисходящего от большеберцовой кости, идущего вперед и вверх от пяточной кости и действующего назад и вверх от переднего отдела стопы.

Именно взаимодействие таранной кости с окружающими костями, а не контроль посредством активного напряжения мышц, определяет ее реакцию на быструю смену сил. Обрамленная с обеих сторон лодыжками, большеберцовой костью сверху, пяточной костью снизу и ладьевидной костью спереди, таранная кость хорошо удерживается на своем месте костями и соответствующими связками. Поскольку таранная кость свободна от какого-либо мышечного контроля, она может перемещаться и направлять поступающие к ней с любой стороны силы, не дожидаясь указаний и не получая прямого подавления своей реакции аберрантными мышечными тонусами. Возвращаясь к аналогии с регулировщиком, мы все сталкивались с длительным ожиданием на перекрестках, когда светофор не был запрограммирован с учетом транспортного потока. И при этом нас впечатлял регулировщик, который немедленно реагирует на локальные условия и сводит к минимуму скопление транспорта*. Похоже, что предоставление некоторой степени местной автономии таранной кости прекрасно работает в отношении нагруженного голеностопного сустава.

Под таранной костью находится не менее важный подтаранный сустав[†]. Он представляет собой взаимодействие между таранной и пяточной костями и обеспечивает инверсию и эверсию стопы. Важно различать движения инверсии/эверсии и пронации/супинации. Инверсия и эверсия — это простые описания, которые подразумевают преимущественно движение во фронтальной плоскости. Пронация и супинация описывают

сложную последовательность событий во всем комплексе стопы и голеностопного сустава, в которой инверсия и эверсия являются лишь одной из составляющих.

Таранная и пяточная кости соприкасаются как минимум в двух областях^{***}. Задний подтаранный сустав представляет собой почти прямую линию между большеберцовой костью, таранной костью и пяточной костью пяточной кости. Переднемедиальная часть подтаранного сустава находится между таранной костью и опорой таранной кости (см. рис. 4.20). Опора таранной кости представляет собой выступ пяточной кости, который иногда также называют «подносом официанта» или, более официально, полкой таранной кости. Однако ее название — *sustentaculum tali* — означает «подвес для таранной кости», чем она и является.

Подтаранный сустав довольно сложен по своему строению, так как имеет два участка, изогнутых в противоположных направлениях (см. рис. 4.20с) и обеспечивающих движение сустава в каждой из трех плоскостей. Как мы уже видели в главе 2, выравнивание двух суставных поверхностей изменилось и составило примерно 23° от медиальной линии тела (т. е. по сравнению с исходным состоянием произошла латеральная ротация, см. рис. 4.20d). Возможны индивидуальные отклонения от угла 23° , результатом которых являются разные типы стоп и которые могут вызывать целый ряд биомеханических проблем. Если сустав отклоняется медиально, то стопа будет иметь тенденцию к пронации; если угол сустава больше 23° , то это может привести к ригидной супинированной стопе.

Вероятно, именно сочетание торсии большеберцовой кости и изменения оси подтаранного сустава дало нам человеческую стопу (см. рис. 2.16, 4.17 и 4.20d), как и обсуждалось в главе 2. Скручивание голени изменило ось подтаранного сустава, обеспечило приведение первого луча и выровняло линию

* И, конечно, не каждый, на кого возложена ответственность за управление трафиком, может сделать это с легкостью, но я надеюсь, вы поняли идею!

** Мы подробнее разберем два голеностопных сустава в главе 6, когда рассмотрим расположение мышц.

*** Существует множество вариаций расположения подтаранных костей, как в местах сопряжения костей, так и в различных углах, используемых для их измерения. Те, которые приведены здесь, считаются «нормальным» средним значением.

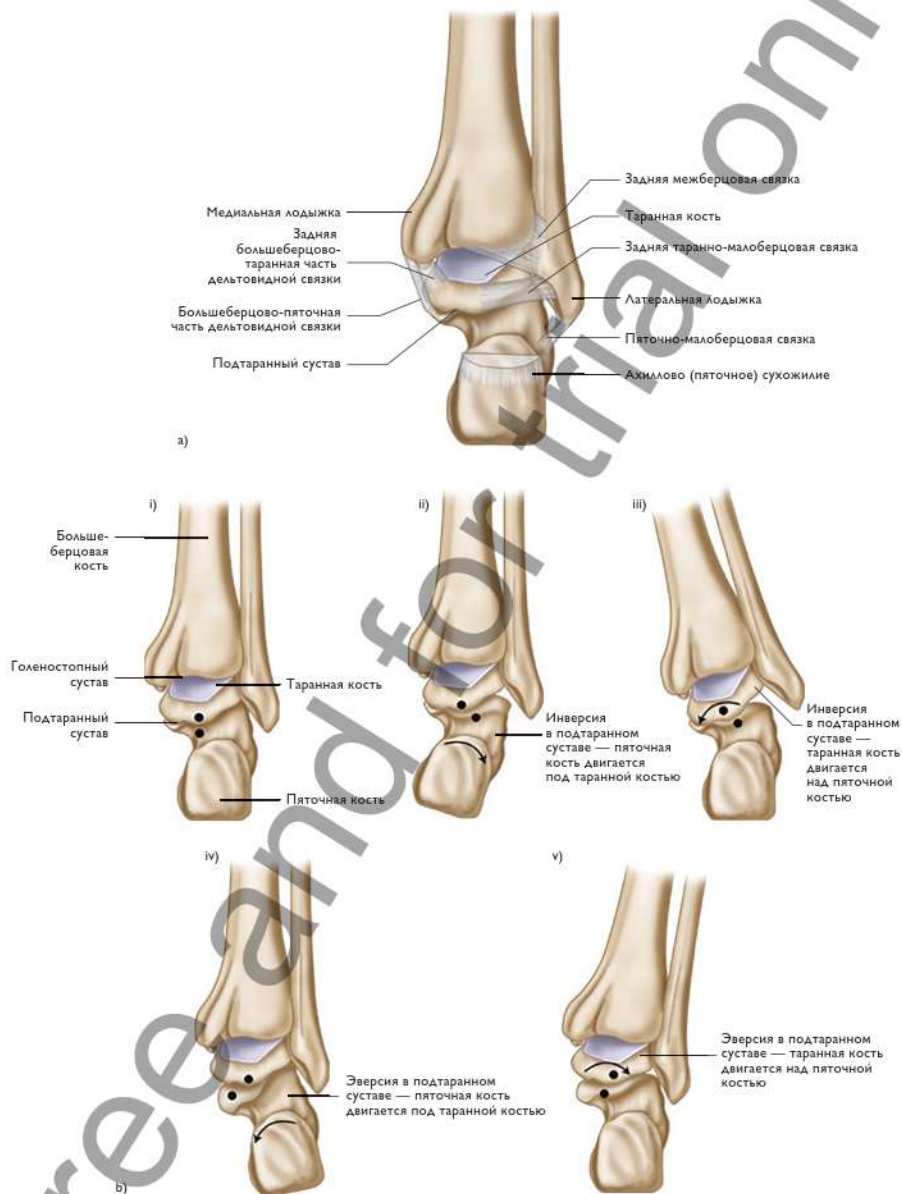
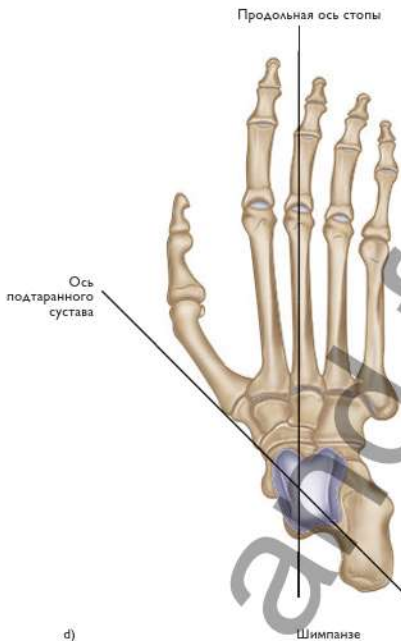


Рисунок 4.20 Начало.



с)



d)

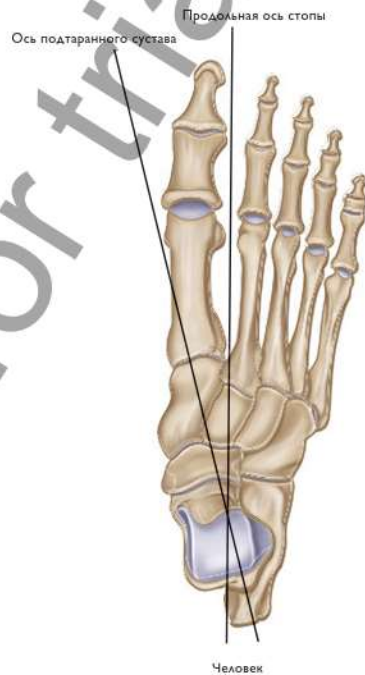


Рисунок 4.20. а) Верхняя часть таранной кости обеспечивает подошвенное и тыльное сгибание голеностопного сустава и сохраняет траекторию движения в парасагиттальной плоскости благодаря положению лодыжек и связанных с ними связок голеностопного сустава, которые удерживают его на месте, обеспечивая медиально-латеральную стабильность. б) Поскольку таранная кость не может двигаться медиально и латерально, инверсия и эверсия происходят под таранной костью в двух суставах между таранной и пяточной костями. Инверсия и эверсия могут происходить как в открытой цепи (стопа перемещается из нейтрального положения (i) под таранной костью, ii и iii), так и в закрытой цепи (таранная кость движется над стопой, iv и v). в) Подтаранный сустав имеет две области — переднюю и заднюю, которые попеременно изгибаются друг к другу. г) В процессе эволюции произошло переключивание стопы человека, что привело к утрате способности противопоставлять большой палец стопы другим пальцам стопы, но приблизило ось подтаранного сустава к оси стопы.

предплюсне-плюсневых суставов в одну плоскость, чтобы облегчать продвижение вперед в сагиттальной плоскости через четыре перека-та стопы.

■ ПЯТОЧНАЯ КОСТЬ, ТАРАННАЯ КОСТЬ, ЛАДЕВИДНАЯ КОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ СИЛАМИ В ЗАДНЕМ ОТДЕЛЕ СТОПЫ

Хотя мы не произошли от шимпанзе, ископаемые свидетельства показывают, что достаточно безопасно предположить значительное сходство между стопой современного человека и нашими двоюродными братьями-обезьянами. Таким образом, мы можем использовать это сравнение, чтобы оценить общее изменение формы всего комплекса голень-голеностопный сустав-стопа. На рис. 4.20d показано, как тело пяточной кости, расположенное в стопе шимпанзе латеральнее таранной кости, в стопе человека переместилось ближе под таранную кость. Развившаяся торсия большеберцовой кости и скручивание внутри стопы образовали полукуполообразную структуру (вспомните еще раз сопряженность латеральной ротации голени и супинации стопы). Скручивание приподнимает таранную кость на вершину пяточной кости. Или, по крайней мере, почти на вершину: посмотрите на рис. 4.21a, и вы увидите, как таранная кость частично опирается на полку таранной кости*, «поднос официанта» пяточной кости. Это смещение является одним из механизмов реакции пронации при ходьбе.

Смещение действия силы реакции опоры и веса тела заставляют пяточную кость наклоняться медиально при касании пяткой. Таранная кость следует за ней (поскольку она опирается на *sustentaculum tali* — опора таранной кости) и также вращается медиально (рис. 4.21a и b). Подобно тому как латеральная ротация таранной кости создает супинацию, медиальная ротация является пусковым механизмом для пронации остальной части стопы. На увеличенном рис. 4.21b

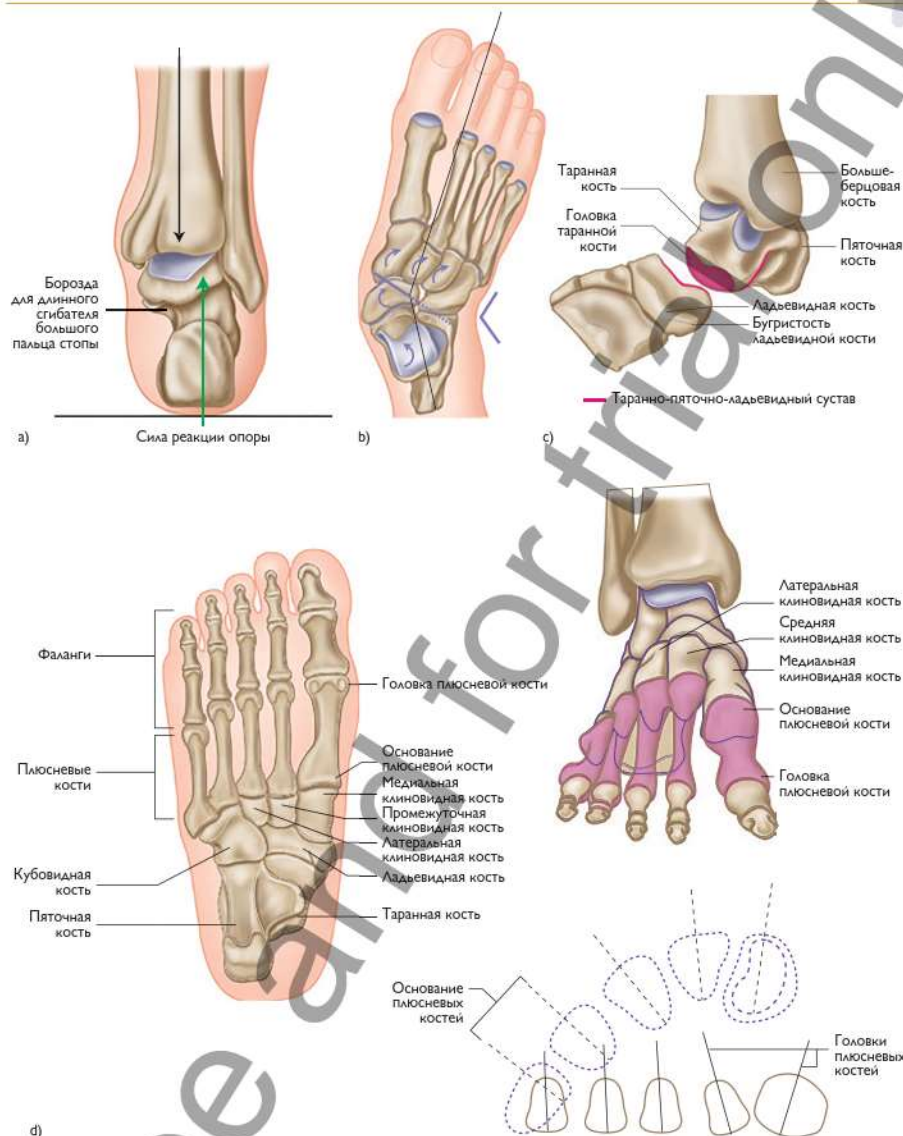
видно, как медиальная ротация таранной кости последовательно размыкает суставы предплюсны. Размыкание полукупола помогает амортизировать удары за счет мягких тканей, в особенности — за счет связок и внутренних мышц стопы.

Передняя часть таранной кости, головка, представляет собой еще один округлый купол, который слегка выступает в ладьевидную кость. Ладьевидная кость (лат. «маленькая лодка») названа так в честь своего сходства с лодкой. Носовой частью лодки является ладьевидный бугорок, который можно легко пропальпировать у большинства людей и использовать для измерения изменений медиальной продольной арки стопы во время весовой нагрузки и при движении (рис. 4.21d). Выскобленная «палубная» часть лодки принимает головку таранной кости и облегчает вращение. К сожалению, аналогия с морской тематикой была оставлена позади при выборе названия этой «палубы» в пользу латинского *acetabulum pedis* (вертлужная впадина стопы) — «чашка стопы». Тем не менее эта вертлужная впадина напоминает тазобедренный сустав и дает полезное представление о глубине и вращательной способности этого сустава.

Медиальная область таранной, ладьевидной и пяточной костей формирует высоту свода стопы и подвергается большим нагрузкам из-за своего положения между стопой и голенью. Для поддержания целостности этой области требуется большая поддержка мягких тканей. Целая череда связок обеспечивает первый уровень поддержки и, на первый взгляд, кажущаяся сложность их названий может даже напугать (см. рис. 4.22a и b). Однако, как и в случае с трабекулярным паттерном и потоком напряжений, проходящих через стопу, в их расположении и их названиях (или, по крайней мере, в большинстве названий) есть определенная логика.

«Пружинная связка», пожалуй, является самой известной связкой стопы. Уже само ее название говорит нам о ее значительной роли, а ее положение можно определить по описанию реакции пронации выше, поскольку в области высокой нагрузки между пяточной костью и ладьевидной костью имеет смысл иметь «страховочную сетку». По официальному

* Полку таранной кости также часто называют опорой таранной кости, *sustentaculum tali*.



d)

Рисунок 4.21. а) Смещение между пяточной и таранной костью вызывает смещение между силой тяжести и силой инерции, проходящими вниз по большеберцовой кости, относительно силы реакции опоры, поднимающейся вверх от пяточной кости в начале фазы опоры. б) Это смещение заставляет пяточную кость и выступ таранной кости наклоняться медиально, вызывая ротацию таранной кости — действие, которое размыкает стопу в пронацию. в) Головка таранной кости вращается в неглубокой впадине ладьевидной кости. Костный выступ («нос корабля») можно пропальпировать, когда он опускается во время пронации (см. также рис. 4.26). г) Клиновидные кости и основания плюсневых костей имеют форму клина — широкие сверху и узкие в подошвенной части. Вращение через стопу раскрывает точки костей, позволяя мягким тканям амортизировать (поглощать) часть силы.



Рисунок 4.22. а) Связки заполняют промежутки между костями чтобы предотвратить их разделение и сохранить целостность сустава. Так называемая «пружинная связка» (или подошвенная пяточно-ладьевидная связка) также помогает поглощать часть силы в начале фазы опоры, когда стопа уходит в пронацию, а пяточная и ладьевидная кости начинают раздвигаться. б) Эта иллюстрация показывает непрерывность силы, проходящей через плотные мягкие ткани по мере того, как волокна выстраиваются от одной кости к другой вдоль медиальной стороны. Медиальная линия костей удлиняется и раскрывается во время пронации по мере того, как внутренняя часть купола опускается. Дельтовидная связка веерообразно опускается от лодыжки большеберцовой кости, обеспечивая поддержку костям купола сверху, когда они опускаются и скручиваются от большеберцовой кости во время пронации. (См. также рис. 4.25.)

названию пружинной связки можно легко определить, где именно она лежит: это подошвенная пяточно-ладьевидная связка, длинная пружина, перекрывающая зазор между выступом «подноса официанта» и носовой частью «лодки». Сверху пружинной связке помогает серия из трех связок, которые в совокупности называются дельтовидной связкой и соединяют большеберцовую кость с пяточной, таранной и ладьевидной костями. Можно почувствовать деформацию в этой области, если пропальпировать бугорок ладьевидной кости, когда клиент то переносит свой вес на стоящую ногу, то убирает его с нее.

■ КОСТИ И СУСТАВЫ В ДЕЙСТВИИ

Может оказаться полезным рассматривать эту группу из трех костей — пяточной, таранной и ладьевидной — как функциональную единицу. Вместе они образуют основные суставы голеностопного сустава и за счет изменения осей суставов обеспечивают необходимое сопряжение ротации между стопой и голенью.

- **Таранный сустав** допускает движение в сагиттальной плоскости, но ограничивает движение во фронтальной и горизонтальной плоскостях.
- **Подтаранный сустав** допускает движение во фронтальной плоскости, но ограничивает движение в сагиттальной и горизонтальной плоскостях.
- **Таранно-ладьевидный сустав** обеспечивает движение в горизонтальной плоскости, но ограничен в движении в сагиттальной и во фронтальной плоскостях.

При рассмотрении суставов важно иметь в виду, что «ограничение» — это не обязательно что-то негативное. Особенно это касается комплекса голеностопного сустава, поскольку именно отсутствие ротации позволяет уменьшить мышечную массу в этой области. Как правило, если в суставе есть доступное движение, то должна быть и соответствующая мышца, которая создает и контролирует это движение. Стопа выполняет пронацию и супинацию преимущественно через серию движений в горизонтальной плоскости. Ограничение ротации между большеберцовой, малоберцовой

и таранной костями позволяет нам вновь увести стопу в супинацию за счет ротации кости, а не за счет сокращения какой-либо мышцы, как вы сами имели возможность почувствовать в упражнении на ротацию в начале этой главы: ваша правая стопа совершала супинацию за счет сопряженного действия костей.

Пальпируйте пятку, чтобы оценить объем тела пяточной кости и связать это с трабекулярными линиями напряжения. Пяточная кость обладает такой длиной, чтобы выполнять несколько функций: она помогает амортизировать удары, удлиняет плечо рычага между голеностопным суставом и пяткой для повышения двигательной эффективности, а ее бугристость предоставляет округлую поверхность для первого из четырех перекатов стопы. Возникающее при касании пяткой смещение между действующей на пятку силой реакции опоры и силой инерции в голеностопном суставе запускает перекат через пятку, вынуждая стопу переходить в подошвенное сгибание (рис. 4.23).

Далее, приземление передней части стопы направляет силу инерции на второй перекат, через таранный сустав, и большеберцовая кость перекачивается в сагиттальной плоскости через блок таранной кости. Однако при виде спереди или сзади другое смещение сил между пяточной костью и таранной костью заставляет опору таранной кости наклоняться медиально во фронтальной плоскости, и стопа начинает совершать пронацию, поскольку она принимает вес во время этого второго переката.

Таранная кость имеет довольно глубокую борозду сзади, которая ведет непосредственно к другой борозде, расположенной под опорой таранной кости (см. рис. 4.4, 4.24а и с, и 4.25а и б). Эта линия заполнена сухожилием длинного сгибателя большого пальца стопы (FHL), которое приподнимает и поддерживает медиальную часть арки стопы. Длинный сгибатель большого пальца стопы, расположенный на медиальной стороне стопы, уравновешивается на латеральной стороне стопы сухожилиями малоберцовой кости, которые по аналогичному желобковому пути проходят позади лодыжки малоберцовой кости и вдоль пяточной кости, чтобы обогнуть с обеих сторон



Рисунок 4.23. Касание пяткой земли под углом заставляет силу реакции опоры действовать кзади относительно оси таранного сустава. Смещение между силой реакции опоры и силой инерции вызывает подошвенное сгибание голеностопного сустава.

блок малоберцовой кости — короткая малоберцовая мышца сверху и длинная малоберцовая мышца снизу (см. рис. 4.24б).

Как мы уже видели выше относительно перекатов стопы, основная роль стопы заключается в содействии движению вперед и, хотя для других движений нам часто приходится раскачиваться из стороны в сторону через инверсию и эверсию в чистом виде, для того чтобы помочь с продвижением вперед, стопа нуждается в медиально-латеральной стабильности. С помощью различных удерживателей, окружающих стопу и голеностопный сустав, два костных выступа лодыжек, расположенных по обе стороны от таранной кости, помогают стабилизировать ее вдоль оси подтаранного сустава. В свою очередь мышцы — длинный сгибатель большого пальца стопы с медиальной стороны и малоберцовые мышцы с латеральной — помогают контролировать эверсию и инверсию соответственно (см. также главу 6). Две группы мышц, связанные с ними связки и удерживатели похожи на стабилизаторы на детском велосипеде — они позволяют немного наклоняться влево и вправо, направляют и помогают движению вперед и помогают предотвратить катастрофический наклон.

Сухожилия по обе стороны от пяточной кости помогают направлять ее при возникающих во время фаз походки изменениях. Самые

а) Вид с медиальной стороны



б) Вид с латеральной стороны



Рисунок 4.24. Череда костных ориентиров направляет сухожилия вокруг системы «шкивов» голеностопного сустава. Длинный сгибатель большого пальца стопы проходит по каналу под опорой таранной кости (а), а блок малоберцовой кости направляет малоберцовые мышцы (б). с) Используйте лодыжки в качестве отправных ориентиров для исследования костных выступов вокруг пяточной кости. Примерно на 1,5–2,5 см ниже медиальной лодыжки находится бугорок «погноса официанта». Убедитесь, что вы находитесь именно на нем, выполняя инверсию и эверсию в голеностопном суставе; будучи частью пяточной кости, он должен двигаться так же, как и остальная часть пятки. В то же время вы должны почувствовать натяжение соответствующих связок, и, если вы проскользите пальцем вперед, вы также ощутите «изгиб» ладьевидной кости. д) Ниже и немного спереди от латеральной лодыжки вы почувствуете еще один небольшой бугорок — малоберцовый блок таранной кости. Немного подвигайте стопой, и сухожилия малоберцовой мышцы должны выскочить вверх, проходя вокруг этого «шкива».

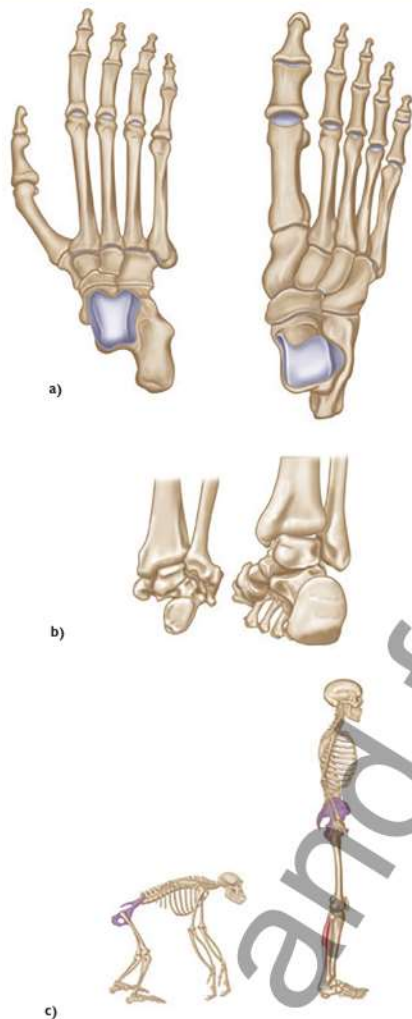


Рисунок 4.25 а) В результате скручивания голени и стопы пяточная кость и таранная кость человека располагаются непосредственно под большеберцовой костью. б) Вертикальное расположение пяточной кости, таранной кости и большеберцовой кости приподняло медиальную часть стопы, создав полукупол и облегчая эффективное передвижение на двух ногах. Увеличившаяся прочность пяточной кости помогает ей поглощать удары и способствовать перекачку через пятку в начале стадии опоры. в) Увеличенный выступ кзади позволяет камбаловидной мышце поддерживать небольшой наклон большеберцовой кости вперед во время спокойного вертикального положения.

ненадежные из них — несколько мгновений после касания пяткой. В идеале латеральная сторона задней части пяточной кости должна коснуться земли, и тогда естественные силы помогут нам перекачаться вперед. Опасность возникает тогда, когда касание пяточной кости происходит под углом, как это случилось со мной в студенческие годы при попытке перебежать дорогу. Оглянувшись через правое плечо, чтобы проверить, не приближаются ли сзади меня машины, я не осознавал, как это движение повлияет на приземление моей стопы. Когда мое тело повернулось вправо, моя левая нога повернулась вместе со мной ровно настолько, чтобы приземлиться слишком далеко на латеральную сторону пяточной кости, создавая несоответствие между выравниванием сустава и моим движением вперед. Растяжение латеральных связок голеностопного сустава — распространенная травма, которая создала мне довольно много компенсаций, когда я хромал по университету, из-за чего я пытаюсь напечатать и сдать вовремя окончательный вариант своей диссертации.

■ КАСАТЬСЯ ПЯТКОЙ ИЛИ НЕТ?

Если обратить на это внимание, то очевидным аспектом анатомии опорно-двигательного аппарата является то, что наши суставы, связанные с ними мышцы и наши естественные паттерны движений имеют тенденцию согласовываться и соответствовать друг другу. Существует естественный поток энергии от мышц, воздействующих на суставы для создания движения, и обратный поток силы инерции, проходящей через суставы, который затем можно контролировать — поддерживать, замедлять или ускорять в зависимости от необходимости — с помощью мышц. Увидев взаимодействие движения и анатомии, мы можем интерпретировать «нормальную» функцию.

В наши дни, когда есть возможность обучаться в социальных сетях, появилось несколько «экспертов», которые проповедуют преимущества и естественность ходьбы на передней части стопы. Еще в 1952 году, задолго

до того, как интернет стал платформой для различных идей, Мортон сокрушался по поводу того, что идея ходьбы с передней части стопы на пятку всплывает снова и снова. Ее сторонники обычно пытаются сослаться на стратегию «спереди назад» как на более естественную. В качестве обоснования они используют тот факт, что передняя часть стопы лучше приспособлена для амортизации, а также тот факт, что принятие этой стратегии способствует укрупнению и лучшему развитию икроножной мышцы. Мортон отверг идею ходьбы на передней части стопы, просто заявив: «Это не наблюдается в первобытных культурах».

Касание передним отделом стопы при ходьбе является лишь одним из возможных вариантов и может пригодиться при шаге в сторону, при спуске или при проверке того, насколько безопасно можно опереться на следующий камень в боулдеринге. Есть множество примеров ситуаций, где мы можем использовать эту стратегию надлежащим образом, но для повторяющейся ритмичной ходьбы вперед касание пяткой является более эффективным и совершенно естественным решением (Webber & Raichlen, 2016). Те, кто недостаточно осведомлен по этому поводу, могут провести обычный эксперимент, который покажет, действительно ли приземление на передний отдел стопы лучше, чем касание пяткой: приземляйтесь пятку босиком, заткнув пальцами уши, так, чтобы вы слышали глухой стук, который считается чем-то плохим. Да, вы услышите стук. Но этот звук лишь доказывает, что вы приземлились на пятку и что вы сделали это с помощью относительно прямых, сопряженных костей, и тем самым вы обеспечили себе значительную эффективность использования энергии во время передвижения. Привычные касания передним отделом стопы действительно сделают ваши мышцы большими и сильными, но хорошо ли это? Возможно, что так, но это не будет свидетельствовать о том, что такая стратегия эффективна или типична.

Человеческая пяточная кость является самой большой из костей предплюсны и имеет множество особенностей, способствующих уникальности нашего стиля походки. Она крупнее, прочнее и выступает назад больше,

чем пяточная кость любого другого примата. Ее большой размер наряду с сильным, плотным жиром способствует амортизации при касании пяткой, а дальнейшее расширение кости назад помогает нам сохранять равновесие в вертикальном положении (рис. 4.25с). Одна из основных причин, по которой другим животным трудно ходить на двух ногах, заключается в том, что для этого требуется передне-заднее равновесие. При перемещении на четырех конечностях эта задача решается посредством раскачивания вперед, а также за счет уравнивания себя хвостом или чередой стибаний в суставах ног и туловища. Для этой стратегии, которую используют многие виды, в том числе кошки и собаки, требуется поднятие пяточной кости. Что же касается нашей стопоходящей осанки с прямыми конечностями, то ей требуется некоторое костное разгибание назад.

Конечно, спереди от таранного сустава стопа длиннее, чем сзади, в результате чего наш центр равновесия находится немного впереди относительно линии сустава. Это смещение веса тела вперед заставляет работать задний отдел голени, особенно камбаловидную мышцу, которая, к счастью, содержит большое количество медленно сокращающихся волокон, способствующих выносливости. Сочетание относительно прямого выравнивания костей с небольшим углом в голеностопном суставе и устойчивых к усталости медленно сокращающихся мышц позволяет нам стоять достаточно комфортным образом в течение длительного времени.

Опора таранной кости и пяточной кости человека горизонтальна в положении покоя, в отличие от имеющей медиальный наклон опоры таранной кости шимпанзе. Подъем и поддержка, которые таранная кость получает благодаря горизонтальному «подносу официанта», позволяет таранной и большеберцовой костям располагаться почти вертикально над пяточной костью для эффективного костного выравнивания, в то время как смещение между таранной и пяточной костями позволяет пяточной кости наклоняться, чтобы частично рассеять ударное воздействие, возникающее при касании пяткой. Как уже упоминалось выше, смещение означает, что сила тяжести и сила реакции опоры, проходящие через большеберцовую

и пяточную кости, вызывают наклон пяточной кости, медиальный наклон опоры таранной кости, в результате чего таранная кость скользит по поверхности, размыкая средний отдел стопы. Размыкание стопы направляет силу в мягкие ткани и помогает распределить задачу амортизации между различными типами тканей.

При касании только передней частью стопы большая часть силы приходится на мягкие ткани, что уменьшает нагрузку на кости. Переход с касания пяткой на касание передним отделом стопы меняет распределение нагрузки, и именно поэтому касание передней частью стопы приводит к увеличению икроножных мышц. Дополнительная нагрузка также ощущается всеми, кто переходит на бег с приземлением на среднюю или переднюю части стопы, что может привести к травмам мягких тканей, если не соблюдать постепенность такого перехода.

Как мы видели выше, горизонтально расположенная опора таранной кости, поддерживающая медиально расположенную таранную кость, создает смещение движения к медиальной стороне стопы. При нормальной нагрузке во время касания пяткой конструкция стопы создает медиальный наклон пяточной кости, который необходимо скорректировать, чтобы вновь увести стопу в супинацию и замкнуть ее перед сходом с пальцев. Скорректировать медиальный наклон и вновь создать супинацию в стопе помогают несколько составляющих. Во-первых, это мягкие ткани. Мы рассмотрим мягкие ткани в главе 5, но сначала стоит их упомянуть здесь.

Исследуя два костных выступа по обеим сторонам пяточной кости, вы, возможно, заметили, что опора таранной кости намного больше, чем борозда, предназначенная для двух малоберцовых мышц на латеральной стороне стопы. Длинный сгибатель большого пальца стопы проходит по глубокой борозде вдоль задней части таранной кости и под опорой таранной кости, обеспечивая подъем «подноса» при напряжении мышц. Длинный сгибатель большого пальца стопы имеет гораздо больший контроль над пяточной костью, чем более латерально расположенные малоберцовые мышцы, с их меньшими бороздами. Аналогичным

образом камбаловидная мышца, которая соединяется с икроножной мышцей, образуя ахиллово сухожилие и прикрепляясь к верхней части пяточной кости, имеет больше сухожильных волокон на медиальной стороне кости, которые помогают уводить ее в инверсию при напряжении мышц. Эти первичные мышцы-супинаторы — длинный сгибатель большого пальца стопы и камбаловидная мышца — при содействии остальной части глубокого заднего отдела — задней большеберцовой мышцы и длинного сгибателя пальцев стопы — способствуют «силовому замыканию» стопы.

«Геометрическое замыкание» стопы сопровождается возвращением в горизонтальное положение опоры таранной кости. Возврат таранной кости в горизонтальное положение вызван ее положением между лодыжками. Как мы ранее уже обнаружили в упражнении с ротацией, таранная кость вращается сопряженно с большеберцовой и малоберцовой костями. Перенос одной нижней конечности вперед вызывает ротацию костей опорной ноги. Эта латеральная ротация опорной ноги вызывает ротацию таранной кости в латеральном направлении, помогая мягким тканям стопы подняться в супинацию; таким образом, обе системы, костная и мышечная, работают в гармонии.

■ РОЛЬ ЛАДЬЕВИДНОЙ КОСТИ В ПРОНАЦИИ И СУПИНАЦИИ

Все три кости заднего отдела стопы — пяточная, таранная и ладьевидная — соединены друг с другом не только костной структурой, но и связками.

Пружинная связка простирается от опоры таранной кости до бугристости ладьевидной кости, соединяя движение пяточной кости и ладьевидной кости. Это имеет решающее значение как для пронации, так и для супинации, поскольку позволяет соответствующим образом перемещать таранную кость. Когда пяточная кость наклоняется в ответ на касание пяткой, пружинная связка тянет за собой ладьевидную кость, позволяя таранной кости повернуться во впадине ладьевидной кости и создать пронацию. Если медиальная ротация передается

от большеберцовой и малоберцовой кости к таранной кости, таранная кость вращается внутри вертлужной впадины ладьевидной кости, и это движение приводит к жесткости прилегающих связок, чтобы они могли способствовать сопряженности движения, а также вызывает пронацию.

Таким образом, ротация таранной кости связана с движением ладьевидной кости в любом направлении — будь то от сил реакции опоры снизу или от вращения голени сверху.

Благодаря положению ладьевидной кости и ее связям с другими костями, ее можно использовать в качестве полезного показателя при измерении степени пронации стопы. Хотя в литературе существуют неоднозначные мнения относительно использования и интерпретации опущения ладьевидной кости, это может быть полезно для построения общей картины способности стопы двигаться и адаптироваться (см. рис. 4.26).

Хотя важно не патологизировать плохую механику, необходимо составить представление о функциональных возможностях и ограничениях клиента, чтобы полностью понять присутствующую патологию и провести вмешательства в соответствии с данным конкретным случаем. Они будут более подробно рассмотрены в главе 8, а сейчас достаточно понять, зачем выполняются соответствующие тесты. Если бугристость ладьевидной кости расположена слишком низко или значительно опущена, это может привести к тому, что суставы постоянно удерживаются в открытом положении и нагрузка передается непосредственно на мягкие ткани. Если ладьевидная кость не может подняться после пронации или если она делает это медленно, неспособность опоры таранной кости подняться может привести к тому, что стопа окажется в относительно пронираванном положении, что приведет к схождению с пальцев без истинного «геометрического замыкания». Неспособность достичь состояния жесткого рычага без геометрического и силового замыкания также может привести к большой нагрузке на мягкие ткани из-за отсутствия костной поддержки. И наоборот, если ладьевидная кость по какой-либо причине не может опуститься, мягкие ткани не удлиняются,



Рисунок 4.26. Опущение ладьевидной кости определяется путем сравнения высоты бугристости ладьевидной кости при отсутствии весовой нагрузки (а) и при весовой нагрузке (b).

а кости и суставы могут получить больше нагрузки, чем им положено.

Как уже упоминалось в обсуждении приземления на передний отдел стопы, массивные икры являются результатом того, что больший процент нагрузки перенаправляется со скелета на мягкие ткани. Правильно функционирующая стопа должна быть способна подходящим

образом распределять нагрузку между двумя системами — костями и мягкими тканями, — чтобы предотвратить чрезмерное использование любой из них. Этого легко можно достичь при ходьбе с касанием пяткой.

■ КЛИНОВИДНЫЕ КОСТИ И ПОПЕРЕЧНАЯ АРКА СТОПЫ

Ладьевидная кость соединяется с тремя клиновидными костями — медиальной, промежуточной (срединной) и латеральной (рис. 4.27а). Их название произошло от греческого слова

cuneus — «клиновидный», которое идеально описывает форму этих костей. Такая клиновидная форма, широкая сверху и заостренная книзу, помогает формировать и поддерживать поперечную арку стопы. Обычно считается, что массив клиновидных костей выполняет роль костных замковых камней для поперечной арки стопы, а также обеспечивает стабильность общей формы стопы. Недавнее исследование показало, как поперечная кривая линии клиновидных костей к кубовидной кости повышает жесткость стопы при сходе с пальцев. В своей статье Венкадесан и др. (2020) отмечают, что контакт земли с передней частью стопы

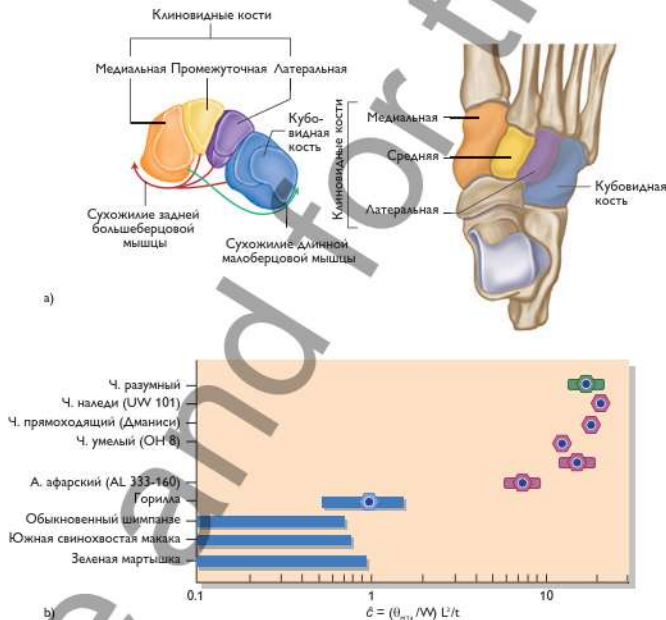


Рисунок 4.27. а) Поперечная линия от кубовидной кости до медиальной клиновидной кости поддерживает поперечную арку полукуполо стопы. Такая организация обеспечивается клинообразной формой костей и компрессионной силой нескольких сухожилий, в частности, сухожилий задней большеберцовой и длинной малоберцовой мышц, которые действуют, как петля, с подошвенной стороны стопы. б) Средняя кривизна поперечной арки стопы нескольких видов, наложенная на логарифмическую шкалу, позволяет легко сравнивать других приматов (гориллу и шимпанзе), ранних двуногих (Австралопитека афарского, *Homo habilis* (человека умелого), *Homo erectus* (человека прямоходящего) и *Homo naledi*) и современного человека (*Homo sapiens*). (Заимствовано у Venkadesan и соавт., 2020.)

и силы, действующие вокруг голеностопного комплекса, создают значительную изгибающую нагрузку по всей длине стопы. Таким образом, поперечная арка стопы создает еще один механизм «геометрической поддержки» для длины стопы, повышая ее общую устойчивость.

На рис. 4.27b показаны различия в кривизне дуги у других приматов (макаки, гриветы, шимпанзе и гориллы) и различных видов прямоходящих двуногих (которые могут быть или не быть предками *Homo sapiens*). Из диаграммы видно, что прямохождение имеет ряд преимуществ от наличия поперечной арки стопы, используя ее как в качестве потенциального амортизатора при касании пяткой, так и для создания жесткости. В статье Венкадесана утверждается, что, хотя большое внимание уделяется важности медиальной продольной арки стопы, продольная линия костей активно поддерживается поперечной аркой стопы. Поперечная арка стопы выполняет двойную — и, по-видимому, противоречивую — роль, поскольку позволяет раскрывать и адаптировать стопу в одной фазе и обеспечивает стабильность в другой. Тем не менее это лишний раз подчеркивает преимущества полукупола нашей стопы, поскольку именно трехмерная кривизна, а не отдельные арки стопы, обеспечивает естественную жесткость.

Как обычно, существует взаимодействие между костной (геометрической) и мышечной (силовой) поддержкой, благодаря которым стопа не прогибается во время подъема пятки при подготовке к сходу с пальцев стопы. Переключение арки клиновидных костей между двумя функциями (амортизацией и жесткостью) обеспечивается ротацией костей, особенно ротацией заднего отдела стопы, и расположением образующих петлю вокруг клиновидных костей и под ними мягких тканей (рис. 4.27), в частности, сухожилия задней большеберцовой и длинной малоберцовой мышц. Вид снизу (см. рис. 4.28) подчеркивает наличие множества связок между пяточной, ладьевидной и медиальной клиновидной костями. Как мы уже знаем из знакомства с пружинной связкой, связки обеспечивают стабильность, мобильность и потенциал упругости, но также они способствуют сопряженности движения между костями: если кость движется в одном направлении, то она увлекает за собой своих соседей.

Когда таранная кость вращается медиально на опоре таранной кости, пружинная связка натягивается, открывая щель между таранной и ладьевидной костями. Но связка также тянет за собой ладьевидную кость в том же направлении. Таранная, ладьевидная и медиальная



Рисунок 4.28. Как мы уже видели на рис. 4.19, по мере того как кости раздвигаются, пронация частично замедляется связками. Поддерживая расположенные над ними кости, подошвенные связки играют решающую роль в предотвращении разрушения стопы. Когда они удлиняются (деформируются), они поглощают энергию, которую затем можно повторно использовать для помощи обратному движению.

клиновидная кости вращаются медиально, при этом связанные с ними суставы выполняют латеральную ротацию (см. врезку на странице 100). Латеральная ротация, проходящая через суставы предплюсны (вызываемая медиальной ротацией проксимальных костей) раскрывает суставы и деформирует связки, работающие подобно команде пожарных, удерживающих у основания горящего здания батут для тех, кто собирается спрыгнуть: чтобы материя между ними натянулась, они должны раздвинуться.

Клиновидные кости упираются в кубовидную, и этот ряд из пяти костей — ладьевидной, трех клиновидных и кубовидной — образует средний отдел стопы (обратите внимание, что я добавил ладьевидную кость в обсуждение заднего отдела стопы по функциональным, а не анатомическим причинам). Кубовидная кость, названная так из-за своей квадратной формы, проходит между двумя поперечными составными суставами стопы.

Расположенные по обе стороны от кубовидной кости поперечный сустав предплюсны и предплюсне-плюсневый сустав, — как показывает использование их при ампутации и их подверженность тяжелым вывихам, — являются потенциальными слабыми местами в способности стопы обеспечить стабильный жесткий рычаг. Однако это привело к развитию костного выступа, который сцепляется с пяточной костью, «прерывая» линию, проходящую через поперечный сустав предплюсны, и обеспечивая односторонний механизм замыкания поперечного сустава предплюсны (рис. 4.30): замыкание при супинации, размыкание при пронации. Принято считать, что этот уникальный человеческий пяточно-кубовидный сустав помогает предотвратить перелом предплюсны, который нередко происходит в стопах приматов (рис. 4.30b), однако только лишь этого сустава недостаточно: также требуется поддержка со стороны мягких тканей (Holowka и Lieberman, 2018).

Перелом предплюсны — отсутствие геометрического замыкания в стопах нечеловекообразных приматов — все еще может присутствовать в некоторых человеческих стопах, несмотря на пяточно-кубовидный сустав (рис. 4.30c). Хотя перелом предплюсны не обязательно приводит к патологии,

он препятствует формированию жесткого рычага и создает дополнительную нагрузку на ткани при сходе с пальцев.

Пальпация кубовидной кости

Найдите шиловидный отросток у основания пятой плюсневой кости и исследуйте ткани проксимальнее и выше него. Проксимальнее отростка находится щель, над которой можно прощупать кубовидную кость.

Почувствуйте, как приподнимается кубовидная кость, образуя латеральную продольную арку стопы и обеспечивая проход для сухожилия длинной малоберцовой мышцы.



Рисунок 4.29. Закругленный конец пятой плюсневой кости (отмечен зеленым) можно легко пальпировать, он должен быть выровнен с блоком малоберцовой кости и задней поверхностью латеральной лодыжки. Кубовидная кость (помечена красным) подвешена над толстой жировой подушкой, которую легко найти.

Предплюсне-плюсневый сустав представляет собой линию между кубовидной и клиновидными костями проксимально и плюсневыми костями — дистально. Как упоминалось выше, эта линия не такая прямая, как поперечный сустав предплюсны, и, хотя она более подвержена травмам, ее реже выбирают для хирургической ампутации. Медиальная часть линии сустава прерывается разницей в длине медиальной и средней клиновидных костей; латерально линия сустава перекрывается шиловидным отростком, выступом пятой плюсневой кости (см. рис. 4.32 и 4.33). Каждая из этих «волн»

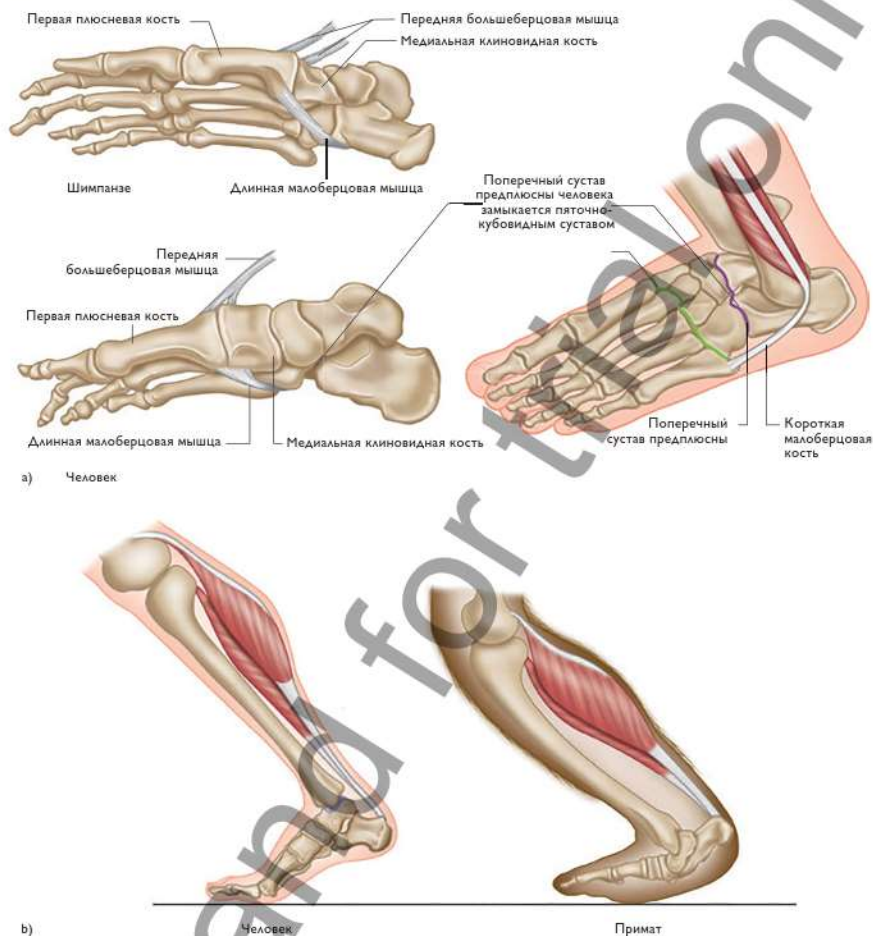


Рисунок 4.30. а) Наряду с торсией человеческой стопы и голени произошло удлинение кубовидной кости, которая удерживается на месте шиловидным отростком пятой плюсневой кости. При геометрическом замыкании поперечная арка стопы и связанный с ней поперечный сустав предплюсны дополнительно поддерживаются перекрывающим их пяточно-кубовидным суставом. Силовое замыкание и поддержка обеспечиваются натяжением короткой малоберцовой мышцы. Отсутствие пяточно-кубовидного сустава позволяет стопе примата складываться и не позволяет ей действовать в качестве жесткого рычага (б).

в суставной линии обеспечивает большую стабильность дистального взаимодействия между костями предплюсны и плюсневыми костями.

Как мы видели выше, поперечная арка стопы частично подвешена к череде клинообразных

клиновидных костей, а также поддерживается двумя малоберцовыми мышцами. Наряду с задней большеберцовой мышцей (см. рис. 4.27а) две малоберцовые мышцы поддерживают арку стопы с обеих сторон.

Длинная малоберцовая мышца пересекает подошву стопы, прикрепляясь к медиальной клиновидной кости, и тянет ее поперек, удерживая клиновидные кости вместе. Короткая малоберцовая мышца прикрепляется к шиловидному отростку пятой плюсневой кости и тянет пятую плюсневую кость назад к кубовидной кости и немного под нее (рис. 4.31 и 4.32а). Благодаря тому что пятая плюсневая кость и кубовидная кость остаются на месте, образуется канал, который позволяет длинной малоберцовой мышце проходить под кубовидной костью на пути к медиальной стороне стопы, чтобы прикрепиться к медиальной клиновидной кости.



Рисунок 4.31. Простое сгибание колена может обнажить сухожилия малоберцовой кости, поскольку они проходят по латеральной стороне стопы.

Реальное и относительное движение

Описание движения требует точности и последовательности, что не всегда легко. Одно соглашение, которого я стараюсь придерживаться в этом тексте, заключается в том, чтобы называть кость (реальное движение) или называть суставное движение (относительное движение).

Движение костей указывается в соответствии с нормальным анатомическим положением, т. е. кости могут двигаться медиально или латерально, в инверсию или эверсию и т. д. Относительное движение используется для описания взаимодействия между костями, т. е. движения в суставах, и обозначается в соответствии с положением дистальной кости относительно проксимальной кости в конечностях и в соответствии с движением выше расположенной кости, если речь идет об описании движения позвоночника.

Для того чтобы хорошо разобраться с реальными и относительными движениями, требуется некоторое время и практика, но начать стоит с точного понимания того, описываете ли вы движение кости или движение в суставе.



Рисунок 4.32 а) Кубовидная кость поддерживается шиловидным отростком пятой плюсневой кости, который удерживается на своем месте малоберцовой костью. Туннель, образовавшийся под кубовидной костью, обеспечивает длинной малоберцовой мышце путь к медиальной части стопы. б) Медиальная часть стопы, ладьевидная и медиальная клиновидная кости, в частности, имеют менее естественную архитектурную поддержку со стороны костей и требуют большей подъемной силы от мягких тканей. Наружные мышцы, которые обеспечивают некоторый контроль, — это передняя большеберцовая мышца, задняя большеберцовая мышца, длинный сгибатель большого пальца стопы и длинный сгибатель пальцев стопы.

Медialная клиновидная и ладьевидная кости (рис. 4.32b) хорошо поддерживаются различными сухожилиями, которые мы рассмотрим в следующей главе. На своем месте на вершине полукупола и в области взаимодействия с большими силами медialная клиновидная и ладьевидная кости для сохранения своей целостности нуждаются в упомянутом выше сочетании мышечной и связочной поддержки.

Три клиновидные кости различаются по длине, от передней к задней (рис. 4.33a). Длина более короткой промежуточной клиновидной кости компенсируется более длинной второй плюсневой костью, которая размещалась по линии предплюсне-плюсневых суставов. Медialная клиновидная кость является самой длинной из трех и выступает за основание второй плюсневой кости, благодаря чему образует сустав как с первой, так и со второй

плюсневыми костями. Латеральная клиновидная кость довольно аккуратно соединяется с третьей плюсневой костью, в то время как более толстая кубовидная кость соединяется с основаниями четвертой и пятой плюсневых костей.

Дистальная поверхность медialной клиновидной кости, — та ее часть, которая встречается с первой плюсневой костью, — выровнена немного медially. Это выравнивание является частичным наследием отведенного большого пальца стопы наших предков — особенностью, которая до сих пор присутствует в стопе шимпанзе (рис. 4.33b). Это не являлось бы проблемой, если бы мы до сих пор отводили большой палец и выполняли захват большими пальцами ног, но в ходе нашей эволюции наши основные шарнирные суставы расположились в соответствии с преобладающим у нас сагиттальным продвижением вперед. Для того чтобы первая

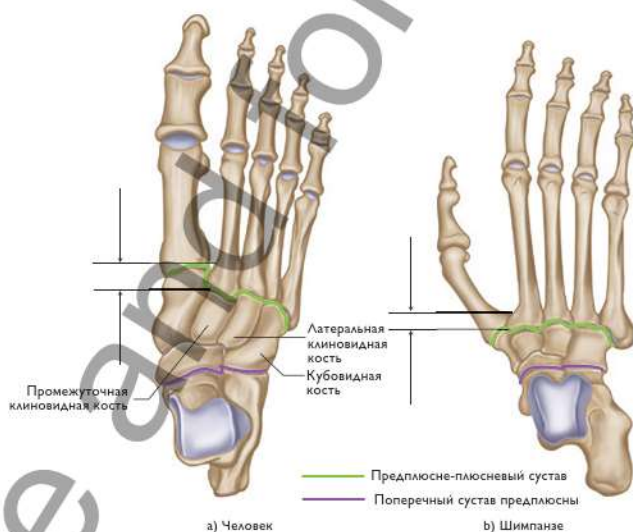


Рисунок 4.33. а) Три клиновидные кости различаются по длине, причем вторая (промежуточная клиновидная кость) является самой короткой. Это компенсируется более длинной второй плюсневой костью, что обеспечивает относительно равномерное размещение первого и второго плюснефаланговых суставов. Удлиненная медialная клиновидная кость обеспечивает еще один механизм фиксации за счет нарушения линии сустава поперек предплюсне-плюсневых взаимодействий. б) Для сравнения, стопа шимпанзе имеет более короткую медialную клиновидную кость, которая направляет первую плюсневую кость медially, а также обеспечивает меньшее перекрытие костей. Отсутствие сцепления между костями обеспечивает больше возможностей для движения, но снижает присущую стопе устойчивость.

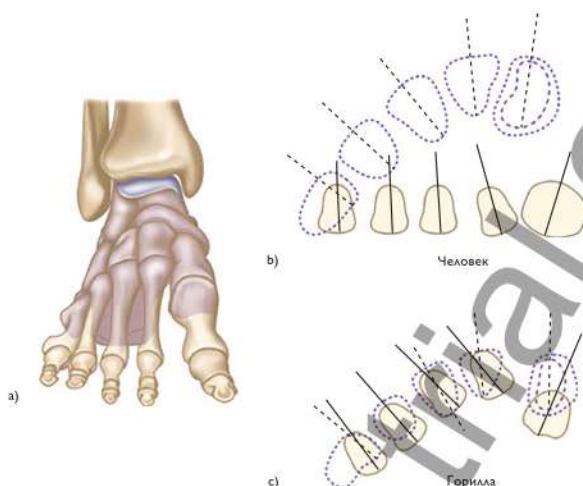


Рисунок 4.34. Для приподнятости купола средней части стопы человека (представлено заштрихованными контурами (a)) необходима торсия тел плюсневых костей, чтобы все головки плюсневых костей могли опуститься на землю. Сопоставление длинной оси оснований плюсневых костей (заштрихованные линии на b и c) с длинными осями головок (сплошные линии в b и c) указывает направление и величину торсии каждой кости.

плюсневая кость оказалась выровненной в сагиттальной плоскости и могла опустить свою головку на землю, в ходе эволюции произошло ее скручивание и некоторая латеральная торсия (Tamer и Simpson, 2017, см. рис. 4.34); мы видели аналогичный процесс с большеберцовой костью. Именно эта латеральная торсия первой плюсневой кости и медиальное выравнивание ее предплюсне-плюсневой сустава делает нас подверженными бурситам большого пальца стопы. Страшная вальгусная деформация большого пальца стопы может иметь множество возможных причин — генетика, обувь, неправильное использование, недостаток силы и т. д., — но на самом деле она берет свои истоки еще в том времени, когда мы предпочитали держать стопами предметы, а не втискивать их в тесную обувь.

Для того чтобы мы сохраняли устойчивость на земле, должно произойти скручивание не только первой плюсневой кости, но и остальных плюсневых костей, однако они скручиваются в противоположном направлении (см. рис. 4.34b).

Переход от хватания к тому, чтобы обеспечивать нам опору против действия силы

тяжести, потребовал от плюсневых костей некоторых изменений на пути от их оснований к головкам. Вместо того чтобы оставаться обращенными в сторону большого пальца ноги, им пришлось скрутиться медиально, чтобы встать на землю. Латеральное скручивание первой плюсневой кости и медиальное скручивание остальных плюсневых костей позволяют головкам всех плюсневых костей при опоре на землю оставаться на относительно прямой линии (рис. 4.34b).

■ ДОСТИЖЕНИЕ СХОДА С ПАЛЬЦЕВ

Хотя головки плюсневых костей опираются на землю, линия их суставов, если посмотреть на нее сверху, образует пологую кривую (рис. 4.35 и 4.36a). Одна из целей локомоции заключается в том, чтобы финальный контакт пальцев стопы происходил вдоль «поперечной оси», то есть вдоль головок первой и второй плюсневых костей, — это называется сходом с пальцев на «высокой передаче». Альтернативной «пониженной передачей»



Рисунок 4.35. Объединенные в параболу на рисунке ниже (рис. 4.36), две оси головок плюсневых костей имеют непосредственное отношение к положению стопы и голеностопного сустава при ходе с пальцев. Так называемое схождение «на высокой передаче» происходит по поперечной оси, в отличие от схождения «на низкой передаче», которое происходит по косой оси.

является косая ось — линия, идущая вдоль трех латеральных плюсневых костей. «Передача» относится к длине рычага от голеностопного

сустава: поскольку первая и вторая плюсневые кости длиннее, они находятся дальше от голеностопного сустава, чем другие плюсневые кости. Большее расстояние от плюснефаланговых суставов до голеностопного сустава при жесткой супинированной стопе создает более мощное схождение с пальцев.

Повышенная мощность является лишь одним из факторов схода с пальцев, выравнивание конечных точек контакта также влияет на траекторию прохождения силы через другие суставы дальше по механической цепи. Поперечная ось выровнена с таранным суставом, коленным суставом и прочными тканями передней части таза (для дальнейшего исследования см. «Рожденные ходить»).

Стопы других приматов демонстрируют сильное изменение направления вокруг головок плюсневых костей по сравнению со стопой человека (рис. 4.36a–d). Увеличенная парабола указывает на основную хватательную функцию стоп обезьян — хватательная стопа приматов использует противопоставление большого пальца стопы остальным пальцам стопы. Основная же роль стопы современного человека — это прямохождение, что делает движение вперед основным определяющим фактором нашего строения. Благодаря приведению большого пальца стопы теперь мы можем осуществлять схождение с пальцев на относительно

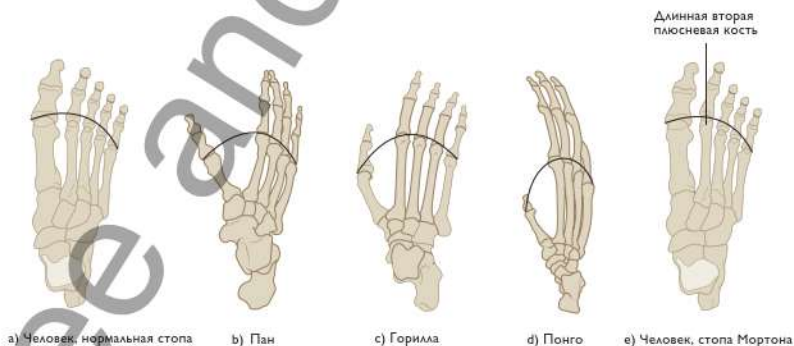


Рисунок 4.36. Неглубокая парабола вдоль головок плюсневых костей человека (a) была создана рядом анатомических изменений, как описано выше. Выравнивание первой и второй плюсневых костей способствует отрыву пальцев преимущественно в сагиттальной плоскости. Неглубокая у человека, эта парабола имеет большую кривизну у других обезьян (b–d). Однако присутствие относительно более длинной второй плюсневой кости, так называемой стопы Мортон, может повлиять на функционирование и выравнивание стопы при ходе с пальцев (e).

стабильном основании первого и второго плюснефаланговых суставов (см. рис. 4.37).

Согласно Мортону, относительное положение первой и второй плюсневых костей было одной из наиболее важных их особенностей, поскольку именно они обеспечивают последние точки контакта перед сходом с пальцев стопы. По мере того как мы приближаемся к разгибанию пальцев стопы при подготовке к сходу с пальцев, нам необходим устойчивый контакт с землей, по крайней мере, в двух точках контакта — первом и втором плюснефаланговых суставах. Плюснефаланговые суставы — это преимущественно блоковидные суставы, поэтому когда они складываются назад при разгибании, они выравниваются с таранным, коленным и передним отделом тазобедренного сустава. Некоторые могут даже продолжить эту линию прохождения силы дальше к позвоночнику и к прямой мышце живота, контролирующей результирующее разгибание позвоночника (см. рис. 4.37).

Мортон был настолько одержим этой особенностью, что посвятил ей значительную часть своего текста 1935 года. Он обнаружил тенденцию к тому, что вторая плюсневая кость была относительно более длинной, чем первая, и с тех пор это состояние было названо в его честь — стопа Мортонa (см. рис. 4.36е и 8.11). У этой одноименной проблемы множество причин и столько же сопутствующих патологий. Мортон обвинял неподходящую обувь как основную причину тех случаев, с которыми он сталкивался. Он имел твердые взгляды на тот выбор, который делали многие женщины его времени: «Обувь на высоком каблуке следует рассматривать как мощный и порочный фактор в развитии заболевания стопы. ...Если бы можно было ограничить ее использование только лишь вечерними часами, это почти устранило бы ее пагубное влияние на развитие данной дисфункции». (1935, стр. 174).

Оставив в стороне любой подразумеваемый сексизм, Мортон считал стискивающие пальцы носы обуви и приподнятую пятку основными виновниками нарушения выравнивания, при котором большой палец стопы уходит в состояние аддукции (приведения) (рис. 4.38), создавая известный изгиб большого пальца стопы



Рисунок 4.37. Расположение первого и второго плюснефаланговых суставов позволяет направленной вперед силе инерции воздействовать на многие суставы тела, приводя их в разгибание.



Рисунок 4.38. Обращенная медиально суставная поверхность медиальной клиновидной кости способствует отведенному положению большого пальца стопы у других приматов и его способности хватать. Клиновидная кость человека сохраняет тенденцию к медиальной наклонности, что делает нас предрасположенными к вальгусной деформации.

(бурсит) в первом плюснефаланговом суставе. Этот изгиб вызван приведением фаланги, которое, в свою очередь, способствует отведению

первой плюсневой кости. Таким образом, развитие бурсита может привести к функциональной стопе Мортона, которая является развившейся, а не структурной деформацией (когда две кости срослись, смещая суставы).

Положение и выравнивание плюснефаланговых суставов являются не просто факторами длины плюсневых костей, они создаются кумулятивным эффектом линии костей, соответствующих каждому пальцу стопы. Непосредственно проксимальнее большого пальца стопы находится первый луч — линия костей, состоящая из первой плюсневой, медиальной клиновидной и ладьевидной костей. Соседний второй луч состоит из второй плюсневой кости, промежуточной клиновидной кости и ладьевидной кости*. Положение плюсневых суставов, связанных с каждой линией, является функцией относительной длины между костями в этой линии. Когда мы сравниваем первый луч со вторым, мы видим, что вторая плюсневая кость структурно длиннее первой, но она продолжается промежуточной клиновидной костью, которая намного короче медиальной клиновидной кости.

Сравнивая стопу шимпанзе со стопой человека, мы видим, что стопа человека имеет более длинную медиальную клиновидную кость (см. рис. 4.36). Эта адаптация была необходима, чтобы приподнять внутреннюю арку стопы человека, но при этом обеспечить контакт плюснефаланговых суставов с землей. Удлинение медиальной клиновидной кости также обеспечивает дополнительную безопасность вдоль линии предплюсне-плюсневых суставов из-за увеличенной вставки (см. рис. 4.33 и 4.36). Таким образом, чтобы выявить наличие стопы Мортона, необходимо не просто сравнить длины плюсневых костей, а скорее провести оценку совокупной длины каждого луча (рис. 4.39).

Если второй плюснефаланговый сустав более выдвинут вперед относительно других плюснефаланговых суставов, стопа может искать дополнительную устойчивость путем опускания



Рисунок 4.39. Найдите линию первого и второго плюснефаланговых суставов, разогнув первый, а затем второй плюснефаланговый сустав (а и б). Не двигая кожу, сделайте отметки вдоль линий суставов и затем сравните их с положением суставов в нейтральном положении (с).

* Следует отметить, что, по-видимому, нет реальной согласованности в отношении того, сколько костей должно быть включено в «луч». Некоторые используют только плюсневую и клиновидную формы, другие добавляют ладьевидную, а третьи добавляют пяточную кость.

или скручивания, что поможет ей поставить первый или третий плюснефаланговый сустав рядом со вторым, когда стопа поднимается в фазу переката через пальцы стопы.

Пережат на «мячике» второго плюснефалангового сустава в медиальном или латеральном направлении можно наблюдать у идущего сзади при расклевывании пятки пораженной стопы в одну или в другую сторону в момент, когда стопа переходит к этапу разгибания пальцев стопы. Это сосредотачивает усилия на одной точке контакта, а не на двух, оказывая дополнительное давление на головку второй плюсневой кости, что может повлиять на нагрузку на кость. Это также создает дополнительную нагрузку на кожу, что обычно приводит к образованию дополнительных мозолей.

Рисунок мозолей может указывать на используемые клиентом адаптации движения. Прямая линия мозолей указывает на сагиттальное продвижение вперед, создающее дополнительную нагрузку на область второго плюснефалангового сустава; круглая форма указывает на ротационную стратегию, которая обычно представляет собой попытку приземлиться на один из соседних плюснефаланговых суставов для дополнительной стабильности.

Первая плюсневая кость — самая короткая и самая толстая из череды миниатюрных длинных костей, но несколько уникальных особенностей придают ей дополнительную функциональную длину. Наиболее очевидной из них является наличие двух сесамовидных костей (названных так, потому что они напоминают семена кунжута!) под головкой плюсневой кости. Две сесамовидные кости расположены внутри сухожилий короткого сгибателя большого пальца стопы и частично контролируются ими. Такое расположение позволяет сесамовидным костям следовать траектории движения выпяляющей головки плюсневой кости и обеспечивает головке плюсневой кости платформу, по которой она может перекачиваться, когда сустав переходит в разгибание (см. рис. 4.40).

Разгибание первой плюсневой кости представляет собой сложное действие: оно требует пережат головки плюсневой кости по сесамовидным костям, но из-за повышенной прочности головка первой плюсневой

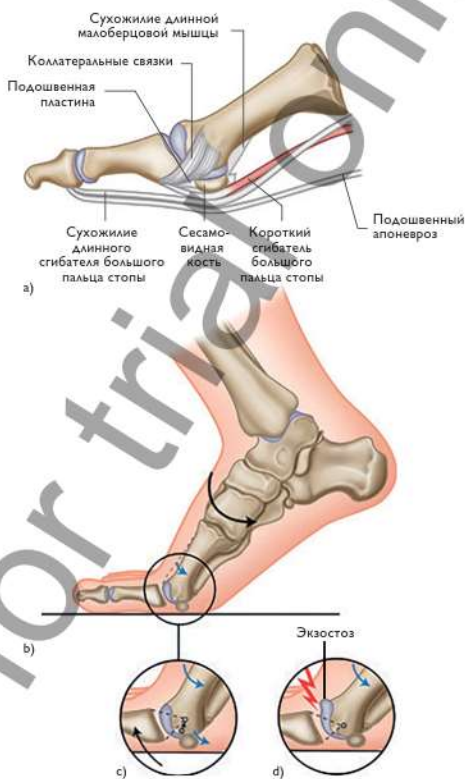


Рисунок 4.40. Для разгибания первого плюснефалангового сустава (а) требуется серия скоординированных событий. При подъеме пятки сустав выполняет разгибание в диапазоне от 0° до 20° (б), в промежутке от 10° до 50° первая плюсневая кость должна быть «уведена» назад за счет подошвенного сгибания, частично создаваемого длинной малоберцовой мышцей (с). Первая плюсневая кость уходит в подошвенное сгибание, слегка перекачиваясь назад через сесамовидные кости, что помогает создать больше суставного пространства для дальнейшего скольжения костей в разгибание (с). Нарушение в работе этой системы создает «заклинивание» поверхностей костей, которое потенциально может привести к экзостозу (разрастанию кости), который еще больше ограничивает подвижность сустава (д).

кости имеет большую суставную поверхность, что увеличивает радиус ее движения при разгибании. Важно отметить, что для обеспечения

* Плюсневые кости классифицируются как длинные кости, хотя они относительно коротки по сравнению с берцовой и плечевой костями.

достаточного движения в суставе первая плюсневая кость должна использовать свое третье преимущество — способность к подошвенному сгибанию.

При подъеме пятки плюснефаланговые суставы вынуждены разгибаться из-за их контакта с землей. Плюснефаланговые суставы действуют во время движения подобно шарниру, но по мере того как пятка поднимается, длинная малоберцовая мышца тянет первую плюсневую кость назад и вниз, раскрывая первый плюсневый сустав и обеспечивая дополнительный диапазон движения. Скольжение головки плюсневой кости назад оказывается возможным благодаря двум сесамовидным костям. Гладкие верхние поверхности сесамовидных костей позволяют головке плюсневой кости скользить назад, и их правильное размещение под головкой первой плюсневой кости имеет решающее значение и нередко является тем фактором, который влияет на мышечный дисбаланс или неправильную механику.

Недостаток разгибания большого пальца стопы также может привести ко многим адаптациям, таким как уменьшение длины шага или поворот стопы внутрь или наружу (мы рассмотрим некоторые причины потери разгибания в главе 8). Последний пример может также привести к образованию костной мозоли, что может указывать на предпочтительную стратегию компенсации. «Читать» мозоли не так сложно, как может показаться на первый взгляд, поскольку они просто показывают, какие области испытывают дополнительную нагрузку. Они редко являются диагностическими сами по себе, но могут быть полезными индикаторами областей, испытывающих высокий уровень нагрузки.

Как мы видели выше, мозоль вдоль линии головки второй плюсневой кости может быть признаком стопы Мортон, но гипермобильность или нестабильность первого луча также может быть причиной мозолистого рисунка. Оба состояния создают дополнительную нагрузку на вторую плюсневую кость и могут привести к ее гипертрофии. Обычно в одной и той же стопе сочетаются более длинный второй луч и гипермобильный первый луч. Гипермобильность первого луча усугубляет проблему поиска

стабильной основы для схождения с пальцев и может оказывать значительное влияние на остальную часть механической цепи.

Положение стопы в момент схода с пальцев определяется множеством факторов — мобильностью голеностопного сустава, скручиванием большеберцовой кости, стабильностью пальцев стопы, диапазоном движений и т. д. Важно проследить проблемы выше и ниже по всему телу, чтобы найти фактического виновника, поскольку рисунок мозолей, созданный любым из этих факторов, может выглядеть очень похоже. Цель данного текста не в том, чтобы углубиться во все более сложный мир дифференциальной диагностики, а в том, чтобы создать основу для понимания, благодаря которой будет намного легче понять значение любого теста.

■ ДИСТАЛЬНАЯ ПОПЕРЕЧНАЯ АРКА СТОПЫ

Существуют некоторые споры по поводу терминологии поперечной «арки». В некоторых источниках будут перечислены проксимальные и дистальные поперечные арки; некоторые упоминают только проксимальные. Как уже говорилось, нет никаких сомнений в строении и важности проксимальной арки, проходящей поперек стопы от клиновидных костей до кубовидной кости. Дистальная арка не имеет такой же костной поддержки, и поэтому некоторые не считают ее аркой. Вместо этого она опирается на ряд мягких тканей, которые играют важную роль во время пронации и супинации.

У пронации есть два основных преимущества: амортизация и помощь стопе в адаптации к рельефу. Небольшое раскрытие суставов во время пронации обеспечивает стопе больше гибкости, позволяя при ходьбе изгибаться в соответствии с контурами поверхности, и в главе 7 мы также увидим, что расширение стопы помогает внутренним мышцам производить больше силы. Адаптация передней части стопы облегчается за счет относительной отделенности друг от друга головок плюсневых костей, которые охватываются рядом коротких тканей, обеспечивающих естественную свободу дистальным костям.

Плюсневые кости стабильны проксимально (из-за плотного положения) и подвижны дистально. Чтобы сохранять это соединение, но облегчить движение, фиброзные суставные капсулы головок плюсневых костей скреплены глубокой поперечной связкой (см. рис. 7.14). Это соединение мягких тканей обеспечивает подвижность головок плюсневых костей, тем самым увеличивая общий диапазон движения пальцев стопы. Постепенное увеличение подвижности стопы от проксимальной части к дистальной отражает организацию запястья и пястных костей кисти руки.

■ ФАЛАНГИ — ПАЛЬЦЫ СТОПЫ

Переходные суставы между плюсневыми костями и фалангами (плюснефаланговые суставы) не являются в чистом виде блоковидными суставами, обеспечивающими чистое сгибание и разгибание: они слегка закруглены и классифицируются как мыщелковые суставы. Можно легко увидеть, что это означает, сгибая и разгибая пальцы ног. Как и в случае с пальцами руки, пальцы ног при сгибании сводятся, скручиваясь таким образом, как будто они что-то хватают; и, наоборот, когда пальцы стоп разгибаются, они разводятся, как будто опускают, — ценное преимущество для тех, кому приходится использовать ноги вместо рук, поскольку это позволяет контролировать и опускать инструменты.

В каждой стопе по 14 фаланг — две в большом пальце стопы и по три в остальных. Таким образом, в большом пальце стопы имеется лишь один межфаланговый сустав, а у остальных — по два: проксимальный и дистальный. Действуя как относительно простые блоковидные суставы, межфаланговые суставы требуют сложного расположения мягких тканей для управления их движением, и мы рассмотрим их в главе 7.

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

Костная структура и функции стопы тесно взаимосвязаны, и для полноценного понимания

стопы необходимо понимать и то, и другое. Стопа представляет собой функционирующее целое, которое должно справляться с большими силами, возникающими при передвижении. Рассеивание удара при первом контакте с поверхностью, изменение своих изгибов в соответствии с контуром поверхности, возвращение обратно к состоянию жесткого рычага для того, чтобы справиться с силами, возникающими при ходе с пальцев, и направить их — для осуществления всего этого требуется работа множества частей, объединенных в функциональное целое. Для понимания «целого» необходимо оценить значение его частей, но их форма имеет смысл лишь в контексте их функции. Замкнутый круг!

Сила тяжести, сила инерции и сила реакции опоры действуют на уникальную архитектуру стопы, помогая переключаться между пронацией и супинацией. Разные векторы сил, действующие на имеющие определенную форму кости, создают достаточно предсказуемую реакцию*.

Теперь, когда мы расставили по местам большинство элементов, вы можете понять, почему в упражнении в начале этой главы ваша левая стопа была пронирована, а правая — супинирована. Когда вы поворачиваете свое тело вправо, туловище и таз будут следовать за вашей головой вправо. Ротация таза заставит ваши бедра также выполнять ротацию вправо, но левое бедро будет ротироваться медиально, а правое — латерально. Две голени будут следовать за расположенными над ними бедренными костями, заставляя малоберцовые кости и, следовательно, лодыжки также выполнять ротацию. Как мы уже видели выше, ротация лодыжек связана с ротацией таранной кости каждой стопы через взаимодействие по принципу «гнезда и шипа».

Медиальная ротация левой таранной кости побуждает пяточную кость к медиальному наклону и запускает серию событий, которые разблокируют костную архитектуру стопы.

* Обратите внимание, что «целая реакция» может быть подавлена вмешательством мягких тканей и нервной системы: мы не полностью во власти костей, сил и мышечных реакций. Цель этой книги состоит в том, чтобы лишь наметить общие закономерности и ознакомиться с ними.

Тем временем кости правой стопы сближаются, плотно «упаковываясь» в более компактную и жесткую структуру, — реакция, вызванная сцеплением между латерально вращающимися лодыжками и задней частью стопы. Такое плотно прилегающее положение супинатора обеспечивает устойчивость стопы и позволяет ей справляться с силами, действующими при схождении с пальцев стопы. Сход с пальцев «на высокой передаче» с супинированной стопой также создает выравнивание плюснефаланговых и таранного суставов, что позволяет движению проследовать вверх по остальному телу.

При сходе с пальцев необходим жесткий рычаг супинированной стопы, который поддерживается рядом функций:

- выравниванием первого и второго плюснефаланговых суставов;
- неравномерной формой составных суставов в стопе;

- клиньями поперечной арки стопы;
- поддержкой таранной кости, обеспечиваемой опорой таранной кости;
- сопряженной ротацией лодыжек и таранной кости.

Знакомство с этими взаимодействиями форм подготовит нас к следующим главам, в которых описываются силовые реакции, обеспечиваемые миофасциями. Форма костей обеспечивает пути для мышц и их сухожилий, а натяжение этих мягких тканей помогает поддерживать целостность составного «жесткого рычага». Хотя мы в основном имеем дело с костями и мягкими тканями в отдельных секциях, для понимания системы их необходимо иметь представление об их совместном действии. Наши следующие главы помогут поместить их в контекст и сначала рассмотреть те преимущества, которые обеспечивают нам мягкие ткани в целом (глава 5), а затем исследовать некоторые истинные функции отдельных мышц (главы 6 и 7).

МЯГКИЕ ТКАНИ И ИХ ФУНКЦИИ

Помните: если все, что вы знаете о мышце, — это ее действие, возможно, вы так и не поняли ее функцию.

Джек Стерн, 2003

■ ВВЕДЕНИЕ

Традиционно при чтении текстов по анатомии возникает впечатление, будто мышцы являются основными двигателями тела, но в реальности все гораздо интереснее. При изучении костей в предыдущих главах мы сосредоточились на силе тяжести и силе реакции опоры, и теперь, когда мы интегрируем в картину мягкие ткани, мы должны добавить третью силу — инерцию*. Ниже мы увидим, что мышцы гораздо более переменчивы в своих действиях,

чем нас заставили поверить: в разное время они могут функционировать в разных направлениях; они могут «сокращаться» без изменения длины; и мышечные волокна могут даже укорачиваться, в то время как ткань вокруг них удлиняется.

Как только в движении появляется инерция, мышцы начинают работать совместно с окружающими коллагеновыми тканями, оптимизируя эффективность за счет задействования упругой энергии и различных уровней жесткости.

Очень многие из нас страдали от несоответствия между той анатомией, которую нам преподают, и тем, что мы обнаруживали в клинической практике и в «реальном мире». Необходимо знать перечень «действий» мышц для того, чтобы сдать экзамены; однако нередко этот перечень не соответствует тому, что происходит, когда мы наблюдаем за движением человека. Несоответствие между тем, что мы изучаем, и тем, что мы видим, привело к появлению множества «анатомических мифов» — наложению анатомии из учебника на движение. В лучшем случае, эти мифы крайне ограничивают, в худшем — просто ошибочны. Если бы мы начали наше исследование

* Хотя официально инерцию можно определить как массу, умноженную на скорость, здесь для описания движения я использую это понятие в бытовом смысле, чтобы не перегружать читателя ненужными уравнениями. Для тех же, кто хочет погрузиться в дальнейшее исследование, есть множество других источников.

с движения, а уже затем посмотрели на анатомию, жизнь была бы намного проще.

Как мы уже видели в этом тексте, одной из основных проблем был язык, необходимый для описания того, что мы видим. К счастью, есть множество хороших инструментов и полезных словарей, которые могут помочь нам разобраться и понять анатомию движения. Однако многие из этих инструментов либо плохо преподаются, либо недостаточно исследуются во время нашего обучения, что означает, что в нем отсутствует трехмерный контекст, необходимый для «оживления» анатомии. Каждая из приведенных ниже концепций достойна отдельного учебника, и есть множество полезных ресурсов, если вы хотите углубиться в их изучение. Моя же цель здесь состоит в том, чтобы обеспечить прочную основу, которая поможет более глубоко понять, как движение и анатомия взаимодействуют через тело.

Наши стопы являются первой и последней точкой контакта с землей во время наиболее типичного для нас движения — походки, и их мягкие ткани справляются со значительным уровнем нагрузки. Стопы должны рассеивать часть этой силы, но они также могут перерабатывать и перенаправлять часть этой силы для снижения мышечной нагрузки. Однако прежде чем мы действительно сможем понять истинные функции наших стоп, нам необходимо понять несколько основных аспектов функциональной анатомии. В этой главе мы исследуем движение в открытой и закрытой цепи, роль инерции, соотношения силы-длины и скорости, структуру мышц и то, как по форме мышц можно интерпретировать функцию. В этой главе мы начнем знакомиться с множеством динамических свойств фасциальных тканей, не только с фасцией, окружающей каждую мышцу, но и с их компартментами.

Это уже немало. Возможно, вы уже слышали о некоторых из этих элементов и даже пострадали от них, но в этой главе они собраны вместе для того, чтобы продемонстрировать взаимодействие и значение каждой концепции. Хотя временами избыток терминологии может утомлять, важно добиться некоторой

степени свободного владения каждой концепцией, и каждое приведенное здесь слово будет помогать вам лучше понять ту более широкую идею, которую оно представляет. Если этот материал является для вас новым, я рекомендую вам в первый раз быстро прочитать этот раздел и перейти к остальной части книги, а затем уже снова вернуться к этому разделу с новым видением и пониманием. Это моя самая любимая глава в этой книге. Надеюсь, что она станет такой же и у вас.

■ «ДЕЙСТВИЕ» — ЭТО НЕ ВСЕГДА ТО ЖЕ САМОЕ, ЧТО «ФУНКЦИЯ»

Как намекает нам выше Стерн, изучаемые нами действия мышц и выполняемые мышцами функции — это не всегда одно и то же: иногда они совпадают, и когда это происходит, все становится довольно легко. Но чтобы понять более обширную картину того, что происходит с телом в повседневных движениях, мы должны избавиться от некоторых предубеждений, — о которых мы порой даже не подозревали, — и быть в состоянии увидеть мышцу в контексте ее окружения. Мортон много говорил о «взаимодействии» и о том, что тело лучше всего рассматривать как сложную экосистему, в которой любое изменение в одной ткани или в одной области повлияет на все остальное. Если мы примем идею того, что тело — это экосистема, особенно когда оно движется, тогда мы начнем видеть всю приющую ему сложность.

Мы можем продолжить развивать идею «экосистемы» дальше. Согласно определению, экология — это изучение организмов и их взаимодействия с окружающей средой. Как мы видели в главе 2, наше стремление к прямохождению часто считается реакцией на изменение климата и сокращение лесного покрова. Возможно, по мере того как в конце миоцена окружающая среда становилась все более жаркой, а деревья — более рассредоточенными, поиск более эффективного способа передвижения, который также помогал бы уменьшить воздействие солнечного света и обеспечивал лучший обзор поверх высокой

травы, и привел нас к поддержанию вертикального положения. Мало того, что человеческое тело является экосистемой, его форма и функции изменяются под влиянием более широкой экосистемы, частью которой оно является.

Основная проблема со сложными системами заключается в том, что непонятно, как отследить, измерить и описать все внешние колебания, вызванные изменением какой-либо одной переменной. Вспомните заезженную историю о взмахе крыльев японской бабочки, вызвавшей цунами в Сан-Франциско; кто-нибудь сможет перечислить здесь все взаимозависимые факторы? Этот вопрос отражает одну из проблем в области биомеханики, в которой очень часто звучат формулировки, кажущиеся линейными: если X , то Y .

В действительности же такой подход не работает, поскольку между X и Y существует множество других промежуточных переменных. Из-за сложности устройства человеческой системы нам приходится смиряться с тем, что мы не знаем всех ответов, однако при этом стремиться к развитию гибкости в том, как мы интерпретируем действующие на нашу систему силы и реакции.

Первое, что необходимо сделать, — это отказать от характерной для текстов по анатомии установки «действие есть функция». Простым примером того, как мы наложили анатомические истории X и Y на наше понимание мягких тканей, является «действие» ягодичных мышц. Эти мышцы, известные в своей совокупности как «отводящие мышцы», по своей функции в такой же степени предотвращают ПРИведение, как и создают ОТведение. Если мы стоим на одной ноге, возникает смещение между опорой, обеспечиваемой стоящей на земле конечностью, и направленной вниз силой центра тяжести тела. Это смещение, аналогичное по своей сути смещению таранной и пяточной костей, описанному в предыдущих главах, требует определенного контроля, и этот контроль обеспечивается группой ягодичных мышц (рис. 5.1).

Во время фазы опоры при ходьбе ягодичные мышцы не столько отвечают за отведение, сколько препятствуют приведению — они не дают тазу слишком сильно опускаться вниз



Рисунок 5.1. Хотя ягодичные мышцы действительно отвечают за отведение бедра, они так же часто задействуются для замедления и контроля приведения и ротации бедра во время ходьбы. Они играют важную роль в поддержании латеральной стабильности таза, когда мы выполняем перенос другой ноги вперед, тем самым помогая нашей ходьбе на двух ногах.

со стороны ноги, которая переносится вперед. Контроль приведения — это та роль, которую они выполняют при каждом шаге и которая необходима из-за смещения взаимодействия между нашим центром тяжести и силой реакции опоры. Поначалу такое смещение может показаться слабым местом в системе, но у каждого из них есть своя цель, и, как мы увидим далее, при добавлении в игру фактора инерции они обеспечивают функциональные преимущества.

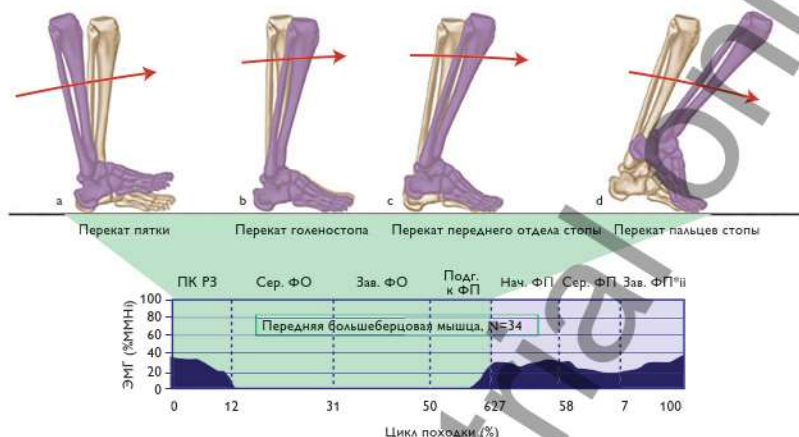


Рисунок 5.2. В момент касания пяткой голеностопный сустав находится в тыльном сгибании, но затем вынужден немедленно перейти в подошвенное сгибание. Из показаний ЭМГ мы видим, что передняя большеберцовая мышца активна в время фазы переноса (62–100%) и приводит стопу в положение тыльного сгибания при подготовке к касанию пяткой. Сразу после касания пяткой (0–2%) голеностопный сустав выполняет подошвенное сгибание, но передняя большеберцовая мышца все еще активна, обеспечивая контролируемое опускание стопы. (Займствовано у Perry и Burnfield, 2010)

Инерция бывает очень полезна, например, спортсменам в беге или прыжках, но ее также необходимо контролировать. В наших синовиальных суставах практически отсутствует трение, поэтому, как только мы начинаем двигаться, нам требуется регулирующий механизм, который бы предотвращал постоянное ускорение и не давал бы нам пропустить цель. Сначала это может быть непросто увидеть, но мышцы могут как обеспечивать инерцию тела, так и контролировать ее. Для того чтобы нарушить инерцию и заставить нас двигаться, нам необходимо сокращение мышц, однако нам также требуется мышечное напряжение, чтобы управлять движением, — функция, аналогичная той, которую выполняют отводящие мышцы,

контролируя приведение. Сравнение Мортонем работы мышц с человеком, управляющим инвалидной коляской, особенно удачно: на некоторых этапах мышцы активно работают, создавая движение; иногда они оказывают сопротивление движению; а иногда они могут спокойно подстраиваться и в одну, и в другую сторону, чтобы поддерживать нужный импульс.

Чтобы добавить к этой идее контроля инерции контекст, мы можем взять пример с первым из четырех перекатов стопы, перекатом пятки. После касания пяткой в голеностопном суставе происходит быстрое подошвенное сгибание; неспособность контролировать это движение приводит к шлепающей стопе, являющейся частым исходом после инсульта в результате потери или ингибирования нервной регуляции передней большеберцовой мышцы. В данном примере утраченная функция передней большеберцовой мышцы заключается не в создании тыльного сгибания, а в замедлении и контроле подошвенного сгибания, то есть в контролируемом удлинении мышцы (рис. 5.2).

* ii (прим. переводчика)

ПК PЗ — Первичный контакт Реакция загрузки

Сер. ФО — Середина фазы опоры

Зав. ФО — Завершение фазы опоры

Подг. к ФП — Подготовка к переносу

Нач. ФП — Начало фазы переноса

Сер. ФП — Середина фазы переноса

Зав. ФП — Завершение фазы переноса

Я предпочитаю называть оба конца местами прикрепления, — мышечными или сухожильными, в зависимости от обстоятельств, — и вообще опускаю термин «начало».

Т. С. Эллис, 1889, «Человеческая стопа»

Когда вы впервые изучали анатомию, вы, возможно, думали, что только вас этот процесс так расстраивает, но, как вы можете видеть из приведенной выше цитаты, жалобы на идею наличия у мышц «начала» и «прикрепления» мышц существовали уже в 1889 году. Несмотря на жалобы Эллис, многие тексты до сих пор описывают концентрическое действие как приближение «места прикрепления» мышцы к ее «началу», и наоборот — в случае эксцентрического сокращения, в то время как изометрическое сокращение не изменяет расстояние между двумя точками прикрепления. Для нас важно помнить, что тексты по анатомии (и тесты по анатомии!!) упорно настаивают на приоритете концентрических сокращений над любыми другими формами сокращений.

Многие стандартные источники перечисляют начало, прикрепление и действия, потому что они изображают какое-то воображаемое тело, парящее в пространстве, с явно свободно парящими конечностями. Преимуществом этого является то, что из уравнения исключаются все усложняющие его факторы (сила тяжести, сила реакции опоры, сила инерции и т. д.), а действия относительно просты. В результате, когда у такого «парящего тела» какая-то мышца «сокращается», это создает движение самой легкой части тела. Однако эта ложная теоретическая установка, используемая в стандартных для анатомии перечнях «действий», не указана в начале ни в одном из текстов, которые я читал. Каждый текст по анатомии должен сопровождаться вступительным предупреждением о том, что все «действия» мышц подразумевают реакцию в открытой цепи на сокращение одной мышцы из анатомического положения.

«Открытая» и «закрытая цепь» — это термины, которые используются для различения положения конечностей. В движениях в открытой цепи конечности не зафиксированы и поэтому двигаются больше, чем туловище, — именно эти движения подобны тем, которые описываются в книгах по анатомии как «действия» мышц. В движениях в закрытой цепи, наоборот, конечность каким-то образом зафиксирована (например, стопа стоит на земле), а туловище движется относительно конечности.

Мы видели пример движения в закрытой цепи ранее, когда исследовали перекаты стопы. Когда стопа временно «заякорена» на земле, тело перемещается над ней (рис. 5.3). Однако как только стопа освобождается в момент схождения с пальцев, движение конечности продолжается в открытой цепи, пока конечность движется вперед относительно туловища, готовясь к следующему касанию пяткой. Таким образом, походка представляет собой чередующуюся последовательность реакций с открытой и закрытой цепью.

По мере того как тело перемещается над стопой, мышцы ноги должны контролировать движение и предотвращать чрезмерное ускорение тела. Одним из способов визуализации мышечной активности во время движения является использование показаний электромиографии (ЭМГ) (см. рис. 5.4), поскольку они могут точно сказать нам, когда и с какой примерно силой включается та или иная мышца. Однако чего эти показания не могут нам подсказать, так это направления изменения длины, если оно вообще есть, внутри мышечных волокон. Сигналы ЭМГ говорят нам лишь о том, что мышца работает, а не о том, работают ли они концентрически, эксцентрически или изометрически. Чтобы получить представление об изменении длины, нам необходимо сопоставить сигналы ЭМГ с движением в связанных с мышцами суставах во время цикла ходьбы.

Приведенные на рис. 5.4 значения показывают, что подошвенные сгибатели включаются при тыльном сгибании в таранном суставе, и они продолжают быть активными, контролируя тыльное сгибание, до схождения с пальцев (в основном между 12% и 50%

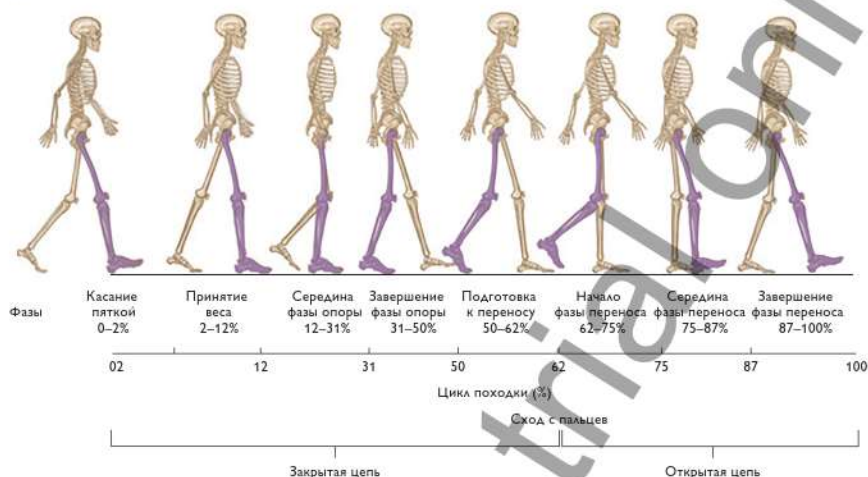


Рисунок 5.3. Во время фазы опоры стопа закреплена, а остальная часть тела перемещается над ней, создавая движение в «закрытой цепи». Когда любая нога освобождается для того, чтобы выполнить перенос вперед, движение вновь возвращается в «открытую цепь».

цикла). Показания ЭМГ не имеют смысла, если мы ограничиваемся только перечисленными в учебниках «действиями», и приобретаю смысл, когда мы рассматриваем их в контексте их реальной функции (подробнее об этом мы поговорим в главе 6).

Чтобы понять, какую роль во время ходьбы играют подошвенные сгибатели, мы должны разбить фазу опоры на части, поскольку в ходе нее изменяется функция мышц, что нередко приводит к путанице. После касания пяткой опорная нога замыкает механическую цепь с этой стороны, в то время как другая нога совершает движение вперед в открытой цепи, создавая инерцию для всего тела. Инерция от переноса ноги вперед приводит опорную стопу в тыльное сгибание, и в конечном итоге пятка приподнимается, создавая подошвенное сгибание в голеностопном суставе.

Все подошвенные сгибатели активны на протяжении каждого из этих движений. Сначала они замедляют или контролируют активное тыльное сгибание до момента переката передней части стопы, когда пятка начинает подниматься. Как только пятка поднялась, подошвенные сгибатели остаются активными,

предотвращая тыльное сгибание и завал стопы по мере того, как вес тела перемещается вперед, готовясь к схождению с пальцев стопы.

Как только пятка поднимается, в голеностопном суставе начинает происходить подошвенное сгибание, что обычно интерпретируется как прямой результат активности подошвенных сгибателей. Но я немного не соглашусь. Я согласен, что это может произойти именно таким образом, но я также считаю, что это происходит из-за инерции и реакции тазобедренного сустава. Пятка опорной ноги поднимается в ответ на инерцию, создаваемую махом другой ноги, и на достижение предела доступного разгибания бедра со стороны опорной ноги. Чтобы лучше это почувствовать, давайте немного поэкспериментируем: попробуйте упражнение ниже, а затем перечитайте описание того, что происходит.

Упражнение 5.1

1. Встаньте в нейтральное положение на поверхность, оказывающую некоторое сопротивление, или в обуви с мягкой

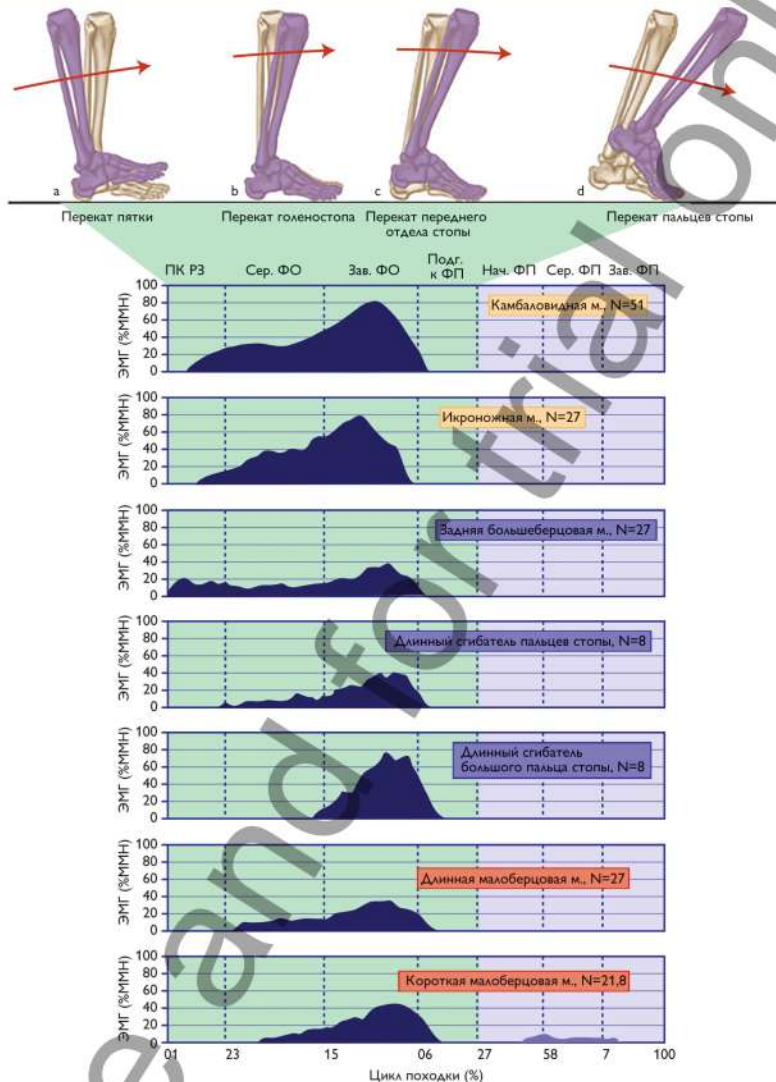


Рисунок 5.4. Мы продолжим исследовать функции группы подошвенных сгибателей по мере продвижения далее по тексту, но сейчас важно увидеть, что основные подошвенные сгибатели (камбаловидная, икроножная и задняя большеберцовая мышцы) активны и усиливаются во время фазы опоры и движения голеностопного сустава в тыльное сгибание (0–12%). Длинные сгибатели пальцев стопы активны, когда пальцы разгибаются (31–62%), и вся группа активизируется, когда приподнимается пятка (31%), чтобы предотвратить завал стопы и голеностопа. Мы увидим, что возникающее между подъемом пятки на 31% и отрывом носка на 62% напряжение обеспечивает часть силового замыкания, необходимого для супинации. Подобные электромиографические показания оживают, когда человек привлекает соотносить мышечную активность с движением суставов, но это требует времени и практики, а также избавления от хрестоматийного уклона в сторону концентрических действий. (Заимствовано у Perry и Burnfield, 2010, N = количество отобранных субъектов.)

подошвой. Сделайте шаг вперед одной ногой — шагните настолько далеко, насколько вам комфортно, и обратите внимание на то, что происходит со стопой задней ноги — поднялась ли ваша пятка?

2. Найдите такую длину шага, при которой ваша пятка почти начинает приподниматься, но при этом вы можете сделать шаг вперед так, чтобы задняя пятка удобно осталась на месте, и достаточно далеко, чтобы создать точку привязки в ткани на передней части бедра. Не заставляйте пятку оставаться там, просто позвольте своему телу реагировать естественными реакциями, когда вы переходите к следующему действию.
3. Из этого положения, поднимая туловище и голову так, как будто вы делаете шаг, согните переднее колено, чтобы вес вашего тела переместился вперед.
 - Что происходит с вашей стопой, когда вес вашего тела движется вперед?
 - Что происходит с вашим тазобедренным суставом на той же стороне?

Чувствуете ли вы, как сгибание переднего колена «требует» большего разгибания заднего бедра? Как только вы исчерпали любое доступное движение в бедре, пятка расположенной сзади ноги начинает подниматься. Я согласен, что подвожу вас к тем выводам и предубеждениям, которые сделал я сам, а именно к тому, что пятка задней ноги не выталкивается вверх подошвенными сгибателями, а вытягивается вперед за счет естественным образом ограниченного разгибания бедра.

Подошвенное сгибание во время фазы опоры не обязательно является прямым результатом сокращения подошвенных сгибателей. Группа подошвенных сгибателей остается активной, чтобы предотвратить завал голеностопного сустава и стопы по мере того, как стопа поднимается и образует жесткий рычаг. Предположительно подъем пятки может быть вызван активным сокращением подошвенных сгибателей, что, по моему клиническому опыту, приводит к характерному

подпрыгиванию при ходьбе, в отличие от плавного перемещения у тех, кто использует менее активную и более реактивную стратегию.

Понимание мягких тканей стопы и голени (на самом деле, и остального тела тоже) требует некоторой гибкости в том, как мы распознаем эффекты мышечного напряжения. Мы должны согласиться с тем, что изменчивая взаимосвязь между причиной и следствием как реакция (в данном случае подошвенное сгибание) может исходить из нескольких разных источников. До сих пор мы видели различия, создаваемые движением в открытой и закрытой цепи. Добавляя фактор инерции, мы также видим, как влияние мышцы может распространяться за пределы связанных с ней суставов.

При передвижении между голеностопным, коленным и тазобедренным суставами происходит возвратно-поступательное движение, поскольку они действуют как единое целое (см. рис. 5.5). В начале фазы опоры подошвенные сгибатели замедляют движение большеберцовой и малоберцовой костей при тыльном сгибании голеностопного сустава. Другая нога выполняет мах вперед и создает инерцию, которая тянет за собой вперед таз. Когда одна стопа фиксирована на земле в закрытой цепи, другая стопа продвигается вперед и создает противодействующие силы, которые воздействуют на бедра, заставляя таз повернуться и наклониться, а бедро со стороны опорной ноги — разогнуться. Можно утверждать, что разгибание тазобедренного сустава было вызвано сокращением подошвенных сгибателей с той же стороны.

Если бы подошвенные сгибатели не тормозили большеберцовую кость и если бы между землей и опорной ногой не было трения, опорная нога могла бы, по крайней мере теоретически, двигаться вперед одновременно с ногой, находящейся в фазе переноса. Создаваемое подошвенными сгибателями сопротивление замедляет опорную конечность по сравнению с ногой, выполняющей мах, а разница в скоростях между двумя конечностями приводит к разгибанию бедра. В этом случае разгибание бедра осуществляется мышцами голени. Наше естественным образом ограниченное разгибание бедра (12–16°)



Рисунок 5.5. Фиксация одной ноги на земле, в то время как другая нога переносится вперед, создает две противодействующие силы, действующие через таз. Таз выдвигается вперед на стороне ноги в фазе переноса и остается позади на стороне ноги в фазе опоры. Естественной реакцией опорной конечности является разгибание колена и бедра в ответ на инерцию, что способствует увеличению длины шага. Окончательное положение опорной конечности перед сходом с пальцев представляет собой комбинацию разгибания пальцев стопы, подошвенного сгибания голеностопного сустава, разгибания колена и бедра, что является результатом фиксации опорной ноги в момент переноса другой ноги вперед.

заставляет пятку подниматься и создает дальнейшее подошвенное сгибание и разгибание пальцев стопы.

Может показаться, что мы играем словами и понятиями, но интересно отметить, что подошвенные сгибатели при движении вперед в закрытой цепи, — как, например, при ходьбе, — помогают разгибать бедро. Бедро отвечает на это движением вперед, чтобы поднимать пятку. В этом контексте подошвенные сгибатели являются разгибателями бедра, а сгибатели

бедра (и все другие ткани, пересекающие переднюю часть бедра) являются подошвенными сгибателями голеностопного сустава и разгибателями пальцев стопы (см. рис. 5.5).

■ СОКРАЩЕНИЕ МЫШЦ И ЭЛАСТИЧНОСТЬ

Подошвенные сгибатели — это группа трудолюбивых мышц, которые, к счастью, созданы именно для такой работы. Им приходится не только некоторое время удерживать тело в воздухе при каждом шаге, но и замедлять каждое приземление во время бега, прыжков или подскоков. Каждое из этих действий в разы увеличивает ту массу, которую им необходимо контролировать (рис. 5.6), однако подошвенные сгибатели обладают множеством свойств, помогающих справиться с тяжелыми нагрузками во время ходьбы, бега и приземления. Наиболее очевидным из них является количество и тип содержащейся в них коллагеновой ткани. От длинного и толстого ахиллова сухожилия и толстого апоневроза камбаловидной мышцы до более длинных и тонких сухожилий сгибателей пальцев стопы — каждая структура играет важную роль в активном управлении силой. Но есть и другие важные аспекты, такие как строение самих мышц, направление и длина их волокон.

В этом разделе мы рассмотрим некоторые анатомические особенности миофасций и обсудим те преимущества и ограничения, которые связаны с каждой из их характеристик. Понимание роли каждой ткани должно помочь визуализировать взаимодействие между всеми составляющими головоломки под названием «движение». Ни одна мышца не выполняет только лишь одну роль, и каждая из них должна приспосабливаться к постоянным изменениям степени и направления действия силы. Как мы уже видели в случае передней большеберцовой мышцы и подошвенных сгибателей (см. рис. 5.2 и 5.4), для того чтобы понять, что именно происходит в ткани, мы должны рассматривать все силы, помещая каждую одновременно в контекст. Мы можем интерпретировать мышечную активность лишь тогда,

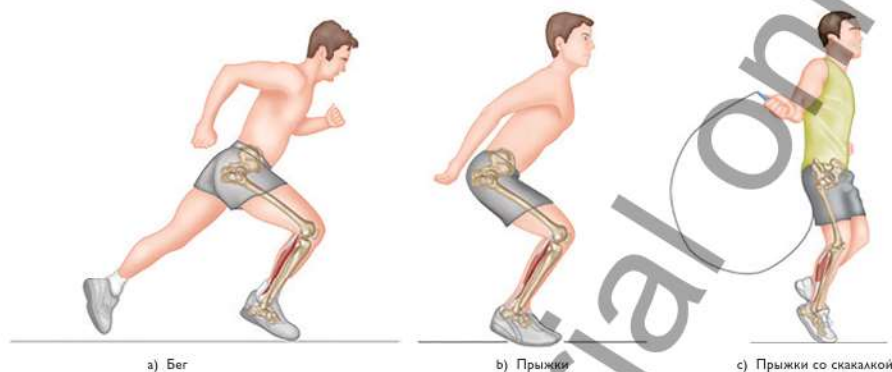


Рисунок 5.6. Во многих видах активности для замедления требуется быстрое тыльное сгибание, что создает нагрузку на подошвенные сгибатели. Из-за результирующего напряжения подошвенные сгибатели могут отвечать выталкиванием тела вверх или вперед с повышенной силой и эффективностью.

когда наблюдаем за движением и силовой средой в контексте. Если мы будем руководствоваться лишь теми действиями мышц, которые описаны в учебниках, то это ограничит наше понимание; нам необходимо создать более полное, богатое и точное представление о мышечной активности.

Мышцы могут сокращаться концентрически, чтобы прервать инерцию и создать импульс, но как только мы начинаем двигаться, у нас также должен быть способ контролировать этот импульс. «Эксцентрическая» роль мышц может помешать нам поддаться действию силы тяжести и упасть или ускориться без контроля. Мышечная работа, будь то положительная работа концентрического сокращения или так называемая отрицательная работа замедления, является метаболически затратной. Активное удлинение и укорачивание мышц требует многократной переработки аденозинтрифосфата (АТФ) и различных других химических соединений, которые составляют мышечный метаболизм (см. рис. 5.7). Каждое блокирование и разблокирование перекрестных мостиков миозина и актина создает круговорот АТФ, который должен

пополняться за счет метаболических затрат. Сведение к минимуму количества оборотов таких перекрестных мостиков, т. е. концентрических и эксцентрических сокращений, снижает метаболический оборот калорий, что является потенциально спасительной стратегией для любого организма.

Мы уже видели, что тело стремится к оптимальному балансу веса и силы, когда в главе 3 рассматривали кость — плотную и дорогостоящую с точки зрения производства и перемещения ткань. Мышцы и связанные с ними механорецепторы также, по-видимому, используют стратегии управления калориями, комбинируя эффекты от длины и направленности мышечных волокон с эластичными свойствами ткани. Как и в случае с многими физиологическими процессами, ни одно из этих свойств не является отдельной характеристикой, все они перемежаются друг с другом, и во время движения каждая ткань выполняет множество функций. При эффективной работе система проприоцепции отслеживает действующие на систему силы и регулирует тонус и длину мышц, чтобы использовать каждую характеристику оптимальным образом.

Например, наблюдая за движением человека, мы можем подумать, что мышца удлиняется по мере того, как раскрывается

* Отрицательная работа, акт замедления, не обязательно является концентрической или эксцентрической. Это может быть либо то, либо другое, в зависимости от задействованных сил.

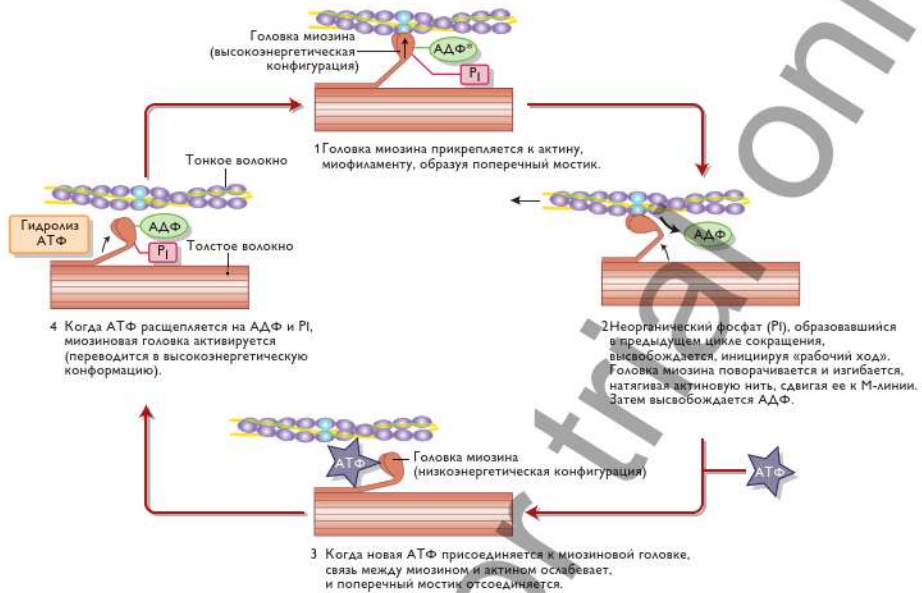


Рисунок 5.7. Теория скольжения волокон при действии мышц демонстрирует, как переплетение миозиновых и актиновых нитей способствует удлинению и укорочению мышечных волокон. Для попеременного смыкания и размыкания волокон требуется обмен энергией, являющийся одной из составляющих метаболических затрат на мышечную деятельность. (Заимствовано из Pearson Educational, 2006.)

сустав, который она пересекает. Тем не менее многочисленные исследователи обнаружили, что при повторяющемся и ритмичном движении, — например, при ходьбе и беге, — мышцы остаются близкими к изометрическим. Такое квазизометрическое состояние мышцы позволяет энергии инерции удлинять коллагеновые ткани поперек суставов. Состоящие из вещества на основе коллагена ткани могут поглощать часть кинетической энергии инерции и накапливать ее в виде упругой энергии, готовой к использованию для обратного движения, — по тому же принципу, как когда кто-то оттягивает резинку катapultы, чтобы подтолкнуть мяч к цели. Таким образом, использование инерции для обеспечения упругой энергии уменьшает количество создаваемых

мышцами поперечных связей, тем самым уменьшая общее потребление калорий.

Нам предоставляется более понятное видение особых качеств мышечной ткани и того, как эти качества развивались для сохранения органической энергии без ущерба для функционального мастерства.

Мортон (1952, стр. 244)

В последние несколько лет переработка кинетической энергии коллагеновыми тканями привлекла большое внимание, отчасти благодаря работам Макнила Александра, Каваками

* (прим. переводчика) Аденозиндифосфат.

и Фукунаги и т. д. В прошлом, когда мы наблюдали удлинение мышечно-сухожильного элемента, обычно предполагалось, что это эксцентрическое удлинение мышечных волокон. Теперь мы знаем, что мышечные волокна могут оставаться изометрическими по мере удлинения сухожилий (до 10% от их первоначальной длины). Однако даже это является лишь одной из характеристик происходящих взаимодействий внутри системы.

Используя ультразвук в реальном времени, различные исследователи, в частности, Lidstone и соавт. (2018), показали, что мышечные волокна могут действовать эксцентрически, изометрически или концентрически по мере удлинения всего мышечно-сухожильного блока (МСБ). На первый взгляд это кажется нелогичным, но похоже, мышцы удлиняются или укорачиваются, приспособляясь к той величине инерции, которую они должны контролировать, а также к требуемой общей жесткости ткани (жесткость исследуется ниже). Имея эти знания, мы можем визуализировать мышечное волокно, которое направляет и регулирует длину ткани изнутри эластичного

мешка. Эластичность, присущая фасциальному мешку, позволяет содержимому мышечных волокон в некоторой степени самостоятельно определять направление движения. Мышца может либо напрягаться, либо расслабляться, либо оставаться той же длины в зависимости от потребности в движении, аналогично управлению инвалидной коляской у Мортон.

Одно из различий между скелетными мышцами и окружающими многие внутренние органы гладкими мышцами, на которое любил указывать Мортон, заключается в содержании коллагена. Скелетные мышцы содержат больше коллагеновых волокон, поскольку они подвержены растяжению под действием внешних сил. Сердечные и гладкие мышечные волокна редко растягиваются точно так же, как и скелетные, и им не приходится сталкиваться с высокими нагрузками, возникающими во время движения — висцеральные органы защищены различными слоями хорошо смазанной серозной фасции, которая позволяет механическим силам проходить вокруг них через абдоминальную и грудную стенки (рис. 5.8).

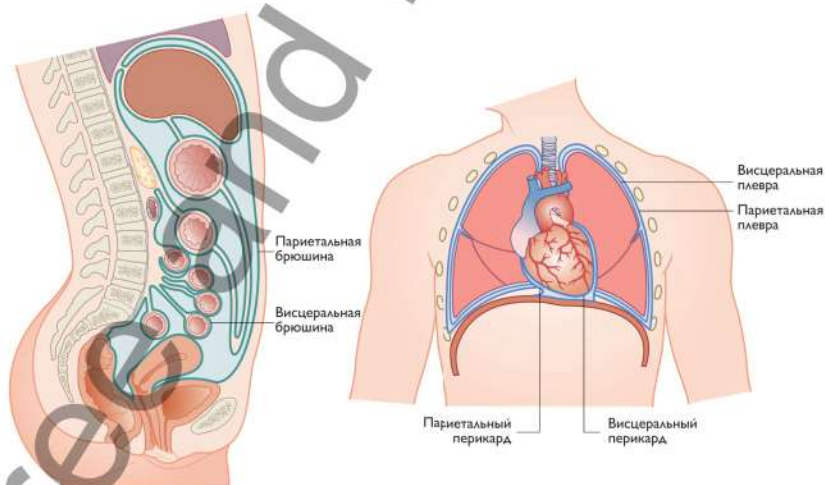


Рисунок 5.8 Внутренние органы заключены в слои серозных оболочек, которые обеспечивают относительно независимое движение между содержимым грудо-абдоминальной области и внешней опорно-двигательной системой. Такая послойная организация снижает то внешнее механическое напряжение, которое достигает висцеральных тканей.

Опорно-двигательный аппарат устроен так, чтобы справляться с механическими напряжениями и деформациями. Терминология может сбивать с толку, но, как мы видели в главе 3, простое определение напряжения — это измерение силы, приложенной к материалу; реакция материала на напряжение называется деформацией — материал деформируется под действием приложенного к нему напряжения. Важно отметить, что в биомеханике реакция называется деформацией.

Чтобы пополнить свой словарь дополнительным контекстом, изучите график на рис. 5.9. Напряжение традиционно откладывается по оси y , а деформация — по оси x . На графике показана линейная зависимость между двумя измерениями: когда одно увеличивается, то другое тоже увеличивается с той же скоростью.

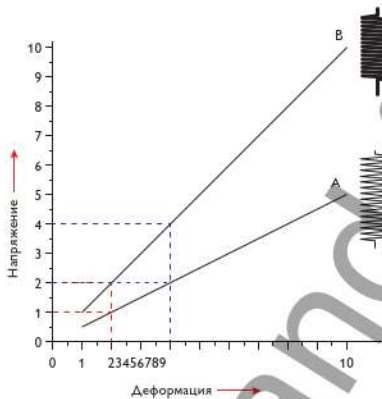


Рисунок 5.9. Традиционно напряжение (сила, деленная на площадь) откладывается по оси y , а деформация (изменение длины) — по оси x . Две линии («А» и «В») представляют материалы с разной жесткостью, поскольку они по-разному реагируют на увеличение напряжения. При увеличении длины обеих линий на две единицы к материалу «В» необходимо приложить в два раза большее усилие. На первый взгляд, более крутой наклон линии «В» демонстрирует ее большее сопротивление удлинению. Большую жесткость материала «В» демонстрирует ряд пунктирных линий: для изменения длины с 2 единиц до 4 единиц (ось x) требуется только 1 единица деформации, приложенная к материалу «А», но 2 единицы деформации, приложенные к материалу «В» (ось y).

Линии «А» и «В» представляют собой два вообразаемых материала, которые с разной степенью реагируют на напряжение: увеличение напряжения на две единицы удлинит «А» в два раза больше, чем «В». Неважно, где на линии мы находимся, если мы увеличим напряжение на две единицы, деформация увеличится на две единицы по линии «В» и на четыре единицы — по линии «А». Таким образом, материал «В» более устойчив к удлинению, чем «А». Другими словами, можно сказать, что «В» жестче, чем «А», поскольку под действием той же силы «А» удлиняется больше.

Как мы видели в главе 3, жесткость имеет официальное определение — это соотношение между напряжением и деформацией. Каждый материал имеет разную степень жесткости в зависимости от состава материала (см. также рис. 3.4). Например, эластичные ленты гораздо менее жесткие, чем струны. Потяните за струну так сильно, как только сможете, и она не сильно удлинится; приложите такое же усилие к эластичной ленте, и она, вероятно, растянется сверх своих возможностей и порвется.

Приложите достаточное усилие к любому материалу, и он в конечном итоге сломается, но степень удлинения, на которую способен каждый материал, также различается. Часто очень жесткие материалы, такие как, например, бетон (рис. 5.10а), могут выдерживать высокие напряжения, но не сильно удлиняются (деформируются) перед тем как сломаться. Сравните это с эластичной лентой, которая может растянуться в пару раз больше собственной длины, прежде чем порвется. Ни то, ни другое свойство не является хорошим или плохим, оно зависит от потребностей данной конкретной области. Некоторые области требуют большей стабильности и, следовательно, используют более жесткие материалы, а некоторые требуют большей подвижности при меньшей жесткости. Одним из преимуществ биологической ткани по сравнению с искусственным материалом является ее способность изменять жесткость в зависимости от ее длины.

Изучая характеристики костей, мы увидели, что биологические материалы не подчиняются простой прямолинейной зависимости между напряжением и деформацией. Большинство

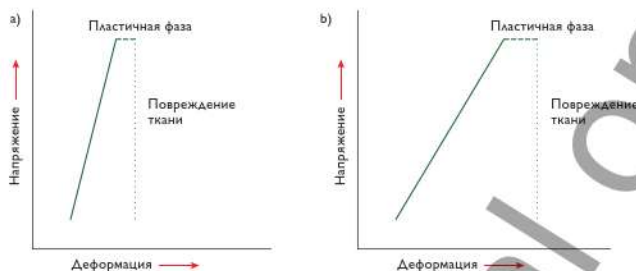


Рисунок 5.10. а) Более жесткие материалы, такие как наш воображаемый бетон, будут меньше удлиняться (измеряется по оси x), но требуют применения большего усилия (измеряется по оси y), прежде чем они начнут разрушаться. Более жесткие материалы, как правило, имеют более короткие фазы пластичности, когда материал может удлиняться еще больше, но уже не может вернуться в исходное состояние. Материалы с короткими фазами пластичности обычно называют хрупкими. б) Менее жесткие материалы могут испытывать большую деформацию перед переходом в пластичную фазу (когда они больше не могут вернуться к своей первоначальной форме) и разрушением тканей. Они могут удлиняться дальше и все же возвращаться к своей первоначальной длине, поэтому они описываются как эластичные (способные деформироваться и возвращаться к нормальному состоянию). В качестве наглядного примера можно вспомнить, что кости пожилых людей, как правило, более хрупкие и меньше деформируются, прежде чем сломаться, по сравнению с костями их маленьких внуков. Эластичность костей и мягких тканей будет меняться в течение жизни, а также в результате качества питания и количества упражнений.

биологических структур при большей деформации становятся жестче. J-образная кривая на рис. 5.11b иллюстрирует, как, например, сухожилие легко удлиняется (помните, что деформация — это мера изменения длины) на ранних стадиях — точно так же, как эластичная лента. Однако градиент кривой постепенно меняется и на последних стадиях больше напоминает линию напряжения/деформации бетона. Кривая J-образной формы показывает, что сухожилие легко удлиняется вначале, но чем длиннее оно становится, тем более устойчиво оно к изменениям.

Когда сухожилие короче, оно менее жесткое; по мере удлинения оно становится жестче. Степень жесткости ткани играет важную роль в движении, поскольку она связана с мобильностью, стабильностью и эластичностью. В анатомии и инженерии термин жесткость нейтрален, это всего лишь характеристика исследуемого материала. Бывают случаи, когда выгодной является высокая степень жесткости, а иногда нам необходимо, чтобы ткань легко удлинялась.

Вполне логично, что наши ткани естественным образом становятся более жесткими, когда подвергаются более высоким нагрузкам.

Рассмотрим в качестве примера прыжок: когда стопа приземляется, подошвенные сгибатели удлиняются и их коллагеновые ткани деформируются, но они также увеличивают свою жесткость, чтобы сопротивляться дальнейшему удлинению. Это делает наши ткани адаптивными, поскольку наши тела не подвергаются постоянному воздействию одних и тех же условий. Мы можем прыгать с разной скоростью и высотой, в разном климате и при разных температурах, и вся прелесть биологических материалов заключается именно в том, что они могут адаптироваться к этим разным условиям.

Для удлинения ткани требуется энергия, и часть этой энергии поглощается тканями, затем эта энергия помогает ткани вернуться к своей первоначальной длине; такую динамику мы называем эластичностью. Эластичность играет жизненно важную роль во многих механизмах эффективности нашего движения, поскольку она позволяет перерабатывать кинетическую энергию, полученную из инерции.

Эффективность становится еще выше, если мы можем сбалансировать инерцию движения с жесткостью ткани для оптимального накопления энергии. Как мы видим на рис. 5.11b,

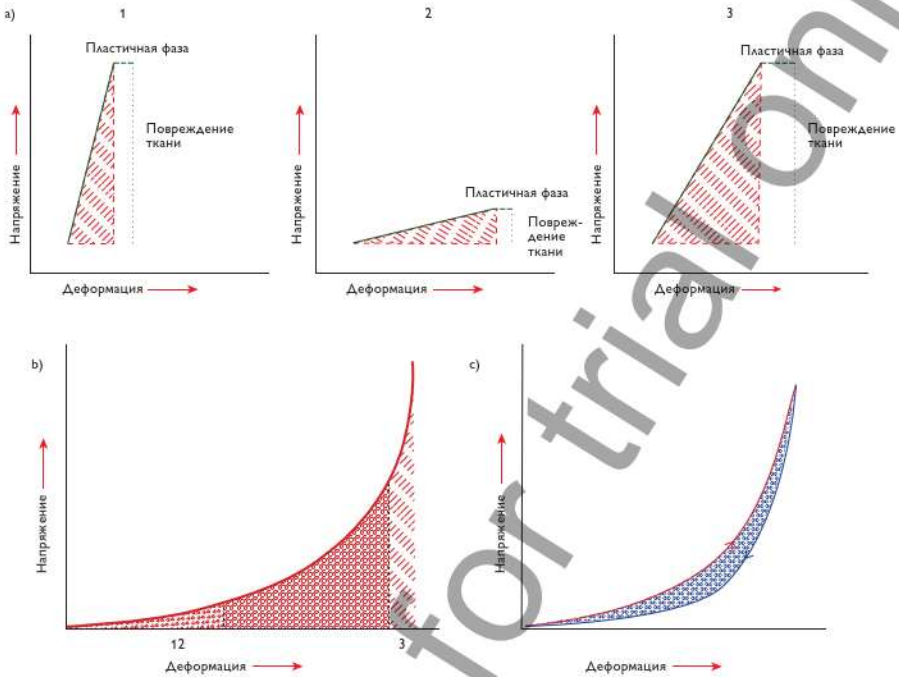


Рисунок 5.11. Область под кривой показывает количество потенциальной энергии, создаваемой при деформации материала. а) Если ткань имеет высокую жесткость и не удлиняется, будет накоплено мало энергии (1). Точно так же, если ткань легко удлиняется при низком напряжении, то к материалу нужно приложить мало энергии. (2) Средняя степень жесткости позволяет накапливать больше энергии, но это компромисс между стабильностью, обеспечиваемой жесткими тканями (3), и подвижностью, обеспечиваемой легко удлиняемой тканью (1). б) Натуральные материалы, такие как сухожилия, могут использовать преимущества низкого, высокого и среднего уровней жесткости, обладая различной степенью жесткости по мере удлинения. На ранней стадии удлинения (1) требуется небольшое напряжение, и в ткань поступает не так много энергии (показано треугольниками). Ситуация аналогична к концу удлинения (3), когда ткань становится более жесткой и, следовательно, обеспечивает большую защиту суставов. Для удлинения материала до конца диапазона требуется больше энергии, и из-за небольшой степени дополнительной длины добавляется меньше энергии для обратного движения (заштрихованная область). Именно в средней фазе (2) ткань накапливает больше всего энергии для возвращения в исходное состояние (кружки). в) Не вся накопленная энергия возвращается при отгаче, поскольку часть энергии теряется из-за трения и выделения тепла. Потеря энергии, известная как гистерезис, является переменной величиной и зависит от множества факторов, включая время загрузки и разгрузки, состояние ткани и ее вязкость.

на ранней и поздней стадии удлинения не происходит значительного накопления энергии. К ткани необходимо приложить достаточное напряжение, чтобы растянуть ее до средней части графика напряжения/деформации, где можно добиться наибольшей выгоды, при этом не создавая чрезмерного удлинения

ткани по направлению к ее пластической фазе и точке разрушения.

Существует также множество внутренних факторов, влияющих на жесткость тканей, и вы, без сомнения, испытали на себе некоторые из них. Этот список можно продолжать почти до бесконечности, но основные переменные

включают температуру, гидратацию, возраст, тип ткани, содержание гиалуроновой кислоты (гидрофильный смазывающий элемент фасциальной ткани), гормональные вариации и типы коллагена (в организме существует множество форм коллагена, и каждая имеет разную степень жесткости, Zügel и соавт., 2018).

Каждое движение требует разной степени жесткости как во всем теле, так и между отдельными частями тела. Слишком сильная жесткость уменьшает диапазон движений; слишком недостаточная — вызывает нестабильность и относительную гипермобильность. Тело должно менять и регулировать жесткость в соответствии с требованиями конкретных областей. Рассмотрим, например, стопу в фазе опоры. При схождении с пальцев стопа должна действовать как «жесткий рычаг», являясь платформой для управления силой инерции, силой реакции опоры и массой тела. Мы уже видели, что для того, чтобы менять «жесткость» стопы, кости то размыкаются, то снова замыкаются; однако и мягкие ткани также адаптируются к изменению потребности, когда в процессе фазы опоры стопа переключается с роли подвижного адаптера на жесткий рычаг.

Мягкие ткани должны реагировать на внешние требования к движению, и, хотя сила тяжести постоянна, сила реакции опоры, сила инерции и положение тела постоянно меняются. Для создания успешного движения требуется постоянное наблюдение за потребностями тканей: как силы действуют на тело? Как реагирует тело? Насколько тело приближается к своей цели? Эффективно ли оно движется?

В петле обратной связи, подобной той, которую используют остеопаты для управления моделированием кости, каждый из этих вопросов мониторируется механорецепторами, которые являются частью проприоцептивной системы организма. Механорецепторы коммуницируют с мышцами напрямую и косвенно, и те регулируют свой тонус, оказывая влияние на общую жесткость той или иной области в соответствии со сложным алгоритмом, включающим в себя многие переменные.

В ответ на ту или иную потребность мышцы постоянно то, вытягиваются, то расслабляются. Если им нужно создать движение, они сильно

вытягиваются за счет концентрического сокращения. И наоборот, если вытягивание происходит со стороны антагониста, мышца должна эксцентрически «отпустить» с той скоростью, которая соответствует этому концентрическому сокращению, тем самым обеспечивая контролируемое движение. Поскольку инерция действует через ткань, мышечные волокна реагируют в ответ на силы, обеспечивая продвижение к цели движения. Мышечная ткань представляет собой активную «систему регулирования жесткости», способную укорачиваться, удлиняться или оставаться неизменной в зависимости от потребности (Sawicki и др., 2009).

Постоянный проприоцептивный мониторинг может показаться тяжелой работой, но, согласно работе профессора Huijing и др. (2003), полученная информация обрабатывается локально без постоянной необходимости передавать сигналы в спинной или головной мозг.

Тонкая подстройка длины и тонуса мышечных волокон напрямую влияет на эластичность и жесткость связанных с ними коллагеновых тканей. В оптимизированной системе мышца будет претерпевать минимальное изменение длины, инерция будет создавать жесткость и передавать энергию сухожилиям и окружающему их коллагену, обеспечивая ряд преимуществ для всей системы, включая эффективность. Наилучший возврат упругой энергии происходит в середине диапазона длины ткани: представьте, что один конец этого диапазона соответствует эластичной ленте, а другой — бетону (как показано на рис. 5.11b). Для удлинения эластичной ткани сухожилия в середине диапазона требуется надлежащее количество силы, что означает, что возвратное движение будет происходить с помощью кинетической энергии.

■ ЖЕСТКОСТЬ ТКАНЕЙ И ВЫВОДИМАЯ СИЛА

Упругая энергия — не единственное преимущество этого процесса, поскольку мышечные волокна также могут работать в пределах своего оптимального диапазона длины. Мышечное волокно создает меньшую силу на обоих концах

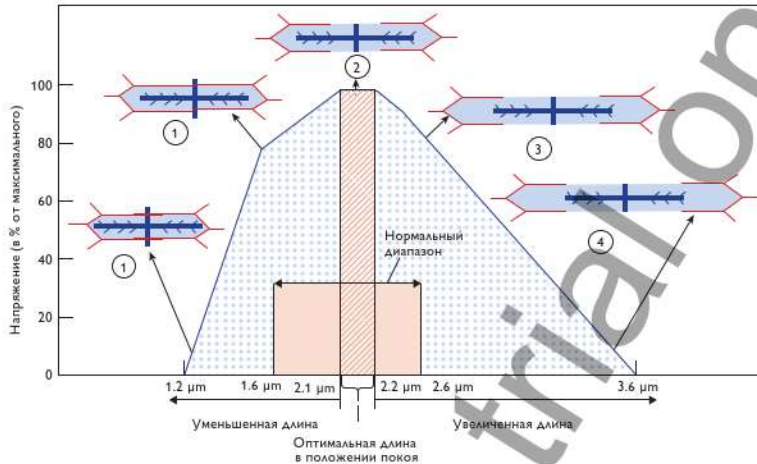


Рисунок 5.12. Волокна актина и миозина имеют идеальный диапазон перекрытия для создания максимальной силы. Если волокна слишком короткие (обозначены цифрой 1), у них меньше возможности для дальнейшего укорочивания. При слишком большой длине (обозначено цифрами 3 и 4) уменьшается перекрытие нитей и уменьшается сила натяжения. Оптимальное перекрытие между двумя нитями обеспечивает максимальный силовой потенциал (отмечено цифрой 2).

своего диапазона длины (см. рис. 5.12), удлинение сухожильных коллагеновых волокон за счет инерции позволяет мышцам оставаться в оптимальном соотношении «сила/длина» и, следовательно, быть способными обеспечивать оптимальную силу, — особенно ближе к концу диапазона движения сустава, когда контроль движения особенно необходим. Использование инерции для удлинения коллагеновых тканей также позволяет мышечным волокнам оставаться близкими к изометрическому состоянию и сжигать меньше калорий.

Спортивные активности используют инерцию контрдвижения в качестве общей стратегии для увеличения мощности и повышения эффективности. Благодаря естественной миофасциальной динамике, предполагающей первоначальное движение в противоположном направлении, достигается целый ряд преимуществ, как в случае броска, прыжка или любого другого движения, требующего дополнительной силы. Увеличение скорости сокращения приводит к уменьшению производимой мышечной силы (см. рис. 5.13), однако, нагружая эластичную ткань, можно достичь требуемой



Рисунок 5.13. Выходная мышечная сила уменьшается по мере увеличения скорости сокращения. Это означает, что мышца, задействованная при быстром сокращении, на самом деле будет слабее. Удлинение окружающих мышечное волокно эластичных тканей означает, что мышечно-сухожильный блок может быстро укорачиваться за счет использования энергии упругости, в то время как мышечное волокно сокращается медленнее со скоростью, соответствующей его оптимальной выходной силе.

скорости за счет упругой отдачи, а не за счет сокращения волокон. Упругая отдача окружающих

мышцу коллагеновых тканей обладает более высокой скоростью сокращения, нежели сама мышца. Это может быть трудно визуализировать, но в стратегии контрдвижения будет две скорости сокращения: эластичная ткань укорачивается быстро, а мышечная ткань сокращается медленнее, чтобы свести к минимуму собственную потерю силы. Взаимодействие между двумя типами силы (мышечной и упругой) использует наиболее подходящие свойства обоих типов тканей, одна из которых предназначена для точного контроля (мышечная), а другая — для скорости, эффективности и увеличения силы (эластическая).

Стратегии контрдвижения используют преимущества многочисленных динамик тканей — эластичности, жесткости, длины ткани и соотношения скоростей. В связанной со спортом литературе упоминание контрдвижения (которое иногда также называется «циклом растяжения-укорочения» или «циклом растяжения-отдачи») встречается достаточно часто, и гораздо реже — когда речь идет о нормальном движении. Но всякий раз, когда инерция воздействует на сустав, сочетание упомянутых выше преимуществ способствует возвратному движению.

Повседневное движение может создавать меньше эластичной энергии, чем движение, связанное со спортом, но тем не менее мышечное волокно останется квазиизометричным, а коллагеновые ткани в некоторой степени будут удлиниться и, следовательно, становятся жесткими. Увеличение жесткости фасциальной ткани способствует замедлению движения и обеспечивает упругую поддержку вокруг сократительной мышечной ткани. Укрепление фасциальных поддерживающих структур мышцы дает мышце более отзывчивую среду для передачи силы ее сокращения.

Даже в фазе опоры при ходьбе, для которой характерна относительно низкая нагрузка, можно наблюдать удлинение ахиллова сухожилия на 7 мм при минимальном удлинении мышечных волокон (Fukunaga и соавт., 2001). Отдача сухожилия помогает при сходе с пальцев ноги и уменьшает мышечную работу, которая также уменьшается за счет увеличения жесткости удлинённого сухожилия. Если бы сухожилие

не удлинялось, то любая мышца голеностопного сустава, которая укорачивается при сжатии с пальцев стопы, должна была бы сначала натянуть менее жесткое сухожилие, а уже затем оказывать какое-либо влияние на голеностопный сустав.

В качестве чрезмерно преувеличенного образа представьте сухожилие в виде очень тонкой эластичной ленты, прикрепленной к ножке стула. Если мы потянем за эластичную ленту, она удлинится, стул же при этом двигаться не будет. Замените эластичную ленту на кусок струны, которая гораздо менее эластична и имеет большую жесткость. Потянув за более жесткую струну, вы лишь немного удлините саму струну и при этом сдвинете стул. Из приведенного выше графика мы уже знаем, что коллагеновые ткани изменяют свою жесткость по отношению к длине (рис. 5.11b), становясь больше похожими на струны, чем на эластичные ленты, по мере их удлинения. Контрдвижение задействует ранние участки кривой деформации — приближение к среднему и конечному диапазонам положения сустава естественным образом делает коллагеновые ткани вокруг сустава более жесткими. Это обеспечивает два основных преимущества: определенную защиту сустава и более эффективную передачу усилия от связанного с ним мышечного волокна для контроля движением сустава. Контроль необходим как для замедления удлинения ткани, так и для создания укорочения ткани, чтобы создать возвратное движение. Если создаваемая мышцами сила будет передаваться «струнами», а не «тонкими эластичными лентами», то мышцам будет легче контролировать движение.

Роль, которую играет мышца во время движения, напрямую зависит от расположения ее волокон. Соотношения силы, длины и скорости веретенообразных мышц с их длинными параллельными волокнами значительно отличаются от таковых у перистых мышц с их короткими, расположенными под углом волокнами (рис. 5.14a). Работа параллельно и с волокнами, соединяющимися непосредственно между противоположными концами мышцы, позволяет веретенообразным мышцам быстро сокращаться и действовать на большем расстоянии.

Перистые мышцы с более короткими волокнами могут сокращаться только на коротких расстояниях, но делают это с гораздо большей силой при том же объеме мышц (рис. 5.14b).

Итак, чтобы оценить взаимодействия, влияющие на производительность, мы должны рассмотреть несколько факторов. К ним относятся объем мышц (также известный как анатомическая площадь поперечного сечения), количество мышечных волокон (измеряемое физиологической площадью поперечного сечения) и влияние выравнивания волокон (см. рис. 5.15). Каждая из этих характеристик имеет соответствующие затраты и выгоды, влияющие на функциональный контекст и расположение мышцы в организме. Некоторым областям тела требуется больше силы, некоторым могут потребоваться более быстрые сокращения, некоторые должны выдерживать большее действие сил извне, в то время как другие больше связаны с созданием движения изнутри. Соответствие архитектуры тканей потребностям каждой области тела повышает общую эффективность развития и роста тканей, а также снижает издержки движений.

При ходьбе или беге дистальный конец каждой нижней конечности совершает наибольшее движение относительно всего остального тела. Как обнаружили производители кроссовок, минимизация веса на концах конечностей может обеспечить значительную экономию энергии при беге на длинные дистанции. Наше же тело сделало это открытие много лет назад и наполнило наши икры перистыми мышцами. Использование перистого строения позволяет мышце объединять большее количество мышечных волокон в меньшем объеме. Взгляните на рис. 5.15, на котором сравниваются анатомические и физиологические площади поперечного сечения. Все показанные мышцы имеют одинаковую анатомическую площадь поперечного сечения (АППС), что означает, что они занимают одинаковый объем внутри тела и имеют одинаковый вес, но будут различаться по своей потенциальной выходной силе.

Потенциальная выходная сила мышцы сильно зависит от количества содержащихся в ней волокон. АППС рассекает каждое волокно веретенообразной мышцы,

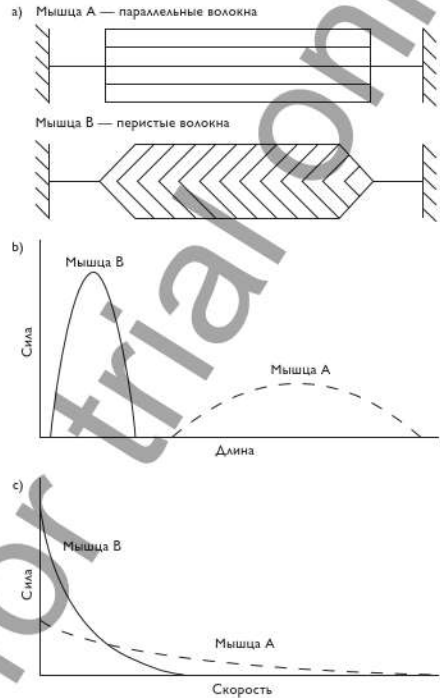


Рисунок 5.14. Количество составляющих мышцу волокон напрямую связано с ее потенциальной выходной силой. Количество волокон можно оценить, рассчитав площадь поперечного сечения мышцы, которая должна делить каждое волокно пополам. Прямая линия от одной стороны мышцы к другой делит пополам каждое волокно веретенообразной мышцы (a), но не может измерить каждое волокно перистых мышц. Для того чтобы разделить пополам каждое волокно перистой мышцы, сечение необходимо выполнять под углом (b, c и d). Объем мышцы, влияющий на ее массу, связан с площадью поперечного сечения. Таким образом, есть два важных измерения, которые влияют на работу мышц: анатомическая площадь поперечного сечения, которая связана с ее объемом, и физиологическая площадь поперечного сечения, которая связана с количеством волокон и выходной силой мышцы. Веретенообразные мышцы будут иметь одинаковые размеры в обоих случаях, в то время как перистая мышца будет иметь большую физиологическую площадь поперечного сечения и, следовательно, большее количество более коротких мышечных волокон.

но пропускает значительное количество перистых волокон. Если мы изменим правила

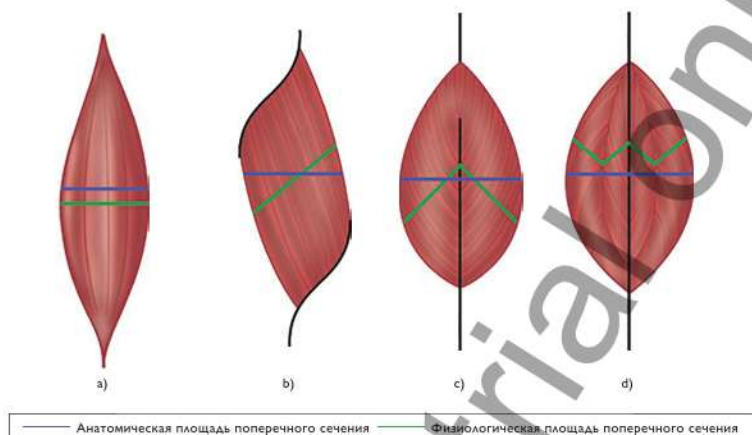


Рисунок 5.1.5. Для поддержания нашего вертикального положения на двух ногах требуется ряд анатомических особенностей, включая изменения в стопах, тазе, позвоночнике и голове. Роль стопы у каждого вида связана с его двигательными стратегиями и возможностями остальной части их анатомии. Наши стопы обладают некоторыми уникальными способностями, однако некоторые из них мы все же утратили — их взяли на себя другие части тела, особенно бедра.

поперечного разреза так, чтобы он проходил через каждое мышечное волокно, а не по прямой от одной стороны к другой, то для веретенообразной мышцы эта линия не изменится, а для перистых мышц она должна будет пройти под наклоном. Угол поперечного сечения, включающий каждое волокно, создает физиологическую площадь поперечного сечения (ФППС), которая является лучшим показателем потенциальной силы, вырабатываемой мышцей.

Расположение волокон объясняет разницу в силовом потенциале и дает представление о той роли, которую выполняет каждая мышца. Расположение перистых мышц предназначено для производства и, что важно, контроля больших сил, воздействующих на тело посредством инерции. Веретенообразные мышцы с эквивалентной АППС могут управлять относительно меньшими усилиями при большем диапазоне движений и с большей скоростью. Рассмотрим разницу в функциях двуглавой мышцы плеча и камбаловидной мышцы: двуглавая мышца плеча, пересекая локтевой сустав с его большой амплитудой движений, но с относительно низкими нагрузками, состоит из длинных

параллельных волокон, в то время как многоперистая камбаловидная мышца предназначена для высоких нагрузок и короткого диапазона движения.

Архитектура мышц развивается в соответствии с предъявляемыми к ним требованиями. Так, двуглавая мышца плеча чаще всего задействуется для выполнения движений в открытой цепи, помогая направлять руку в разные стороны. Камбаловидная мышца чаще всего используется в движениях в закрытой цепи, для контроля и замедления тыльного сгибания, особенно при приземлении после прыжка или во время бега. Мышцам икр приходится контролировать вес, в шесть раз превышающий вес нашего тела, во время бега, и еще больший — когда мы приземляемся после прыжка. Многоперистое расположение мышечных волокон камбаловидной мышцы обеспечивает необходимую силу, при этом не занимая слишком много места и не увеличивая вес дистальных отделов конечностей.

Помимо того, что волокна икроножных мышц располагаются под углом, эти мышцы также имеют длинные эластичные сухожилия, что позволяет им перерабатывать

больше кинетической энергии. Как мы знаем из вышеизложенного, сухожилия обладают эластичными свойствами и могут деформироваться, чтобы поглотить часть напряжения, которое, например, возникает во время приземления, а произошедшее в результате этого удлинение контролируется связанными с ними мышечными волокнами. Мышечные волокна могут напрягаться концентрически, эксцентрически или изометрически по мере удлинения сухожилия — в зависимости от тех требований, которые предъявляются к движению, а также от различной прочности и жесткости тканей и их способности контролировать движение.

■ КРИВАЯ «СИЛА-ДЛИНА»

Фасциальная ткань обеспечивает наши двигательные процессы тремя основными преимуществами: повышением эффективности, усилением мощности и амортизацией. Обсуждая эти преимущества, мы должны помнить, что это не отдельные, независимо работающие функции. Каждая динамика постоянно пересекается с другими, даже если в данный момент потребность в одной из них возникает чаще из-за текущих требований к движению. Как упоминали Савицки и Юджин, проприоцептивная система (в основном) бессознательно отслеживает возникающие потребности и вносит необходимые коррективы в тонус и длину мышечных волокон, чтобы скорректировать уровни жесткости и выходную силу.

Как мы уже видели выше, эластичность фасциальных тканей помогает оптимизировать мышечную силу и увеличивать выходную мощность. Удлиняется не столько мышечное волокно, сколько сухожилие, и, поскольку мышечное волокно не изменяет длину, оно может оставаться в пределах своего оптимального соотношения силы и длины. Соотношение силы и длины (см. рис. 5.12 и 5.16) показывает, что существует узкий диапазон длины, в котором мышцы могут вырабатывать больше силы, поэтому пребывание в этом диапазоне улучшает способность любой мышцы контролировать движение. Однако если в результате инерции

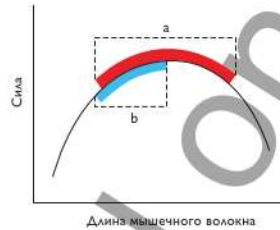


Рисунок 5.16. Мышечное волокно имеет оптимальное соотношение силы-длины (показано на рис. 5.12), но если мышечное волокно удлинится больше, чем до вершины кривой, это приведет к снижению выходной силы (как показано красным цветом, (a)). Или, проще говоря, когда мышца удлиняется за пик кривой, она становится относительно слабее и снижается ее способность контролировать движение. Калибровка длины волокна для работы в восходящей части кривой позволяет увеличить выходную силу (b). В результате ее нормальный диапазон функционирования остается в пределах оптимального соотношения силы и длины.

длина мышцы выходит за пик кривой, это может привести к проблемам.

После прохождения пика графика «сила-длина» мышца начинает терять выходную силу (как показано на рис. 5.16a). Любое дальнейшее увеличение длины будет уменьшать эффективность мышцы, снижая ее способность вырабатывать силу. Удлинение за пределы пика является проблемой для тех мышц, которые предназначены для замедления движения, поскольку инерция постоянно будет способствовать их слабости, в то время как в действительности этим мышцам требуется больше силы.

К счастью, наша мышечная ткань выработала очевидное решение, работая преимущественно на восходящей части кривой. Несколько исследователей (Rubenson и соавт., 2012; Lieber и Ward, 2011; Ishikawai и соавт., 2007) обнаружили, что длина мышечного волокна остается на восходящей части кривой силы-длины (рис. 5.17). Начиная с относительно более короткого положения, мышцы, по мере их удлинения, становятся только сильнее. Если бы они были предназначены для работы по обе стороны от пика кривой, удлинение сначала вызвало бы увеличение силы, за которым затем

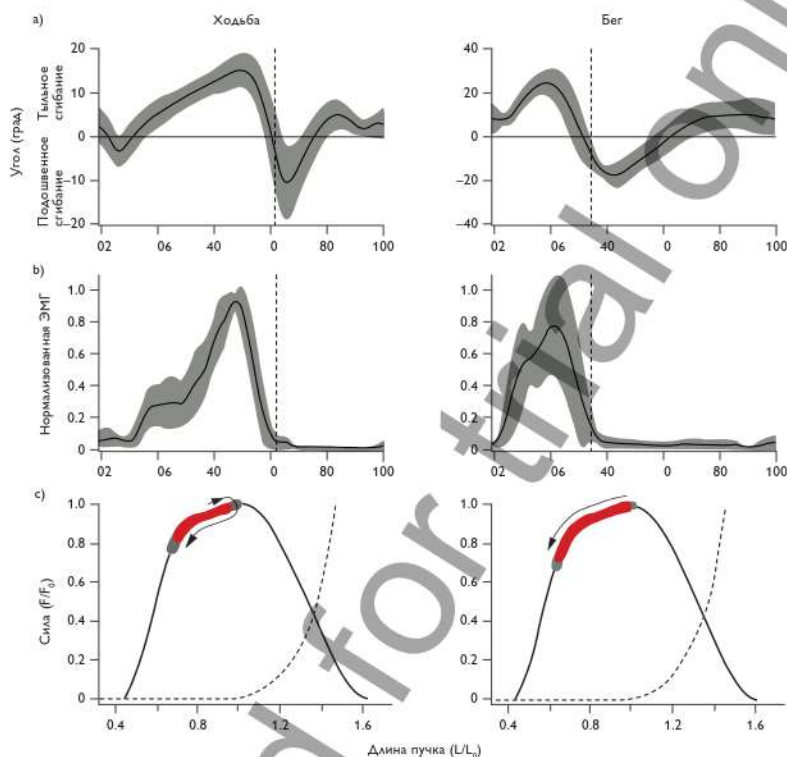


Рисунок 5.17. Углы суставов (а) и показания ЭМГ (б) изменяются в зависимости от того, идет ли речь о ходьбе или о беге. Схождение с пальцев показано вертикальной пунктирной линией на уровне 62% при ходьбе и 36% при беге. Увеличение длины волокна камбаловидной мышцы как при ходьбе (слева), так и при беге (справа) происходит на восходящей части кривой сила-длина, обеспечивая оптимальную выходную силу для обоих видов деятельности. Стрелка указывает направление изменения длины. (с) Как при ходьбе, так и при беге пучки камбаловидной мышцы действуют на восходящей части кривой, но они удлиняются лишь на ранней фазе ходьбы, а затем укорачиваются. Волокна укорачиваются во время опорной фазы бега, несмотря на увеличение общей длины мышечно-сухожильного блока во время тыльного сгибания, что указывает на то, что мышца работает концентрически по мере удлинения коллагеновых тканей. (Адаптировано из Rubenson и соавт., 2012.)

следовало бы быстрое ее уменьшение — по мере того, как это соотношение перемещается через пик кривой. Работа на нисходящей стороне кривой не имеет функционального смысла, поскольку обычно требуется больше силы для управления движением в ситуации, когда суставы открываются, а рычаги удлиняются.

Кроме того, при приближении этой области к концу ее диапазона необходимо увеличить ее защиту.

ЭМГ и положение голеностопного сустава при ходьбе и беге показывают, что активность камбаловидной мышцы увеличивается по мере того, как голеностопный сустав продвигается дальше в тыльное сгибание, а затем снижается при подошвенном сгибании и приближении к моменту схождения с пальцев. Этот паттерн должен напомнить нам упражнение 5.1 (стр. 115), где подъем пятки и подошвенное сгибание обеспечивались инерцией

тела в сочетании с его положением и связанным с ним напряжением тканей других суставов в остальном теле.

Можно сказать, что подошвенные сгибатели «приподнимают» тело, но они также предотвращают завал стопы под телом. В следующей главе мы разберем большую часть не прямой работы так называемых подошвенных сгибателей, которые обеспечивают значительную часть «силовой поддержки» структуры стопы во время супинации при подготовке к сождению с пальцев. Подошвенные сгибатели помогают сделать жесткой общую структуру стопы, а также контролируют поступательную силу, получаемую от инерции.

Направление изменения длины мышечных волокон на рис. 5.17в показывает различную реакцию на высокие нагрузки. При ходьбе, которая представляет собой активность с низкой нагрузкой, волокна немного удлиняются, а затем укорачиваются. Это контрастирует с активностью волокон во время бега и связанными с этим более высокими ударными силами, переводящими голеностопный сустав в тыльное сгибание. Хотя мы видим, что в короткой фазе опоры во время бега голеностопный сустав уходит дальше в тыльное сгибание, мышечные волокна при этом лишь активно укорачиваются. Во время бега общее удлинение тканей, необходимое для обеспечения тыльного сгибания, должно происходить за счет соответствующего сухожилия и окружающих фасциальных тканей — помните, что мышечные волокна могут укорачиваться при одновременном удлинении фасциальных тканей. Энергия, используемая для растяжения коллагеноносодержащих тканей, затем может вернуться обратно в систему, вызывая подошвенное сгибание голеностопного сустава и помогая придать инерции движению тела вперед.

Повторное использование кинетической энергии — это лишь одно из метаболических преимуществ, обеспечиваемых фасциальными тканями. Кроме того, вся система также выпрыгивает от способности фасциальных тканей

удлиняться и, таким образом, становится жестче в ответ на инерцию. Использование телом инерции для деформации коллагеновых тканей изменяет рабочий диапазон длины мышц (Ishikawa и соавт., 2007; Rubenson и соавт., 2012). Вместо того чтобы действовать за пиком кривой силы-длины, деформация и увеличение жесткости фасциальной ткани перемещают активный диапазон мышц в восходящую часть кривой силы-длины (рис. 5.17с).

Если бы мышцы были устроены так, что могли бы работать с любой стороны пика их кривой силы-длины, то при попытке замедлить инерцию они бы переместились на нисходящую часть кривой. Это бы привело к тому, что они стали бы слабее, поскольку соответствующие им суставы открывались бы до конца своего диапазона. Способность работать на восходящей стороне кривой увеличивает относительную силу мышцы по мере того, как она приближается к концу нормального суставного диапазона. Работа на восходящей кривой обеспечивает защитный механизм, поскольку настройка длины пучка помогает предотвратить чрезмерное удлинение тканей поперек сустава.

■ КОНТРОЛЬ СИЛЫ — ЗАМЕДЛЕНИЕ И ГАШЕНИЕ

Наряду с повышением эффективности и выходной мощности коллагеновая фасциальная ткань обладает третьей динамикой, которая заключается в том, чтобы способствовать амортизации силы. Гашение (или затухание, рис. 5.18с) — это управляемое замедление для прекращения движения и рассеивания энергии, временно накопленной в эластичных тканях после их удлинения. Робертс и Азизи (2011) показывают, что удлинение сухожилий при приземлении позволяет мышечно-сухожильной системе быстрее использовать большие силы.

Такие силы сложны и опасны для мышц и часто являются источником травм. Перенаправляя силу удара сначала на коллагеновые ткани, мышечное волокно может реагировать более медленным эксцентрическим сокращением, чтобы ослабить энергию; помните: чем быстрее мышца сокращается, тем меньше силы она может

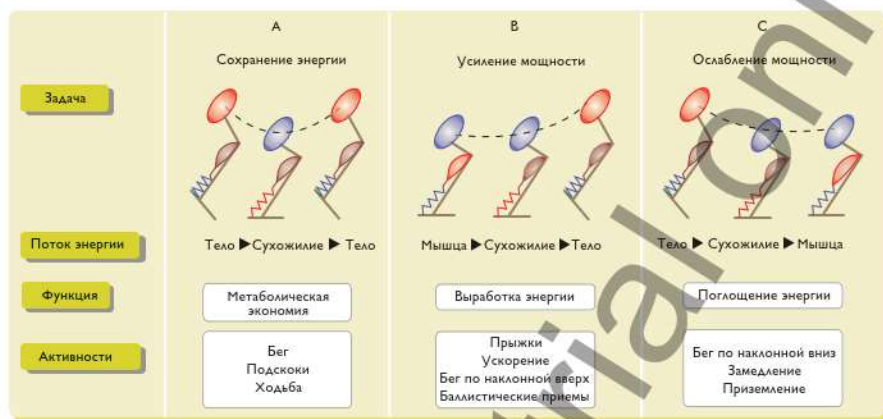


Рисунок 5.18. Затухание или гашение (C) — последний из трех механизмов, описанных Робертсом и Азизи в их обзорной статье о роли пружин. Приземление часто требует контроля большой силы, поскольку ткани удлиняются. Мышечные волокна создают меньше силы по мере увеличения скорости и, следовательно, в меньшей степени способны к эксцентрическому сокращению сразу после удара. Чтобы компенсировать потерю силы во время быстрого удлинения, мышца остается близкой к изометрической (в пределах оптимального диапазона силы) при приземлении, а коллагеновые ткани удлиняются, чтобы контролировать ударные силы. Это позволяет мышце эксцентрически сокращаться с меньшей скоростью (и, следовательно, с большей силой), чтобы погасить упругую энергию, накопленную коллагеном. Другие механизмы уже были рассмотрены выше: сохранение энергии, экономия (A) усиливается за счет того, что мышечные волокна остаются близкими к своей идеальной длине, в то время как для загрузки упругой энергии используется инерция. Выработка энергии усиливается (B) за счет предварительного натяжения тканей (мы увидим преимущества этого действия в следующих двух главах). (Адаптировано из Roberts & Azzizi, 2011.)

произвести. Робертс и Азизи отмечают, что помимо того, что сухожилия позволяют мышцам производить большую силу, они также позволяют им гасить те силы, которые превосходят возможности мышц с точки зрения их контроля.

Ударные силы быстро проникают в тело, независимо от способности мышечных волокон сокращаться достаточно быстро и с достаточной силой, чтобы контролировать реакцию после удара. Мышцы борются за создание высокой силы при быстром сокращении (см. рис. 5.13 и 5.14), поэтому перенаправление ударных сил сначала в фасциальные ткани, пока мышца сокращается «квазиизометрически», позволяет мышечному волокну удлиняться с меньшей быстротой и сохранять контроль.

Гашение силы играет особенно важную роль для стопы и голеностопного сустава,

поскольку именно на них ежедневно приходится большая часть действующих на тело ударных сил. При приземлении на среднюю часть стопы во время бега, прыжков со скалкой или прыжков с высоты чаще всего происходит быстрое тыльное сгибание голеностопного сустава. Коленный и тазобедренный суставы — два других основных сустава, участвующих в этих движениях, — обладают большими и сильными мышцами, способными контролировать любое сгибание, в то время как икры состоят из ряда относительно небольших и в основном тонких мышц. К счастью, каждая из этих мышц имеет перистую организацию, ведущую к длинным сухожилиям, при этом каждая мышца облачена в свой собственный эпимизий и мышцы сгруппированы вместе в фасциальные отделы, так что в управлении силами участвует целая череда фасциальной поддержки.

■ ПЕРЕДАЧА СИЛЫ ЗА ПРЕДЕЛЫ МЫШЦЫ И ФАСЦИАЛЬНЫХ ОТДЕЛОВ

В дополнение к тому, что сила действует на сухожилия и другие непосредственные мышечные соединения с костями, значительная часть мышечной силы может передаваться через соединительные ткани внутри компартмента. Важной функцией силового воздействия на стенки компартментов является повышение их жесткости и создание — в дополнение к костному скелету — протяженного довольно жесткого «скелета» соединительной ткани.

Юджин и др., 2003

Как и в случае с описаниями опорно-двигательного аппарата, которые мы до этого момента рассматривали в этой главе, тексты по анатомии часто подчеркивают продольное расположение скелетно-мышечных тканей. Однако продольная передача силы — это лишь одна, хотя и важная, составляющая, поскольку сила может также передаваться по горизонтали от одной мышцы к ее соседям и дальше. Эта относительно новая область исследования раскрывает многочисленные преимущества паутиннообразной непрерывности фасциальных тканей, в том числе их роль в передаче и усилении силы, а также в усилении проприоцепции.

Передача силы за пределы «обычных» границ мышцы вызывает удивление исключительно из-за того разделения тканей, которое мы видим в учебниках по анатомии. Если же рассмотреть заезженную, но весьма информативную аналогию с апельсином, то она даст совершенно иное представление об анатомическом устройстве — поперечный разрез полушария апельсина показывает его целостность и связность. Его узор, с одной стороны, показывает положение долек апельсина и их «границ», а с другой — непрерывность волокон от одной дольки к другой.

Раздельность мышц тела, как и долек апельсина, является лишь результатом их рассечения.

Способность передавать силу за пределы мышечно-сухожильной единицы, называемая внемышечной передачей силы, зависит от той же непрерывности волокон. Разные участки ткани различаются по своим функциям и приспособляются соответствующим образом, но переход от сухожилия к связке и суставной капсуле или от эпимизия к рыхлой соединительной ткани (см. рис. 1.13) является переходом между взаимосвязанными типами клеток. За исключением несчастных случаев и операций, в теле нет никаких пробелов или разделений.

Прежде чем приступить к рассмотрению передачи силы между мышцами, мы должны сначала решить вечную проблему анатомии — проблему терминологии. Стремление понять действие отдельных анатомических частей создает впечатления, что эти части работают независимо друг от друга. Как можно было бы описать форму и функцию мышцы, не создавая впечатление, что она представляет собой дискретную единицу? Диссекция и наличие названий помогают в описаниях, на основе которых может прийти понимание. Однако эти же описания одновременно и «исключают» эту единицу из ее окружения и ее многочисленных взаимодействий за пределами ее явных границ. Поскольку мы пытаемся подчеркнуть присутствующие в теле взаимодействия, в особенности — во время движения, то для того, чтобы закрыть более крупный гештальт, мы сначала должны признать ограничивающий эффект имеющегося словарного запаса. Таким образом, хотя понятие «доек» апельсина не существует внутри самого апельсина и является исключительно результатом ручного разделения, ради ясности повествования мы должны принять описательную необходимость и разбить анатомическое целое на его функциональные компоненты.

Принимая во внимание вышеизложенное, ногу можно разделить на четыре отдела: пе-

* Здесь перечислены лишь основные мышцы для каждого отдела; мы уточним перечень тканей в каждом отделе в следующей главе.

редний (передняя большеберцовая мышца, длинный разгибатель пальцев стопы и длинный разгибатель большого пальца стопы), латеральный (длинная и короткая малоберцовые мышцы), задний (икроножная, камбаловидная и подошвенная мышцы) и глубокий задний (задняя большеберцовая мышца, длинный сгибатель пальцев стопы и длинный сгибатель большого пальца стопы); стопу также можно разделить на четыре или девять отделов, в зависимости от выбранного критерия (для дальнейшего использования мы возьмем разделение на четыре отдела).

Разделение на отделы не является уникальной особенностью нижней конечности — оно характерно для всего тела, поскольку разделение функциональных единиц на «упакованные» группы дает много преимуществ. Такое разделение позволяет фасциальным компартментам легко скользить друг за другом и препятствует распространению инфекции или кровотечения из одного отдела в другой. Однако наличие подобной локализации также сопряжено с потенциальной опасностью компартмент-синдромов, когда повышение давления внутри отдела начинает воздействовать на кровь и/или нервные пути, и в итоге требуется уменьшение давления путем разрезания компартментного мешка, — процедура, известная как фасциотомия.

Само по себе наличие внутрикомпаратментного давления не всегда является чем-то плохим (как можно сказать и о многих других аспектах нашей системы), многое будет зависеть от его степени. При нормальной двигательной функции мы извлекаем пользу из увеличения давления в компартментах, поскольку оно способствует увеличению жесткости тканей, тем самым являясь еще одним аспектом механизмов эффективности организма.

Передача силы внутри и между компартментами была исследована профессором Юджином (см. стр. 131), который провел многочисленные исследования на эту тему. В представленных им работах есть множество достойной рассуждения информации, но мы уже исследовали большую часть тех динамик, о которых он говорит, и регулирование жесткости тканей является наиболее важной из них. В ходе

многочисленных экспериментов Юджин продемонстрировал, как напряжение и деформация распространяются за пределы отдельных мышц на окружающие ткани и как любое нарушение в паутине соединительной ткани нарушает передачу силы.

Выполнение в экспериментальных условиях фасциотомии переднего компартмента у крыс иногда увеличивало выходную силу содержащихся в этом отделе мышц, но с большей вероятностью уменьшало ее (Huijing и соавт., 2003). Нарушение целостности обволакивающего «мешка» повлияло на передачу усилия от мышц. Похоже, что потеря компрессии, создаваемой фасциальным компартментом, уменьшала общую жесткость ткани и снижала ее способность передавать силу сокращений. Снижение давления внутри отсека из-за фасциотомии привело к снижению жесткости и потенциальной выходной силы.

Фасциальная компарментализация до сих пор недостаточно изучена, но выводы из этой истории заключаются в том, что отделы играют важную роль в регулировании жесткости. Как мы увидим в следующей главе, мышцы подразделяются на функциональные группы. Например, передняя большеберцовая мышца отвечает за тыльное сгибание и инверсию голеностопного сустава и сгруппирована с другими тыльными сгибателями голеностопного сустава — длинным и коротким разгибателями пальцев стопы — в «переднем отделе». Все мышцы, пересекающие голеностопные суставы, сгруппированы внутри фасции голени.

Контроль сустава редко осуществляется лишь одной мышцей, для правильной стабилизации и мобилизации сустава требуется взаимодействие множества мышц. С функциональной точки зрения очевидно, что активное натяжение передней большеберцовой мышцы также укрепит соединительную ткань вокруг ее соседей-синергистов. Работа в тугом жестком фасциальном мешке увеличивает выходную силу и снижает мышечное усилие, и это преимущество распределяется между другими отделами благодаря передаче внемышечной силы через фасциальную сеть.

Чтобы оценить функциональное значение фасциальной сети, может быть полезно

провести сравнение между костными трабекулами и фасциальной тканью с точки зрения функциональной иерархии тканей. Трабекулы образуют самоорганизующийся внутренний «микроскелет», обеспечивающий жесткость костям «макроскелета». Этот внутренний скелет приспособляется к повторяющимся за месяцы и годы жизни нагрузкам и деформациям. Точно так же адаптируемые мягкие ткани образуют еще один «скелет мягких тканей», наружный по отношению к «макроскелету», обладающий сократительными элементами, которые могут автоматически и бессознательно регулировать его жесткость в ответ на проходящую через тело деформацию. В поисках минимизации усилий и метаболических затрат эта электрически чувствительная мышечная ткань может контролировать и регулировать свой собственный тонус, чтобы обеспечить оптимальную передачу силы при минимальном использовании калорий.

Похоже, каждый уровень ткани устроен таким образом, чтобы искать баланс между стоимостью производства, прочностью ткани и весом материала посредством использования определенной формы петли постоянной обратной связи. Эта петля обратной связи, как мы уже видели в предыдущей главе о формировании костей, использует механорецепторы, которые позволяют постоянно ощущать действующую в паутине ткани силу.

■ ФАСЦИАЛЬНАЯ ПРОПРИОЦЕПЦИЯ И СИСТЕМА, РЕГУЛИРУЮЩАЯ ЖЕСТКОСТЬ

Динамика совместного натяжения и жесткости между компартментами представляет собой передачу силы, которая в то же время может быть возможным вариантом передачи информации. Другой голландский исследователь, Джаап ван дер Валь (2009), заметил, что механорецепторы удерживаются на месте коллагеновой фасциальной тканью. Оспаривая представление о дискретных тканевых слоях, ван дер Валь продемонстрировал, что мышцы, сухожилия, связки и суставная капсула расположены последовательно друг за другом, а не параллельно,

как это слишком часто представлено в ознакомительных текстах по анатомии.

Очевидно, что имеет смысл поместить «органы восприятия» механической силы в непрерывную сеть, отвечающую за передачу силы. Ван дер Валь подчеркивает взаимосвязь между архитектурным дизайном и расположением того или иного типа ткани, функциональной ролью ткани и размещением соответствующих механорецепторов, которые в совокупности способствуют проприоцептивной обратной связи. Передача усилия за пределы отдельных тканей через коллагеновые ткани передает локальные изменения натяжения и жесткости в соседние области. При правильной работе — как на уровне коллагена, так и на уровне тканей нервной системы — организм способен адаптироваться к оптимальной степени жесткости для выполнения поставленной задачи.

Передача миофасциальной силы за пределы отдельных мышц (Huijing и соавт., 2003) и непрерывность фасциальной ткани и ее механорецепторов (van der Wal, 2009) обеспечивают механизм «системы регулирования жесткости», описанный Савицки (Sawicki и соавт., 2009). Представление о скелетно-мышечной системе как о постоянно настраивающей свой уровень жесткости для выполнения поставленной задачи путем создания или контроля необходимых сил — это одно из самых полезных изменений, которые я внес в свое восприятие анатомии движения.

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

Мы вновь увидели, как тесно переплетаются строение ткани и ее функция. Такая взаимосвязь между тканями и функциями создает определенные трудности при описании измеримых преимуществ напряжения и деформации тканей, направления мышечных волокон и сокращений таким образом, чтобы отдать должное каждому из этих аспектов, в то же время не представляя их в качестве отдельных составляющих. Мы вновь возвращаемся к экологичной идее о том, что тело — это связанная система взаимозависимых элементов.

Ни один аспект поддающейся описанию анатомии не существует изолированно от других, однако нам приходится исследовать каждую часть по отдельности, чтобы измерить ее роль и влияние на другие части. Как только у нас будет достаточно понимания индивидуальной динамики каждой отдельной составляющей, мы сможем начать соединять их вместе, как кусочки мозаики, чтобы получить полную картину функциональной анатомии.

Каждая мышечно-сухожильная единица имеет свою собственную архитектуру с такими переменными, как направление волокон, длина волокон, длина сухожилия и жесткость. Каждая мышечно-сухожильная единица располагается в области тела, обладающей своими собственными уникальными требованиями к действующим на нее силам (силе тяжести, силе реакции опоры и силе инерции), и поэтому ее архитектура эволюционировала так, чтобы удовлетворить эти требования, будь то большая длина и низкая прочность, высокая прочность и эластичность сухожилий или какая-то другая вариация.

Из-за природы активных и миоциновых филаментов мышцы, как правило, обладают наибольшей силой, когда работают в среднем диапазоне, а окружающая коллагеновая

фасциальная ткань, по-видимому, помогает им в этом, принимая на себя часть нагрузки и позволяя мышцам оставаться на пике соотношения силы-длины, а также работать при оптимальном соотношении силы/скорости. Мышечные и коллагеновые волокна дополняют друг друга и взаимодействуют при управлении движением, при этом работа мышечных волокон направлена на производство, замедление или контроль инерции, и, по мере необходимости, они делают это концентрически, эксцентрически или изометрически.

Реагируя на сигналы механорецепторов, мышечно-сухожильные элементы являются быстродействующими регуляторами жесткости и постоянно реагируют на возникающие в той или иной ситуации потребности. Механорецепторы в фасциальной сети контролируют баланс натяжения и сигнализируют в случае необходимости соответствующих реакций.

Гэри Грей, известный американский физиотерапевт, которого также называют «Отцом Функции», говорит, что мы должны искать «истину движения». Любое успешное движение требует контроля сил для достижения желаемого результата, а контроль сил — это просто создание соответствующей жесткости.



ВНЕШНИЕ МЫШЦЫ

В строении стопы человека нет ничего случайного. Когда, по мере перехода к прямохождению по земле на двух ногах, вес тела полностью переместился на дочеловеческую стопу, такое увеличение нагрузки привело далеко не только к изменению костей стопы.

Мортон, «Передвижение человека и форма тела» (1952, стр. 28)

■ ВВЕДЕНИЕ

Хотя размер и форма пяточной кости менялись с течением времени, общий размер стопы человека не сильно увеличился после того, как она стала нести дополнительную нагрузку при прямохождении. В главах 3 и 4 мы уже видели, как деформация бедренной кости уменьшается за счет стабилизирующего действия силы окружающих ее мышц. Ни одна мышца не несет полной ответственности ни за поддержку костей стопы, ни за поддержку

перемещающегося над стопой тела; все они работают вместе, увеличивая жесткость напряжения и обеспечивая баланс и контроль движения.

Подходя к стопе под разными углами и прикрепляясь к разным ее точкам, наружные мышцы обеспечивают силовое замыкание — то увеличение жесткости стопы, которое ей необходимо в момент подъема при схождении с пальцев. Именно благодаря совместной скоординированной силе мышц и оптимизации формы их тканей кости стопы могут быть столь тонкими.

В этой главе основное внимание будет уделено группам длинных мышц, которые выходят за пределы стопы и прикрепляются к большеберцовой, малоберцовой и бедренной костям; многие из этих мышц широко известны. В главе 7 мы рассмотрим более короткие мышцы стопы, но в каждой главе важно помнить о многозадачности и том функциональном пересечении, которое постоянно присутствует в мягких тканях. Для построения общей картины необходимо соотнести фасциальные динамики, рассмотренные в предыдущей главе, с мышечными движениями.

Большая часть функциональной скелетно-мышечной анатомии довольно проста.

Функциональная анатомия в основном сводится к тому, «какая мышца куда идет» и «что она делает», поэтому мы можем рассуждать довольно простыми категориями: все, что нам нужно знать, это какие суставы и под каким углом пересекает та или иная мышца. Знание уже только этих двух составляющих обеспечивает нас почти всей необходимой информацией.

Разумеется, мы хотим не просто перечислить всю эту информацию, мы хотим понять «почему» — почему мышца имеет именно такую форму? Почему ее сухожилие имеет определенную длину и форму? Понимание формы поможет нам глубже увидеть связи и взаимодействия тканей во время движения.

Форма любой мышцы становится понятной лишь тогда, когда мы рассматриваем ее в контексте ее окружения, в том числе требований к движению. Во многих отношениях форма и функция — это одно и то же: функция определяет форму, а форма определяет функцию, — поэтому мы не можем понять одно без другого.

В этой главе есть несколько важных подсказок и приемов определения действия и свойств мышц, а также она может помочь вам понять предыдущие главы, предоставив вам больше контекста. Если у вас возникли затруднения с содержанием предыдущих глав, прочитайте главы 6 и 7, а затем снова вернитесь к главам с 3 по 5. Мне потребовалось 30 лет, чтобы собрать все это воедино, так что не думайте, что вы должны все это усвоить всего за несколько часов чтения.

Аналогичным образом, если вы не настолько знакомы с мышцами, бегло прочитайте эти две главы, а затем перейдите к оценкам и упражнениям из глав 8 и 9. Способы оценки и упражнения, которые мы здесь приводим, намеренно просты и помогут вам лучше понять мускулатуру. Конечно, можно было бы также добавить сюда всевозможные причудливые ортопедические нюансы, превратив эту книгу в энциклопедию стопы, но меня это не интересует. Я скорее рассматриваю эту книгу как полноценный справочник.

■ ЧТО В НАЗВАНИИ?

Один из многих разочаровывающих моментов в анатомии заключается в том, что никто не может решить, как называть отдельные ее части. Мы уже столкнулись с этой проблемой, когда говорили о сложных суставах стопы, которые в некоторых случаях называются по анатомическому стандарту, а в других — в честь давно умерших французских хирургов. Выбор в этом случае нередко зависит от того, какому из соглашений следует человек или на каких читателей он ориентируется: так, например, хирургическое сообщество с большей вероятностью будет использовать такие названия суставов, как сустав Лисфранка или Шопара, а не громоздкие, но анатомически информативные названия, вроде «предплюсне-плюсневые суставы» и «перечный сустав предплюсны».

Другой конфликт в терминологии заключается в том, какое из соглашений использовать для обозначения мышц. Мышцы могут быть описаны с точки зрения трех источников номенклатуры — положения, функции или формы, — и каждая из них используется для мускулатуры голени и стопы. Все три соглашения после расшифровки терминологии и объяснения традиций предлагают несколько полезных советов. Соглашение, которое дает нам меньше всего подсказок о положении и функции, — это соглашение о форме. Например, такие известные нам названия мышц плеча, как «ромбовидная мышца» и «трапециевидная мышца», ничего не говорят нам о том, где они находятся и что они делают. Тем не менее они дают нам четкое представление о мощности мышцы: мы знаем, что имеющая квадратную форму ромбовидная мышца, вероятно, обладает всего одним направлением тяги и участвует в обеспечении стабильности, в отличие от трапециевидных мышц с широким диапазоном углов наклона волокон, которые обеспечивают значительную мобильность.

Мышцы, названные по их положению, дают нам примерное представление о том, где они находятся. Например, передняя большеберцовая мышца должна быть на передней части большеберцовой кости. И из этих двух слов мы уже можем сделать гораздо больше

выводов, поскольку мышцы часто называют противоположными названиями. Так, например, если есть передняя большеберцовая мышца, мы можем предположить, что должна быть и задняя большеберцовая мышца (и не удивительно, что она есть!). Это правило также работает и для мышц с функциональными названиями: если есть сгибатели (например, длинный сгибатель большого пальца стопы), есть вероятность, что у нас должны быть и разгибатели (например, длинный разгибатель большого пальца стопы), а для каждой приводящей мышцы должна быть соответствующая отводящая мышца, и т. д. Эта эвристика верна для большинства мышц, которые мы увидим ниже, но она немного рушится при рассмотрении области бедра, где располагается множество мышц, называемых приводящими, и ни одной мышцы, названной «отводящей», поскольку отводящие мышцы бедра обычно называются по их положению, как в случае с ягодичными мышцами.

Хотя анатомическое название не дает достаточной информации о функции, а функциональное название не указывает на положение, положение и функция фундаментально взаимосвязаны. Так, например, если мышца пересекает переднюю часть таранного сустава, она отвечает за тыльное сгибание; если она пересекает заднюю часть сустава, она должна быть подошвенным сгибателем. Мы могли бы написать это предложение иначе, сказав, что если мышца является подошвенным сгибателем, она должна пересекает заднюю часть сустава, а если эта мышца отвечает за тыльное сгибание, то она должна пересекает переднюю часть сустава.

Определение структуры из функции и наоборот — это еще одно проявление переплетающихся взаимодействий между двумя динамиками (см. рис. 3.3). Поскольку функция мышцы определяется тем углом, под которым она пересекает сустав, использование соглашений о названиях позволяет нам сделать разумное предположение, что передняя большеберцовая мышца пересекает переднюю часть таранного сустава и, следовательно, должна являться тыльным сгибателем, и в этом действии ей противостоит ее сосед, задняя

большеберцовая мышца, пересекающая таранный сустав с другой стороны. Как правило, положение мышцы определяет ее действие.

Использование той же логики в обратном порядке позволяет нам угадать положение функционально названных мышц. Например, мы можем сделать вывод, что длинный сгибатель большого пальца стопы должен пролетать вдоль подошвенной поверхности стопы к задней части ноги. Мы можем сделать вывод, что, вероятно, у нее есть противодействующая мышца, называемая длинным разгибателем большого пальца стопы, проходящая по тыльной поверхности стопы и голени — и так оно и есть. В верхней части тела сгибатели пересекают суставы спереди, а разгибатели — сзади. Это соотношение меняется на противоположное в нижней части тела из-за перекручивания зачатка конечности в процессе внутриутробного развития, которое уводит «переднюю часть» нижней конечности назад (рис. 6.1). Именно эта ротация конечности является причиной того, почему дорсальной (тыльной) поверхностью стопы мы называем верхнюю часть стопы, и объясняет, почему термин «тыльное сгибание» используется для описания движения этой поверхности к передней поверхности голени*.

Знание того, что лежит в основе соглашений о номенклатуре, может помочь «взломать» эти коды, поскольку обычно в каждом названии содержится смысл и обоснование. Без объяснения этих правил изучение мышц и их действий превращается в обычное упражнение на механическое запоминание. Для изменения научных соглашений требуется время, как мы видим на примере малоберцовых мышц (*fibularii*), которые во многих статьях до сих пор называются на старый манер (*peroneals*), несмотря на то, что их название было изменено несколько лет назад. Эти два слова происходят

* Подумайте о спинном плавнике на верхней части тела акулы или кита, являющемся сильной защитой спины. Вентральная поверхность считается передней частью тела и содержит более тонкие структуры. Это же соотношение сохраняется и в нашей перекрученной нижней конечности, где дорсальная поверхность (наша передняя часть) обычно более объемная и более защищенная, чем вентральная поверхность (наша задняя часть), по которой к стопам и от них проходят тонкие сосуды.

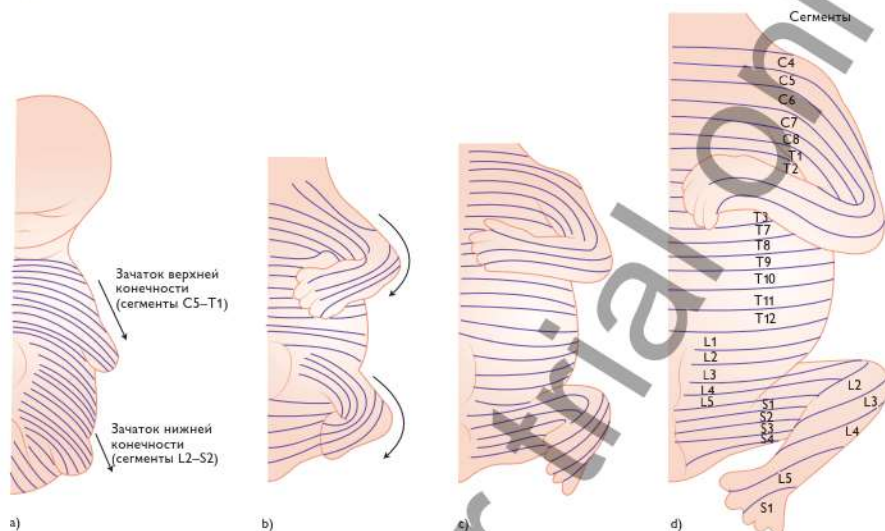


Рисунок 6.1. Зачатки верхних конечностей появляются примерно на четвертой неделе развития (а), а зачатки нижних конечностей — неделей позже. В течение следующих двух-трех недель дистальные концы уплощаются, образуя напоминающие кисти рук и стопы «лопасты», по мере скручивания проксимальной части верхней конечности латерально, а нижней конечности — медиально (b и c). Нижняя конечность продолжает скручиваться ниже колена, чтобы привести большой палец стопы к медиальной стороне (d). Линии указывают на спинальную сегментацию иннервации кожи (известную как дерматомы) и представлены здесь для визуальной наглядности торсий, происходящих в процессе развития.

из разных языков: *peroneal* — из греческого, а *fibularis* — из латыни. Оба слова относятся к напоминающей булаву малоберцовой кости (очевидно, что малоберцовые кости различных нечеловеческих видов использовались в качестве булавок), но в какой-то момент возник языковой конфликт: латинское название использовалась для обозначения кости, имеющей форму булавы, а греческое — для обозначения прикрепляющихся к этой кости мышц. Есть определенная логика в том, чтобы использовать латынь для обозначения как самой малоберцовой кости, так и связанных с ней мышц, поэтому для обозначения прикрепляющихся мышц было предложено использовать латинскую форму (*fibularis*) вместо греческого названия (*peroneals*). К сожалению, не все сразу приняли эти изменения, и вы по-прежнему будете встречать научные рецензируемые статьи, в которых упоминается старое название малоберцовых мышц (*peroneals*).

Существует еще один сбивающий с толку анатомический стандарт, касающийся использования слов «отведение» и «приведение» при описании действий самой стопы и внутри нее. Существует два соглашения по поводу ориентира, относительно которого описывается направление движения: либо от средней линии второго пальца стопы (аксиальная), либо от средней линии тела (срединная сагиттальная, рис. 6.2). Мы увидим это в следующей главе при описании действий внутренних мышц стопы, поскольку они названы в соответствии с осевым соглашением, которое в качестве ориентира использует второй палец стопы*.

Аксиальный ориентир, как правило, используется при описании движения пальцев стопы

* Похожая проблема существует при обозначении движений кисти руки и пальцев руки, с той лишь разницей, что в качестве ориентира принято использовать третий палец руки, а не второй.

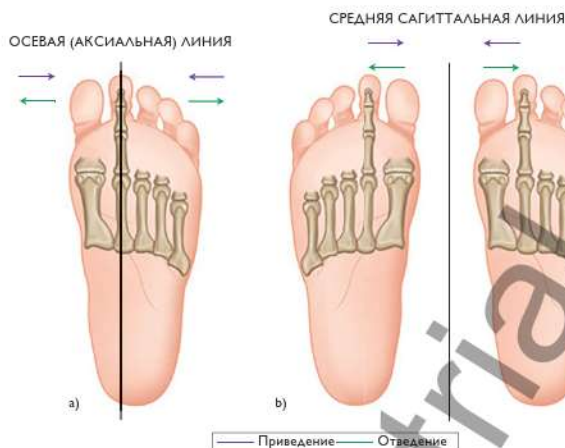


Рисунок 6.2. Существует два соглашения относительно приведения и отведения стопы и пальцев ног. Первое, использующее среднюю линию, проходящую через второй палец стопы (а), имеет тенденцию относиться к взаимодействию и движению плюсневых костей и пальцев стопы, в то время как второе использует срединную сагиттальную линию тела и обычно относится к движению стопы и через стопу, а не пальцев ног (б).

относительно друг друга, в то время как срединная сагиттальная линия описывает взаимодействия в стопе в целом. Переключение с одного соглашения на другое обычно очевидно из контекста, в котором они используются. Например, разведение пальцев стопы представляет собой отведение от средней линии второго пальца стопы, в то время как отведение в ладьевидно-клиновидном суставе будет отведением относительно срединной сагиттальной плоскости.

■ МЫШЦЫ, МЕШКИ И БЛОКИ

В главе 5 мы рассмотрели три механизма фасциальной эффективности: напоминающая пружину роль сухожилий, которая позволяет мышцам оставаться близкими к изометрическим; роль фасции в увеличении выходной мощности за счет увеличения соотношения силы-длины и силы-скорости; и роль сухожилия в ослаблении или демпфировании деформации, что позволяет мышце также работать

в эксцентрическом режиме на длинах и скоростях, которые оптимизируют ее силу (рис. 5.18).

Аналогичным образом можно классифицировать многофункциональные возможности мышечных тканей, которые регулируют свою жесткость, действуя как устойчивые к силе тяжести опоры контроллеры упругих пружин, двигатели для обеспечения ускорения или демпферы накопленной упругой энергии (Farris & Raiteri, 2017a&b).

Действуя вместе как мышечно-сухожильная единица, мышцы и фасции постоянно ищут оптимальную степень жесткости во время движения. В этом смысле даже отсутствие движения, например, стояние на месте, требует активного тонуса в определенных мышцах — то есть мышечно-сухожильная единица выступает в роли распорки. Большая часть коммуникации между нашими проприоцептивными органами происходит предсознательно, при этом большой процент сенсорной информации поступает через подошву и ткани стопы и голеностопа. Поэтому здоровье тканей и обеспечиваемая обувью среда важны не только для здоровья

самой стопы, но и для баланса и координации всего тела*.

Как неоднократно писал Мортон, стопы взаимодействуют с целым рядом больших сил, в частности, с силой тяжести, и хотя он не упоминал напрямую силу инерции, он намекал на нее в своих трудах, когда сообщал нам о мышечном действии при создании и контроле движения. Мортон описывал использование эластичности и повторного использования энергии, называя этот процесс «глубоко укоренившимся явлением, которое вносит непосредственный вклад в схему экономической эффективности» (1952, стр. 250), но подчеркивал именно действие силы тяжести, а не силы инерции. Нам легко понять действие силы тяжести, в то время как роль силы инерции и того, как она влияет на мягкие ткани, чуть сложнее. Инерция, направленная вперед, вниз, а также вращательная инерция удлиняют ткани по мере того, как они контролируют движение, и такая эксцентрическая нагрузка помогает создать динамику предварительного натяжения и отдачи, описанную в предыдущей главе.

Наши относительно параллельные стопы проходят через «перекаты» (пятки, голеностопа, передней части стопы и пальцев стопы) по мере того, как мы движемся вперед, и эта направленная вперед инерция движения должна контролироваться и замедляться мягкими тканями. Форма костей, выравнивание суставов и углы мягких тканей формируют эффективную систему, которая позволяет нам удерживать наш высокий вертикальный скелет на трех основных точках контакта на каждой стопе, а затем переключаться по ней, перенося себя вперед. Если свести это действие к столь базовым элементам, оно замечательно и выглядит довольно просто.

Основным ключом к пониманию общего устройства стопы и голеностопного сустава является выравнивание двух голеностопных суставов и углы, под которыми мышцы переходят от ноги к стопе (рис. 6.3). Семь основных

сухожилий пересекаются позади таранного сустава**, что свидетельствует о важности подошвенного сгибания (когда мышцы действуют как ускорители) и степени силы, участвующей в контроле тыльного сгибания (когда мышцы действуют как замедлители и распорки).

Две оси голеностопных суставов обеспечивают нашу способность балансировать всего на двух ногах. Наши стопы имеют большую длину спереди от голеностопных суставов, нежели позади них, что облегчает сохранение баланса при небольшом наклоне вперед; кроме того, у нас больше мышц (по объему и количеству), расположенных позади оси таранного сустава, что способствует контролю наклона вперед. Однако наши узкие стопы обеспечивают лишь узкую линию поддержки слева и справа во время движения. Они также по своей природе шаткие из-за смещения между пяточной костью и таранной костью вдоль подтаранной оси (обозначены U-U1, рис. 6.3b), и для того, чтобы контролировать и балансировать наклоны из стороны в сторону, им необходима помощь со стороны мышц, расположенных по обе стороны от голеностопа.

Как мы видели в предыдущих главах, наклон пяточной кости является одним из триггеров для размыкания стопы в пронацию, однако костная организация таранной и пяточной костей создает область высокого напряжения и нестабильности. Такая нестабильность полезна для амортизации при ударе, а последующая пронация деформирует поддерживающие мягкие ткани посредством той энергии, которую можно использовать для повторного формирования возникающего в ходе супинации жесткого рычага при подготовке к схождению с пальцев.

И снова мы видим больше пересечений сухожилий на той стороне, которая требует большей поддержки, замедления и коррекции. Куполообразная природа стопы, смещение пяточной и таранной костей и наклон

* Проприцептивный вклад имеет большое значение для позиционной работы тела и заслуживает гораздо большего исследования, чем позволяет пространство этой книги. Поэтому для более глубокого изучения этого вопроса я рекомендую вам прочитать работу доктора Emily Splichal и Nabes Technology.

** Восемь, если вы хотите включить сюда слабые подошвенные мышцы; остальными семью мышцами являются камбаловидная мышца, икроножная мышца, длинная и короткая малоберцовые мышцы, задняя большеберцовая мышца, а также короткий сгибатель большого пальца стопы и короткий сгибатель пальцев стопы.

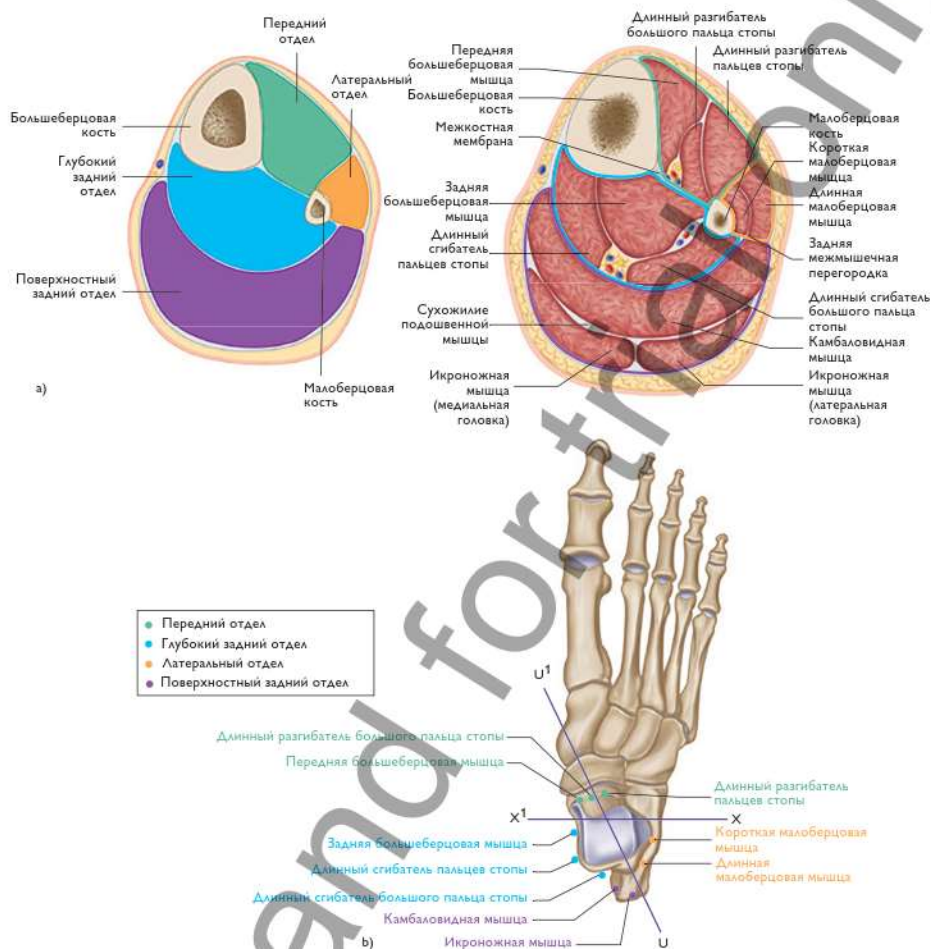


Рисунок 6.3 а) Мышцы каждого отдела связаны с разными частями стопы и пересекают голеностопные суставы в разных квадрантах. б) Две основные оси суставов нуждаются в контроле со стороны наружных мышц. Подошвенное сгибание/тыльное сгибание таранного сустава происходит вдоль оси X-X¹. Все мышцы, пересекающие сустав за осью таранного сустава, будут действовать как подошвенные сгибатели, а те, что пересекают его спереди от оси, — как тыльные сгибатели. Инверсия/эверсия подтаранного сустава происходит вдоль оси U-U¹, и мышцы, пересекающие подтаранный сустав с медиальной стороны, обеспечивают инверсию, а пересекающие его с латеральной стороны — эверсию. С функциональной точки зрения, чтобы оценить общую роль мышц в походке, мы должны развернуть эти «действия» в обратную сторону. Мышцы, проходящие сзади от таранного сустава, замедляют тыльное сгибание, что необходимо для контролируемого приземления и для регулирования тыльного сгибания во время фазы переката голеностопного сустава при ходьбе. Мышцы, расположенные медиальнее оси подтаранного сустава, будут замедлять эверсию, часть реакции пронации при контакте с землей, а затем они помогают с коррекцией стопы в инверсию и супинацию перед шагом с пальцев. (Адаптировано из Капанжи, 2018)

подтаранного сустава внутрь создают в своей совокупности нестабильность с медиальной стороны. Как мы увидим ниже, все семь основных сухожилий, которые пересекают внутреннюю часть подтаранного сустава*, проходят под разными углами и имеют разные места прикреплений, используя разные стратегии для исправления пронации и поддержки супинации при разных фазах движения.

Мортон (1952) сравнивал силу голени с силой верхней конечности, указав, что даже ребенок может скакать, подбрасывая на ногах 50 фунтов веса своего тела, в то время как взрослому человеку будет трудно подбросить 50 фунтов руками. Хоть Мортон делает несколько несправедливое сравнение (поскольку, в отличие от согнутых локтей жонглера, икроножные мышцы работают почти прямо под центром тяжести), все же есть правда в том факте, что, хотя верхние и нижние конечности имеют общие анатомические особенности, их относительная сила сильно различается. Мышцы голени и стопы должны контролировать инерцию тела во время ускорения (например, при беге и ходьбе) и замедления (замедление при приземлении), нередко при приподнятом положении пятки и при контакте с землей подушечек стопы.

Когда пятка приподнята, возникает смещение между точкой опоры — подушечкой стопы — и весом тела, действующим через комплекс голеностопного сустава. Как мы видели ранее, этот «длинный рычаг» состоит из множества костей стопы, в отличие от костных рычагов бедренной и большеберцовой костей. Поддержка и компрессия бедренной кости обеспечиваются окружающими ее мышцами, а большеберцовой кости — прикрепляющимися мягкими тканями и ее трехугольной формой. Стопа должна создавать устойчивый рычаг из длинной череды костей самой странной формы. Мы уже рассматривали в главе 4 «геометрическое» замыкание, создаваемое смыканием костей, и лишь упомянули

«силовое» замыкание мягких тканей, которое теперь мы можем изучить более подробно.

Мышечно-сухожильные единицы, переходящие в стопу от голени, являются важной частью механизма силового замыкания стопы; им помогает их архитектура и та траектория, по которой они проходят вокруг системы блоков голеностопного сустава (см. также рис. 4.6). Сухожилия трех из четырех отделов голени располагаются за осью таранного сустава, что помогает им обеспечивать поддержку стопе, когда она поднимается на подушечку стопы[†], и в совокупности они обеспечивают в четыре раза большую силу для подошвенного сгибания, нежели обеспечивают тыльному сгибанию передний отдел голени.

Удерживатели — больше, чем просто полоски сухожилий

Как мы видели ранее, анатомия страдает от естественных ограничений, связанных с необходимостью описания сложных структур и их взаимодействий. Удерживатели (retinacula), название которых произошло от латинского *retinere* — «сохранять, удерживать», — также обязаны сложностью своего понимания этой ограниченной номенклатуре. К счастью, знаменательная статья группы из Падуи под руководством Карлы Стекко помогла уточнить и расширить наше представление об этих важных структурах (Stecco и соавт., 2010).

Исследовав посредством ряда методов 27 ног, они смогли подтвердить, что удерживатели голеностопного сустава являются продолжением фасции голени, глубокой фасции ноги. Хотя удерживатели неотделимы от остального слоя глубокой фасции, их можно легко идентифицировать по утолщению ткани.

Как и остальная часть фасции голени, удерживатели состоят из трех слоев ткани

* Основными сухожилиями, расположенными медиальнее подтаранного сустава, являются: камбаловидная мышца, икроножная мышца, задняя большеберцовая мышца, длинные сгибатели большого пальца и пальца стопы, передняя большеберцовая мышца и длинный разгибатель большого пальца стопы.

†* Подошвенные сгибатели также помогают в замедлении при приземлении с подушечки стопы на пятку.

с параллельными коллагеновыми волокнами, которые чередуются по своей ориентации и разделены тонким слоем рыхлой соединительной ткани. Судя по их внешнему виду, коллагеновые слои удерживателей более плотные, а слои рыхлой соединительной ткани тоньше, чем фасция голени. Хотя удерживатель представляет собой утолщение фасции голени, Стекло и соавторы предполагают, что они не настолько сильны, чтобы играть значительную роль в системе блочного типа, несмотря на то что их часто описывают именно так.

В их статье предполагается, что из-за непрерывности удерживателей с различными мышцами, сухожилиями и костями они чувствительны к изменениям положения и тонуса. Удерживатели богаты нервными волокнами и проприорецепторами, что позволяет предположить, что они являются не пассивными стабилизаторами, а фасциальными специализациями, задача которых заключается в восприятии положения и движения голеностопного сустава.

Самые большие и сильные из подошвенных стибателей, камбаловидная и икроножная мышцы, прикрепляются только к пяточной кости, в то время как другие сухожилия обвивают лодыжки и достигают среднего и переднего отделов стопы. Камбаловидная и икроножная мышцы располагаются вблизи средней линии стопы, все мышцы глубокого заднего отдела проходят медиально, а мышцы латерального отдела оборачиваются вокруг лодыжки с латеральной стороны. Каждый отдел играет различную роль в движении и балансе стопы, и наличие этих сильных мышц с длинными эластичными сухожилиями помогает стопе переключаться между множеством ее ролей. Продвигая нас и поддерживая наш баланс, мышцы должны вырабатывать силу и поглощать удары, затрачивая при этом минимальное количество энергии, а для постоянной регуляции жесткости и направления сокращения требуется информация от механической среды.

Длинные сухожилия латерального и глубокого заднего отделов обвиваются вокруг блока таранной кости, проходя через бороздки в различных уголках и трещинах, образованных костями, и удерживаются на своем пути сильными утолщениями фасций — удерживателями (рис. 6.4). Удерживатели образуют верхние своды для сухожильных бороздок, чтобы предотвратить патологическое растягивание сухожилий (представьте, что сухожилие передней большеберцовой мышцы проходит по прямой от середины голени к плюсневой кости, а не направляется в обход и не удерживается на месте в передней части голеностопа с помощью «полосок» удерживателя). Но удерживатели — это больше, чем просто поддерживающие и направляющие «ремни», они также играют важную роль в проприоцепции.

Удерживатели содержат специализированные механорецепторы для восприятия мышечного тонуса во время пронации и супинации (Adstrum и др., 2017). Поскольку удерживатели представляют собой утолщения фасции голени, они также связаны с широкой фасцией бедра, и этот непрерывный слой соединительной ткани «может передавать аномальное натяжение удерживателям, изменяя проприоцептивную систему голеностопного сустава» (Stecco и др., 2010, стр. 209).

Несмотря на иллюстрации в учебниках, границы удерживателей произвольны и варьируются в зависимости от индивидуальной анатомии и паттернов использования. Удерживатели чувствительны к нагрузке от более глубоких сухожилий и, благодаря непрерывности ткани, к дистальным механизмам. В случаях проблем со стабильностью и контролем голеностопного сустава может быть полезно оценить функцию и напряжение тканей тазобедренного сустава и бедра, которые могут вызвать аберрантное напряжение в этих дистальных механорецепторных тканях.

■ КОМПАРТМЕНТЫ СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ ТКАНИ

Как мы видели в предыдущей главе, фасциальные отделы играют важную, но недооцененную



Рисунок 6.4. Поскольку сухожилия пролегают по костным борозкам вокруг лодыжек, они удерживаются на месте насыщенными механорецепторами утолщениями глубокой фасции. Эти утолщения, или удерживатели, имеют правильное направление волокон и играют важную механическую и сенсорную роль. (Адаптировано из книги Вуда Джонса, 1944)

роль в управлении силой. Хотя для более полного понимания этой динамики еще предстоит многое сделать, есть множество областей, где мы видим, что наружные фасциальные оболочки обеспечивают механические преимущества. Первым из них было образование удерживателя вокруг голеностопного сустава, но, судя по количеству мышечных прикреплений к этим фасциальным плоскостям, компартменты также обеспечивают жесткость и создают компрессию на более глубокие ткани.

Глубокая обволакивающая фасция, покрывающая ногу, — фасция голени — является продолжением широкой фасции бедра; она переходит в несколько мышц, в том числе в двуглавую мышцу бедра, портняжную мышцу, тонкую мышцу, полуперепончатую и полусухозильную мышцы (Standring, 2008). Фасция голени переходит в надкостницу лодыжек большеберцовой и малоберцовой костей и является особенно плотной в проксимальном и переднем отделах, где к ней также прикрепляются передняя большеберцовая мышца и длинный разгибатель пальцев стопы. Поскольку фасция голени получает волокна от сократительных тканей бедра и голени, эти мышечные волокна укрепляют ее, поскольку они работают, контролируя движения колена и лодыжки.

Глубокая обволакивающая фасция переходит в другие мышцы ноги и вокруг них, образуя переднюю и заднюю перегородки — фасциальные разделения между внутренними отделами ноги, которые мы видели на рис. 6.3. Глубокая

поперечная фасция, которая проходит между задним и глубоким задним отделами, обгибает подколенную мышцу и переходит в полуперепончатую мышцу. Даже межкостная мембрана, ткань между большеберцовой и малоберцовой костями, сливается с задней большеберцовой мышцей и переходит в межкостную связку дистального межберцового сустава.

Хотя эти разделенные на отсеки сумки часто изображают и обсуждают так, как если бы они были отдельными пассивными контейнерами для мышц, с биомеханической точки зрения они являются активными и чувствительными элементами. Эти наружные слои ткани соединены (и непрерывны) с более глубокими сократительными мышцами и продолжают связками и суставными капсулами. Каждый фасциальный слой работает и взаимодействует как часть единой механической и сенсорной системы тела, помогая контролировать и поддерживать движение.

Хотя мы должны рассматривать фасциальные ткани как непрерывные, с анатомической точки зрения их проще описывать, когда мы делим тело на секции. И снова возникает вопрос, о котором я уже упоминал при описании анатомии: следует ли автор анатомическому и «пассивному» соглашению, которое устраняет путаницу переменных, возникающих во время движения, или же он следует функциональному соглашению, которое, хотя и более поучительно и дает больше возможностей для понимания целостной системы, но требует

сопоставления сразу многих факторов и может на первый взгляд сбить с толку? В этом разделе мы пройдем по границе между этими двумя подходами и будем, с одной стороны, следовать общепринятому делению на четыре отдела, поскольку это может помочь в логике описания, но, с другой стороны, при этом анализировать функциональные аспекты.

■ ПОВЕРХНОСТНЫЙ ЗАДНИЙ ОТДЕЛ

Поверхностный задний отдел состоит из трех мышц — икроножной, камбаловидной и подошвенной — и, возможно, самой известной анатомической части — ахиллова сухожилия (рис. 6.5). Ахиллово сухожилие образовано трехглавой мышцей голени (лат. *sura* — «икра»), которая представляет собой составную мышцу, состоящую из икроножной мышцы (греч. *gaster* — желудок и *kneme* — нога) и камбаловидной мышцы (лат. *solea*, относящееся к одноименной рыбе и одинаковой форме рыбы и мышцы, и подошвы стопы).

Объединение двух основных мышц икр формирует самое толстое и сильное сухожилие в теле, и вместе они обеспечивают около 93% всей силы, необходимой для подошвенного сгибания голеностопного сустава или, что случается чаще, для контроля и замедления тыльного сгибания. Положение и сила ахиллова сухожилия обретают смысл, когда мы видим, какую роль оно играет в замедлении, и понимаем, как оно может перерабатывать энергию во время повторяющихся ритмичных движений, таких как бег, прыжки или ходьба.

Обратите внимание на перечень мест прикрепления и действий. Эти перечни приведены здесь для того, чтобы обеспечить дополнительную информацию, но они доступны почти в каждом учебнике по анатомии. Эти перечни могут отличаться в разных источниках из-за анатомических вариаций и предпочтений автора. Как обсуждалось в главе 5, в большинстве источников не обозначается,



Рисунок 6.5. Поверхностный задний отдел. Камбаловидная мышца — проксимальное прикрепление: линия камбаловидной мышцы, задняя поверхность большеберцовой кости и задняя часть головки малоберцовой кости. Дистальное прикрепление: медиальная часть вершины пяточной кости через ахиллово сухожилие. Действие: подошвенное сгибание в таранном суставе.

Икроножная мышца — проксимальное прикрепление: задняя поверхность мыщелков бедренной кости. Дистальное прикрепление: латеральная сторона вершины пяточной кости через ахиллово сухожилие. Действие: подошвенное сгибание в таранном суставе.

Подошвенная мышца — проксимальное прикрепление: латеральная надмыщелковая линия бедренной кости. Дистальное прикрепление: пяточная кость через ахиллово сухожилие. Действие: подошвенная мышца считается слабым подошвенным сгибателем и слабым сгибателем колена.

что «действия» — это движения в открытой цепи, которые можно было бы наблюдать, если бы не оказывалось сопротивления сокращению исключительно перечисленных мышц, т. е. речь идет о практически невозможном сценарии.

Благодаря постоянному использованию мышцы стали ассоциироваться с их действиями и обсуждаются либо как «подожженные сгибатели», либо как «инверторы», и это является одной из причин трудностей в изучении более широких функциональных ролей мышц. Я призываю вас сохранять гибкость мышления при визуализации мышцы и всегда помнить об их роли в управлении движением (которая нередко бывает противоположной их «действию»).

Источником, на который опирался я сам при составлении этих перечней, является Trail Guide to the Body Эндрю Биля (пятое издание), в котором содержится всестороннее описание поверхностной и пальпаторной анатомии и который является прекрасным ресурсом для расширения трехмерного представления анатомии человека.

Ахиллово сухожилие устроено спиралевидно, поскольку волокна камбаловидной и икроножной мышц обвивают друг друга, позволяя камбаловидной мышце прикрепиться к медиальной части пяточной кости. Спираль помогает увеличить прочность и эластичность сухожилия, что способствует увеличению его длины в 15 см на 4%. Деформация сухожилия использует способность волнистых и извитых волокон ахиллова сухожилия к отдаче. Деформация на более 4% от его длины приведет к разрыву поперечных связей коллагена в ахилловом сухожилии, что приведет к его переходу в пластическую фазу, а растяжение более

чем на 8% приведет к полному разрыву, что является слишком распространенной травмой при взрывных движениях.

Только лишь силы мышц будет недостаточно для создания толчка, необходимого на ранних этапах спринта (Lai и др., 2016). Система должна использовать преимущество деформации ахиллова сухожилия, чтобы оптимизировать соотношение силы-длины и силы-скорости для получения дополнительной мощности. Наиболее распространенной стратегией движения для создания требуемой деформации ахиллова сухожилия является «толчок» пяткой вниз во время начального ускорения. Опускание пятки вызывает тыльное сгибание голеностопного сустава по мере того, как человек толкает тело вперед, а стратегия контрдвижения создаст быстрое удлинение сухожилия. Сочетание скорости удлинения (которое также вызывает жесткость сухожилия и, следовательно, снижает его деформационную способность) и высокой потребности в силе иногда вызывает слишком большую нагрузку на сухожилие, и нередко зрители того или иного мероприятия становятся свидетелями слышимого «выстрела», характерного для разрыва ахиллова сухожилия.

Использование нами ахиллова сухожилия в качестве пружины подтверждается тем фактом, что наше сухожилие длиннее и в два раза тяжелее, чем у шимпанзе (Aiello & Dean, 2002). Чем больше у нас соединительной ткани, тем больше энергии деформации она может нести, но с этой деформацией должны справляться прикрепляющиеся мышцы. График ФППС и длин волокон мышц нижних конечностей показывает, что камбаловидная мышца имеет наибольшую потенциальную выходную силу (см. рис. 6.6). Количество волокон, обеспечиваемых камбаловидной мышцей, может варьироваться, но на камбаловидную мышцу часто приходится до двух третей ахиллова сухожилия.

В своем исследовании Dalmay-Pastor и соавт. (2014) обнаружили, что у 52% людей соотношение образующих ахиллово сухожилие волокон камбаловидной мышцы к волокнам икроножной мышцы было выше. У большинства людей ахиллово сухожилие в большей степени образовано волокнами мощной камбаловидной

* 15 см — это среднестатистическая длина. Как и все остальное в нашей анатомии, она будет варьироваться от человека к человеку.

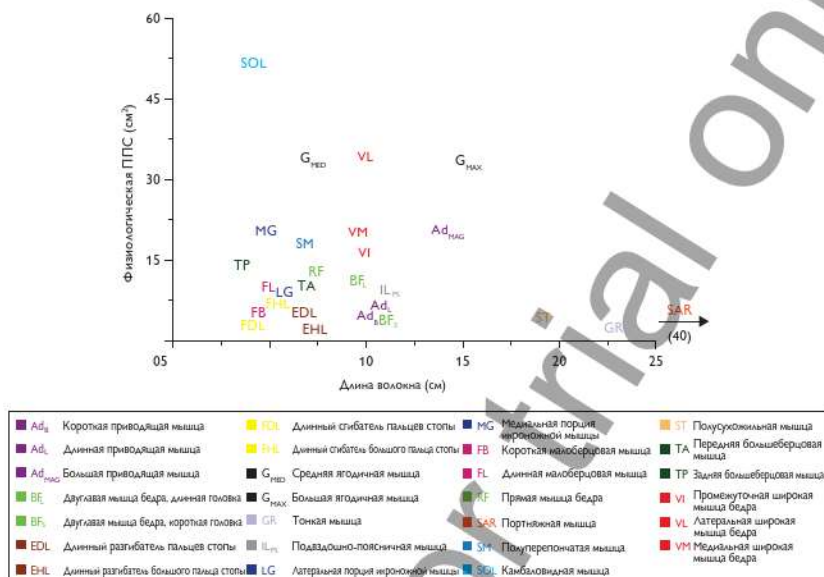


Рисунок 6.6. График разброса длины волокон и ФППС (см. также рис. 5.14) мышц нижних конечностей. Длина волокон связана со способностью мышцы удлиняться и укорачиваться — более длинные волокна обеспечивают более широкий диапазон движений, а ФППС указывает на максимальную выходную силу. (Адаптировано из Lieber & Ward, 2011.)

мышцы, благодаря чему оно обладает лучшей способностью контролировать высокие нагрузки, особенно когда мы рассматриваем его прикрепление к медиальной части пяточной кости. Пронация вызывает медиальный наклон пяточной кости (и вызвана им), и благодаря своему положению и силе камбаловидная мышца идеально приспособлена для амортизации и помощи при повторной супинации стопы.

Глядя на длину волокон камбаловидной мышцы (рис. 6.6), можно предположить, что она имеет ограниченный функциональный диапазон, несмотря на ее важную роль в движении голеностопного сустава. Камбаловидная мышца контрастирует с тонкой и полусухожильной мышцами, которые имеют самую большую длину волокон мышц нижних конечностей, что позволяет им контролировать движение в более широком диапазоне. Стандартная для анатомии история заключается в том, что мы жертвуем длиной ради силы,

когда дело доходит до строения мышц; перистые мышцы могут «упаковать» больше энергии в меньшие объемы, но их более короткая длина волокон уменьшает рабочую длину мышц. Этот вид анализа длины и прочности с точки зрения затрат и выгод основан на истории анатомии, а не на функциональной реальности. Полный анализ экономической эффективности архитектуры ткани должен также включать в уравнение фасциальные ткани, а функциональный диапазон объединенных тканей зависит от длины и жесткости сухожилий и не ограничивается только лишь длиной мышечных волокон.

Все подошвенные стибатели — камбаловидная и икроножная в особенности — имеют короткие мышечные волокна, но прикрепляются к длинным и эластичным сухожилиям, которые получают значительные нагрузки из-за своего положения во время движения. Силы удара при приземлении, ходьбе и беге должны сдерживаться и контролироваться сильными

мышцами, которые во многом выигрывают от тех механических свойств, которые присущи коллагеновым тканям. Мышечные волокна не нуждаются в значительном удлинении, поскольку эластичные сухожилия могут облегчать движение, вносить свой вклад в функциональный диапазон и в соотношение сила-длина и сила-скорость мышечных волокон. Стоит также отдать должное той роли, которую эти ткани играют в регуляции движения тела над стопой, будь то спринт, прыжок или приземление; анатомическое строение обретает смысл только тогда, когда его рассматривают с точки зрения его функциональной среды.

Камбаловидная мышца отличается от икроножной лишь тем, что она пересекает таранный сустав; кроме того, икроножная мышца также пересекает заднюю часть коленного сустава. Поскольку каждая мышца прикрепляется к разным частям верхушки пяточной кости, то имеет смысл предоставить больший контроль над инверсией/эверсией более сильной односуставной камбаловидной мышце. Как мы видели, строение стопы в форме полукупола с вставленной таранной костью означает, что пяточная кость наклоняется при ударе медially, а положение кости является важным ключом для обеспечения подвижного адаптера/жесткого рычага стопы. Прикрепление более сильной односуставной камбаловидной мышцы к внутренней стороне пяточной кости позволяет ей лучше контролировать наклон пяточной кости независимо от сгибания или разгибания колена.

На длину икроножной мышцы влияет положение бедренной кости, что изменяет соотношение сила-длина волокон икроножной мышцы. Напротив, длина волокон камбаловидной мышцы зависит только от положения голеностопных суставов. Рассмотрим естественные реакции суставов при приземлении (см. рис. 4.8с): при пронации стопы в ответ на проходящую через выравнивание костей и суставов силу реакции опоры происходит тыльное сгибание в голеностопном суставе, сгибание в коленном и тазобедренном суставах. Сгибание колена укорачивает икроножную мышцу, снижая способность мышцы контролировать нагрузку на стопу и голеностоп.

Соотношение сила-длина камбаловидной мышцы не зависит от сгибания колена, а удлинение волокон камбаловидной мышцы способствует тому, что мышца может замедлять как тыльное сгибание, так и пронацию стопы, обеспечивая более локальный и независимый контроль.

Камбаловидная мышца также действует как периферический сосудистый насос, помогая проталкивать кровь вверх по нижней конечности. Как упоминалось ранее, из-за длины стопы человек слегка наклоняется вперед в таранном суставе, перенося большую часть веса тела вперед на переднюю часть стопы. Такое относительное тыльное сгибание вызывает устойчивое натяжение камбаловидной мышцы, которая состоит из устойчивых к утомлению мышечных волокон I-го типа. Постоянное усилие этой антигравитационной мышцы помогает ей использовать свою плотную фасциальную оболочку для стимулирования венозного возврата.

Медленная, устойчивая и сильная камбаловидная мышца создает контраст с икроножной мышцей, состоящей из быстро сокращающихся волокон, которые придают голени немного дополнительной скорости. Икроножную мышцу описывают либо как веретенообразную, либо как перистую мышцу. Такое противоречие свидетельствует о ее изменчивой анатомии и о тех различных ролях, которые она выполняет. Наличие большего количества быстросокращающихся волокон типа II и меньшего количества перистых волокон позволяет икроножной мышце передавать силу быстрее, нежели это делает ее более короткая соседка. Хотя волокна икроножной мышцы могут быть менее перистыми, чем волокна камбаловидной мышцы, они все же относительно короткие, и, как и в камбаловидной мышце, мышечно-сухожильная единица икроножной мышцы значительно выигрывает от того дополнительного вклада, который вносит длинное и толстое ахиллово сухожилие.

Последней мышцей заднего отдела является подошвенная мышца (в переводе с латинского «ветвь» или «побег»), которая содержит большое количество мышечных веретен, делающих ее «органом проприоцепции» для контроля подошвенного сгибания/тыльного сгибания и жесткости фасциального отдела.

Подошвенная мышца представляет собой небольшую веретенообразную мышцу, эквивалентную длинной ладонной мышце кисти, которая прикрепляется к ладонному апоневрозу, но подошвенная мышца — в случае, если она присутствует*, — заканчивается за пределами подошвенного апоневроза. Чувствительность подошвенной мышцы и ее фасциальные связи приводят к тому, что она с большей вероятностью вовлекается в общее напряжение окружающего фасциального отдела, нежели оказывает какую-либо непосредственную помощь при подошвенном сгибании, что делает ее частым кандидатом на хирургическое изъятие и перемещение для замены других поврежденных сухожилий.

■ ЛАТЕРАЛЬНЫЙ ОТДЕЛ

В латеральный отдел входит интересная группа мышц, для рассмотрения действий которых потребуются некоторая гибкость нашего восприятия. Поскольку малоберцовые мышцы проходят латеральнее подтаранного сустава, их чаще всего называют «эверторами» стопы, — каковыми они и являются, — а эверсия, в свою очередь, сочетается с пронацией стопы (см. рис. 6.7). Однако малоберцовая мышца отвечает за эверсию в голеностопном суставе при условии движения в открытой цепи; нам же следует поместить мышцы в контекст, поставив стопу на землю и замкнув механическую цепь. При описании заднего отдела было легко визуализировать изменение между движением в открытой и закрытой цепи, однако при рассмотрении малоберцовых мышц может оказаться сложнее сделать такой же «переворот».

Короткая малоберцовая мышца прикрепляется к основанию пятой плюсневой кости, а длинная малоберцовая мышца проходит под кубовидной костью и, пересекая стопу, проходит к основанию первой плюсневой кости. Таким образом, две мышцы этого отдела прикрепляются с обеих сторон к важной поперечной части полукупола, и их роль заключается



Рисунок 6.7. Латеральный отдел

Длинная малоберцовая мышца — проксимальное прикрепление: головка малоберцовой кости и проксимальные две трети латеральной части малоберцовой кости. Дистальное прикрепление: основание первой плюсневой кости и медиальная клиновидная кость. Действие: эверсия подтаранного сустава и подошвенное сгибание.

Короткая малоберцовая мышца — проксимальное прикрепление: дистальные две трети малоберцовой кости. Дистальное прикрепление: шиловидный отросток пятой плюсневой кости. Действие: эверсия подтаранного сустава и подошвенное сгибание.

в поддержании его целостности, когда стопа начинает уходить в супинацию во время ходьбы.

Малоберцовая мышца проходит позади латеральной лодыжки, помогая подошвенному сгибанию (открытая цепь) и контролю тыльного сгибания (закрытая цепь). Ее сухожилия заключены в общую синовиальную оболочку, которая проходит под удерживателем, и по мере того, как сухожилия разделяются, они направляются вдоль латеральной стороны пяточной кости,

* Подошвенная мышца отсутствует у 5-10% населения.

проходя по обе стороны от блока малоберцовой кости на своем пути к конечному пункту назначения по обе стороны от стопы (рис. 4.24б, 4.27а и 6.10).

Длинная малоберцовая мышца пересекает подошву стопы в борозде между костями и длинной подошвенной связкой. Чаще всего она состоит из двух полосок, одна из которых прикрепляется к латеральной стороне основания первой плюсневой кости, а вторая — к латеральной стороне медиальной клиновидной кости, что увеличивает стабильность этих двух костей. Присутствующая иногда третья полоска сухожилия сливается со второй клиновидной костью.

Прикрепление к первой плюсневой кости позволяет сухожилию длинной малоберцовой мышцы тянуть первый луч к остальной части стопы и, что важно, создавать подошвенное сгибание первого луча при подъеме пятки и разгибании пальцев стопы (см. рис. 4.40а–д). Слабость длинной малоберцовой мышцы может подорвать стабильность стопы при супинации и диапазон ее движения при разгибании пальцев стопы. Снижение функции длинной малоберцовой кости может привести к потенциальному двойному удару за счет уменьшения разгибания пальцев стопы, что приводит к меньшей жесткости других подошвенных тканей, способствующих силовому замыканию.

Короткая малоберцовая мышца, будучи сильной, короткой и перистой мышцей, выполняет несколько важных функциональных ролей. Оттягивая шиловидный отросток пятой плюсневой кости проксимально, короткая малоберцовая мышца обеспечивает пространство для прохождения сухожилия длинной малоберцовой мышцы под кубовидной костью, а также обеспечивает поддержку всему своду стопы (рис. 6.8). Оба сухожилия малоберцовой мышцы вынуждены делать резкие повороты позади латеральной лодыжки, после чего длинная малоберцовая мышца делает второй поворот под кубовидной костью, что делает ее более подверженной травмам (Hallinan и соавт., 2019). Верхний удерживатель малоберцовой мышцы часто не в состоянии удерживать сухожилия во время их поворота, в результате чего сухожилия выходят из костной борозды.



Рисунок 6.8 Сухожилия малоберцовой кости, проходящие под удерживателем, защищены теносиновальной оболочкой, которая иногда может воспаляться, когда сухожилия поворачиваются вокруг латеральной лодыжки. Оттягивая пятую плюсневую кость назад, короткая малоберцовая мышца помогает поддерживать арку кубовидной кости для длинной малоберцовой мышцы, когда она делает свой второй поворот, проходя под стопой.

Погружение сухожилий в борозду и выпрыгивание из нее вызывают ощущение «щелчка» в голеностопе и влияют на механические преимущества малоберцовых мышц и на качество поступающих от механорецепторов данных.

Короткая малоберцовая мышца из-за ее расположения на латеральной поверхности голеностопного сустава играет важную роль в активном предотвращении латеральных растяжений, и в решении этой задачи ей помогает третья малоберцовая мышца (рис. 6.8). Третья малоберцовая мышца необычна тем, что, в отличие от других «малоберцовых» мышц, она прикрепляется к верхней части стопы, действуя как тыльный сгибатель (препятствующий подошвенному сгибанию), и из-за своего положения и другой иннервации* официально считается частью переднего отдела, а не латерального.

* Третья малоберцовая мышца иннервируется глубоким малоберцовым нервом; мышцы латерального отдела иннервируются поверхностным малоберцовым нервом.

И третья малоберцовая мышца, и четвертая малоберцовая мышца иногда рассматриваются как недавно возникшие адаптации к двуногой походке. Эти маленькие и разнообразные мышцы уникальны для человека, но присутствуют лишь примерно у 8% населения* (Rios Nascimento и соавт., 2012). Количество случаев с наличием этих двух мышц увеличивается, но, вероятно, это в большей степени связано с лучшей осведомленностью и улучшенными методами визуализации, нежели с какой-либо эволюционной динамикой.

Четвертая малоберцовая мышца часто упоминается в текстах, и, хотя ее часто связывают с различными симптомами, чаще всего ее наличие протекает бессимптомно. Корреляцию между наличием четвертой малоберцовой мышцы и дисфункцией, вероятно, можно объяснить тем, что ее чаще обнаруживают те, кто исследует проблемы с голеностопным суставом.

■ ГЛУБОКИЙ ЗАДНИЙ ОТДЕЛ

Сухожилия задней большеберцовой мышцы, длинного сгибателя пальцев стопы и длинного сгибателя большого пальца стопы из глубокого заднего отдела, которые нередко также называют «Томом, Диком и Гарри»[†], проходят вокруг медиальной части голеностопа (см. рис. 6.9). Глубокий задний отдел помогает уравновесить латеральный отдел и обеспечивает дополнительную поддержку амортизационной и супинационной функциям камбаловидной мышцы. Глубокий задний и латеральный отделы действуют, как тренировочные стабилизаторы велосипеда, помогая направлять стопу преимущественно в сагиттальном направлении, но предоставляя ей некоторую свободу действий для раскачивания из стороны в сторону. Вместе сухожилия этих двух отделов вносят

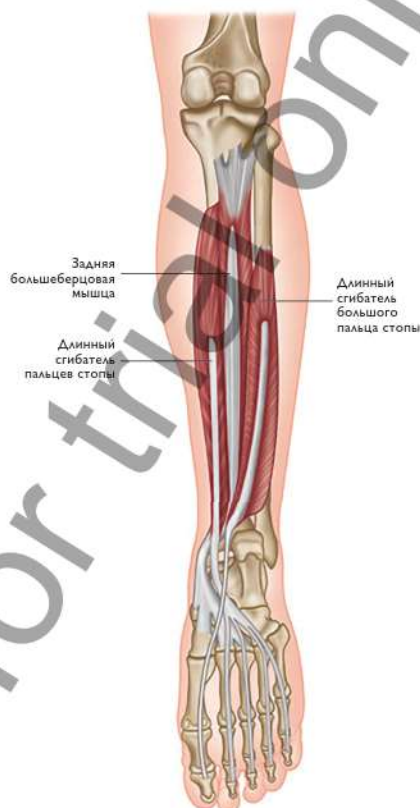


Рисунок 6.9. Глубокий задний отдел

Задняя большеберцовая мышца — проксимальное прикрепление: проксимальные, задние части тела большеберцовой и малоберцовой костей и межкостная мембрана. Дистальное прикрепление: подошвенная поверхность ладьевидной кости, все три клиновидные кости, кубовидная кость и основания плюсневых костей со второй по пятую. Действие: подошвенное сгибание и инверсия.

Длинный сгибатель пальцев стопы — проксимальное прикрепление: средняя задняя поверхность большеберцовой кости. Дистальное прикрепление: дистальные фаланги второго-пятого пальцев стопы. Действие: сгибание пальцев стопы (от двух до пяти), слабое подошвенное сгибание и инверсия.

Длинный сгибатель большого пальца стопы — проксимальное прикрепление: средняя половина задней малоберцовой кости. Дистальное прикрепление: дистальная фаланга первого пальца стопы. Действие: сгибание первого пальца стопы (плюснефаланговый и межфаланговый суставы), слабый подошвенный сгибатель и инвертор.

* В различных источниках эта цифра может варьироваться от 8% до 26% (Rios Nascimento и соавт., 2012).

^{††} В этой популярной мнемонике используется первая буква каждого из названий трех мышц, как показано в тексте жирным шрифтом (Tom, Dick, and Harry — *tibialis posterior*, *flexor digitorum longus*, and *flexor hallucis longus*).

свой вклад в последние 7% силы подошвенного сгибания в комплексе голеностопного сустава, причем большая часть этой силы исходит от малоберцовых мышц, но при этом задняя большеберцовая мышца является самой сильной из пяти основных мышц двух групп.

Из-за прикрепления к средней части стопы задняя большеберцовая мышца выполняет несколько важных функций. После того как сухожилие оборачивается вокруг борозды медиальной лодыжки, оно разделяется на две основные части (рис. 6.10). Большая часть крупного сухожилия прикрепляется к ладьевидной кости, в то время как некоторые волокна продолжают к медиальной клиновидной кости и проксимально к кончику опоры таранной кости. Меньшая вторая часть сухожилия образует место прикрепления для внутренних мышц, коротких сгибателей большого пальца стопы и пальцев стопы, а также прикрепляется

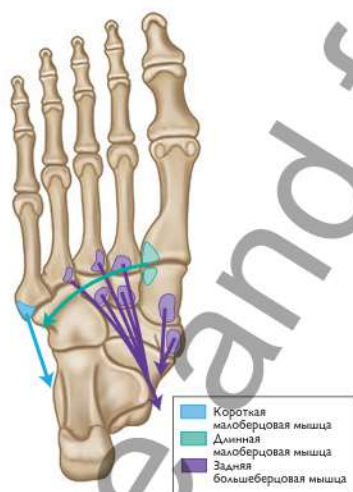


Рисунок 6.10 Сухожилие задней большеберцовой мышцы расширяется и прикрепляется к основанию большинства костей среднего отдела стопы. Напряжение задней большеберцовой мышцы сближает эти заостренные кости и, при поддержке расположенных по обеим сторонам двух малоберцовых мышц, помогает сохранить стабилизирующий поперечный элемент купола стопы.

к клиновидным костям, основанию четырех латеральных плюсневых костей и кубовидной кости (где она нередко сливается с короткой малоберцовой мышцей).

В отличие от камбаловидной мышцы, задняя большеберцовая мышца не работает в положении стоя, несмотря на ее способность приводить стопу в супинацию. Многочисленные прикрепления задней большеберцовой мышцы к заостренным нижним поверхностям клиновидных и плюсневых костей идеально подходят для их сближения. Но роль задней большеберцовой мышцы проявляется во время движения. Перистое строение мышцы, имеющей короткие волокна и длинное сухожилие, делает ее идеальной для использования медиальных лодыжек в качестве шкива при тыльном сгибании голеностопного сустава. Тыльное сгибание, даже если оно составляет всего 10–15 градусов, натягивает сухожилие и делает его более жестким, способствуя силовому замыканию среднего отдела стопы, а также поддерживает синдесмоз голеностопного сустава (рис. 6.11).

Хотя задняя большеберцовая мышца не может конкурировать по силе с камбаловидной мышцей, она является третьим по силе подошвенным сгибателем. Если рассмотреть это в контексте, то измерение ФППС (см. рис. 6.6) показывает, что задняя большеберцовая мышца имеет больший потенциал выходной силы, чем прямая мышца бедра, подвздошно-поясничная мышца и двуглавая мышца бедра — все они являются большими и сильными мышцами. Относительно высокая ФППС задней большеберцовой мышцы в сочетании с небольшим диапазоном ее экскурсии (всего 1–2 см) делает ее идеальным помощником для камбаловидной мышцы в создании стабильности во время движения. Более мощная камбаловидная мышца контролирует пяточную кость, а задняя большеберцовая мышца контролирует внутреннюю часть стопы, особенно ладьевидную кость, оказывая активную

* Прикрепления задней большеберцовой мышцы могут варьироваться; здесь приведен список наиболее распространенных прикреплений. Данная система классификации была предложена Olewik, 2019.

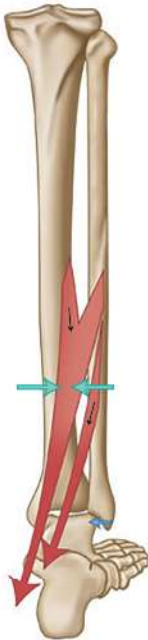


Рисунок 6.11. Прикрепления задней большеберцовой мышцы к малоберцовой кости, межкостной мембране и большеберцовой кости позволяет мышце стягивать две кости ноги вместе при тыльном сгибании голеностопного сустава. Стягивание малоберцовой и большеберцовой кости вместе во время тыльного сгибания поддерживает синдесмоз голеностопного сустава, при котором более широкая передняя часть таранной кости должна быть размещена между двумя лодыжками. (Адаптировано из Kapandji et al., 2019.)

поддержку пружинной связке и многим другим пассивным тканям, расположенным примерно на высоте купола стопы.

К сожалению, одной из частых травм является разрыв сухожилия задней большеберцовой мышцы, и потеря этого основного динамического стабилизатора может привести к дополнительной нагрузке на пружинную связку, являющуюся основным статическим стабилизатором медиальной продольной арки стопы. Потеря силы задней большеберцовой мышцы в результате чрезмерного, недостаточного или неправильного использования может

привести к «приобретенному плоскостопию», что может ограничить общую активность человека и вызвать боль в медиальной (связочное растяжение) или латеральной (контакт между малоберцовой и пяточной костями) частях стопы. В долгосрочной перспективе приобретенное плоскостопие может привести к структурным проблемам, таким как артрит и костные шпоры. (См. главы 8 и 9 для методов оценки и корректирующих упражнений.)

Задняя большеберцовая мышца получает некоторую дополнительную поддержку от двух своих союзников по отделу — длинных сгибателей большого пальца стопы и пальцев стопы. Путь, по которому проходит сухожилие длинного сгибателя большого пальца стопы (FHL), особенно полезен для супинации, поскольку на пути к дистальной фаланге большого пальца стопы он проходит непосредственно под опорой таранной кости (см. рис. 4.4). Длинное округлое сухожилие можно легко пропальпировать на подошве стопы, когда большой палец снова разгибается, при действии, которое также должно вызывать супинацию стопы, поскольку оно приподнимает медиальную продольную арку стопы и задействует часть «механизма лебедки».

Разгибание большого пальца стопы делает большую часть подошвенной ткани более жесткой (подробнее это рассматривается в главе 7), а также помогает сухожилию длинного сгибателя большого пальца стопы приподнимать опору таранной кости, чтобы поддерживать внутреннюю часть стопы в момент, когда пятка приподнимается и стопа готовится к схождению с пальцев. Таким образом, потеря разгибания пальца подрывает эту сопряженную взаимосвязь, поскольку любое уменьшение разгибания снижает жесткость сухожилия длинного сгибателя большого пальца стопы и ставит под вопрос его способность приподнимать и обеспечивать поддержку опоре таранной кости.

Длинный сгибатель большого пальца стопы поддерживается длинным сгибателем пальцев стопы, и две мышцы пересекают друг друга

* Также известному как «приобретенная взрослая деформация стопы», но термин «деформация» кажется мне немного резким, и поэтому я предпочитаю его опускать.

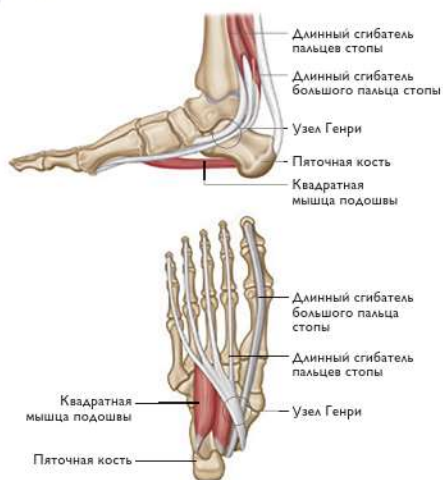


Рисунок 6.12. Сухожилия длинного сгибателя большого пальца стопы и длинного сгибателя пальцев стопы перекрещиваются под ладьевидной костью, обеспечивая посредством натяжения некоторую поддержку куполу стопы. Два сухожилия заключены в теносиновальные оболочки, облегчающие их движение, но, находясь в зоне высокого напряжения, эти структуры склонны к разрывам и воспалению (Rajakulasingham и соавт., 2019).

почти непосредственно под куполом в так называемом «узле Генри» (рис. 6.12). Несмотря на то что длинный сгибатель пальцев стопы обеспечивает сгибание четырех пальцев стопы, он меньше и слабее, чем длинный сгибатель большого пальца стопы.

Как и многие мышцы в области стопы и голеностопного сустава, он имеет различные прикрепления и разветвления сухожилий, и длинный сгибатель пальцев стопы может либо направлять части сухожилий к длинному сгибателю большого пальца стопы, либо получать такие же от него. Сухожилия длинного сгибателя пальцев расходятся веером по мере приближения к пальцам стопы и обеспечивают прикрепление червеобразных мышц, коротких дополнительных сгибателей пальцев, а проксимально они прикрепляются к квадратной мышце подошвы.

Согласно типичному описанию из учебника, квадратная мышца подошвы

(квадратная мышца подошвенной поверхности, рис. 6.12 и 7.10) прикрепляется непосредственно к пяточной кости и помогает выпрямить натяжение длинного сгибателя пальцев стопы, что было бы верно, если бы основная функция длинного сгибателя пальцев стопы по-прежнему заключалась бы в хватании и удержании веток. Но, если рассуждать с более функциональной и «двуногой» точки зрения, квадратная мышца подошвы выровнена с разгибанием пальцев стопы в сагиттальной плоскости, которое происходит при ходьбе, и, следовательно, помогает длинному сгибателю пальцев стопы контролировать направление движения пятки.

■ ПЕРЕДНИЙ ОТДЕЛ

Каждый отдел ноги может расширяться до определенной степени, чтобы облегчить ток биологической жидкости и сокращение мышц, однако из всех четырех отделов передний отдел наименее расширяемый (Standring, 2008), что может вызвать проблемы, когда его содержимое увеличивается в объеме. Быстрое увеличение объема компартментов может быть вызвано травмой или происходить со временем, например, при изменении уровня физической нагрузки. Симптомы внутрикомпаратментного давления варьируются от снижения кровотока до боли и онемения и уменьшения объема движений. В острых случаях для высвобождения компартмента используется хирургическое вмешательство, но в случаях с более постепенными эпизодами повышения давления для решения проблемы может быть достаточно отдыха или изменения активности. Невылеченные компартмент-синдромы могут угрожать здоровью конечности, поскольку потеря кровотока приводит к некрозу тканей, приводя к необходимости хирургического вмешательства. Но, как мы уже видели в главе 5, использование для снятия давления фасциотомии может привести к снижению потенциальной выходной мощности мышц до 16 % (Garfin и соавт., 1981).

* Клетки тканей отмирают из-за потери кислорода и питательных веществ.

Другой потенциальной слабостью переднего отдела является путь прохождения общего малоберцового нерва, который огибает шейку малоберцовой кости. Положение нерва делает его уязвимым к травмам, что может вызвать вялый паралич единственных тыльных сгибателей голеностопного сустава. Потеря тыльного сгибания оказывает значительное влияние на паттерн ходьбы, поскольку нет каких-то других мышц, которые могли бы напрямую заменить передний отдел.

Передний отдел состоит из трех основных мышц — передней большеберцовой, а также длинных разгибателей большого пальца стопы и пальцев стопы (рис. 6.13). Все вместе они отвечают за подтягивание стопы вверх, к передней части большеберцовой кости (т. е. в тыльное сгибание) и за контроль опускания стопы после касания пяткой во время ходьбы (также известное как подошвенное сгибание). Несмотря на то что мышцы переднего отдела слабые и короткие (см. рис. 6.6), они играют важную роль в обеспечении клиренса стопы в фазе переноса при ходьбе и при замедлении после касания пятки (см. рис. 5.2 и 6.14).

Во время фазы переноса при ходьбе передний отдел создает тыльное сгибание голеностопного сустава, чтобы поднять пальцы стопы, а затем обеспечивает контролируемое опускание стопы после касания пяткой. В случае, если в этом отделе потеряны мышечная сила или контроль, пальцы ног не смогут подняться при переносе ноги, создавая опасность спотыкания, а после касания пяткой будет слышен шлепок стопы, поскольку стопа не сможет эффективным образом замедлиться во время быстрого подошвенного сгибания. Типичными паттернами компенсации при нарушениях работы переднего отдела являются: 1) переваливающаяся походка, при которой стопа поднимается, наклоняясь в противоположную сторону; 2) размашистая походка, при которой стопа поднимается искусственным образом за счет отведения бедра со стороны фазы переноса; 3) походка с высоким шагом, когда стопа поднимается за счет увеличения сгибания бедра на одноименной стороне.

Сухожилия из переднего отдела проходят к стопе под сильным удерживателем

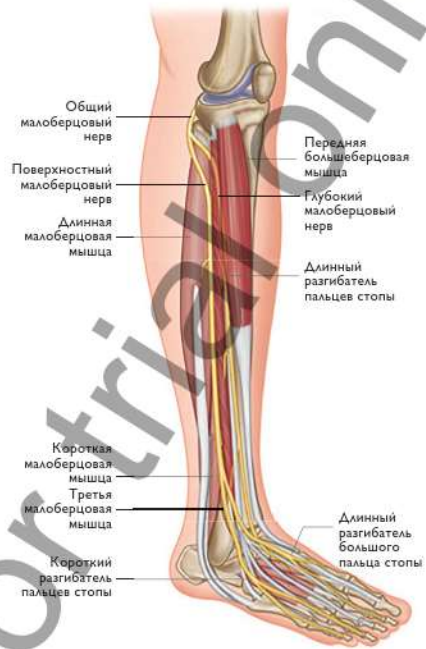


Рисунок 6.13. Передний отдел

Передняя большеберцовая мышца — проксимальное прикрепление: латеральный мыщелок большеберцовой кости; проксимальная, передняя часть тела малоберцовой кости и межкостная мембрана. Дистальное прикрепление: медиальная клиновидная кость и основание первой плюсневой кости. Действие: тыльное сгибание и инверсия подтаранного сустава.

Длинный разгибатель пальцев стопы — проксимальное прикрепление: латеральный мыщелок большеберцовой кости; проксимальная, передняя часть тела малоберцовой кости и межкостная мембрана. Дистальное прикрепление: средние и дистальные фаланги второго-пятого пальцев стопы. Действие: разгибание плюснефаланговых и межфаланговых суставов пальцев стопы со второго по пятый; тыльное сгибание; эверсия.

Длинный разгибатель большого пальца стопы — проксимальное прикрепление: средняя, передняя поверхность малоберцовой кости и межкостная мембрана. Дистальное прикрепление: дистальная фаланга первого пальца стопы. Действие: разгибание первого пальца стопы; тыльное сгибание; инверсия.

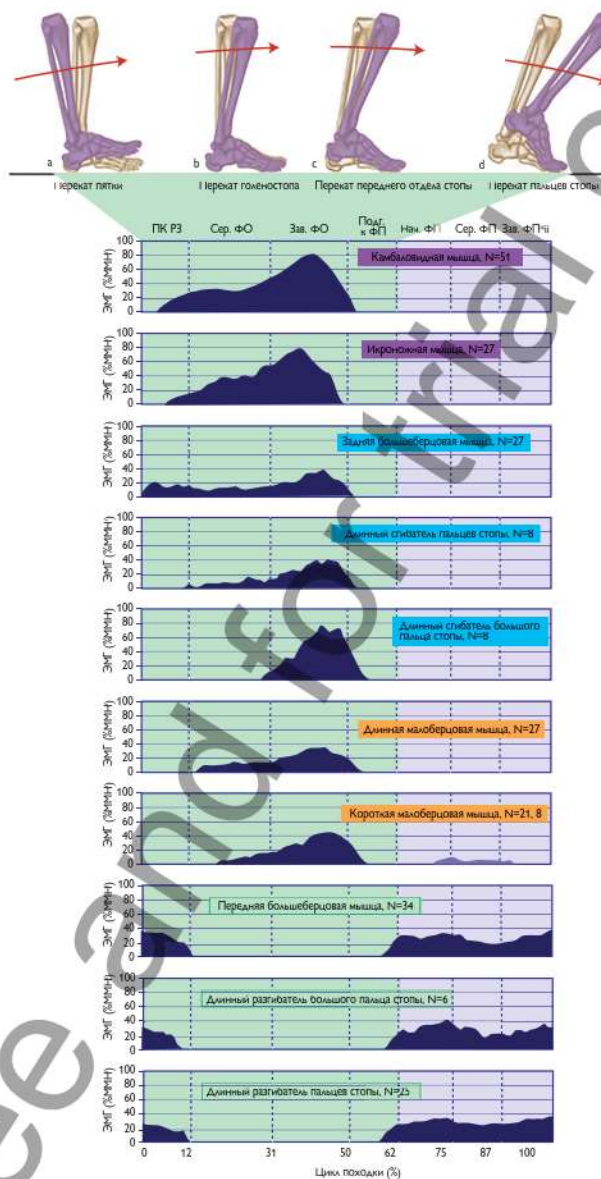


Рисунок 5.14. Показатели ЭМГ для мышц ног при ходьбе. Обратите внимание на разницу в тайминге между передним отделом и тремя другими отделами, по мере того как они чередуются между повышенной активностью в фазе переноса (передний отдел) и в фазе опоры (остальные три отдела). (Адаптировано из Perry и Burnfield, 2010)

разгибателей. Верхняя порция удерживателя проходит между большеберцовой и малоберцовой костями, а Y-образный нижний удерживатель проходит от латеральной части пяточной кости к медиальной лодыжке и далее вокруг подъема стопы, сливаясь с глубокой фасцией на подошве стопы (Aeillo & Dean, 2002).

Передняя большеберцовая мышца проходит под обоими удерживателями к медиальной части первой плюсневой кости и медиальной клиновидной кости*, действуя не только как антагонист задней большеберцовой мышцы при контроле оси подошвенного/тыльного сгибания таранного сустава, но и как синергист с ней при инверсии подтаранного сустава (см. рис. 6.3). Способность передней большеберцовой мышцы уводить стопу в инверсию означает, что эта мышца поддерживает супинацию стопы при подготовке к тем ударным силам, которые действуют на стопу при касании пяткой: по мере того, как нога переносится вперед, а передний отдел тянет стопу в тыльное сгибание, натяжение передней большеберцовой мышцы создает супинацию в фазе переноса (см. рис. 6.14).

Два длинных разгибателя пальцев стопы также проходят под удерживателем и противостоят двум длинным сгибателям глубокого заднего отдела. По аналогии с тем, как сухожилия длинного сгибателя пальцев стопы обеспечивают место прикрепления червеобразным мышцами, короткие разгибатели пальцев стопы прикрепляются к сухожилиям своего более длинного аналога. Многие из длинных и коротких сгибателей и разгибателей пальцев стопы сливаются в сложную структуру соединительной ткани, окружающую суставы пальцев стопы, которую мы рассмотрим в следующей главе при более подробном описании внутренних мышц. Сухожилия длинного разгибателя пальцев стопы образуют разветвления разгибателя, которое охватывает проксимальные фаланги и делится

на два латеральных и один центральный тяж. Центральный тяж прикрепляется к средней фаланге, латеральные тяжи снова сходятся и прикрепляются к основанию дистальной фаланги.

Как упоминалось выше, распространенной дополнительной мышцей в переднем отделе является третья малоберцовая мышца. Эта уникальная человеческая мышца, по-видимому, является дополнительной головкой длинного разгибателя пальцев стопы, но, в отличие от длинного сгибателя пальцев стопы, она не достигает ни одной фаланги и прикрепляется к пятой плюсневой кости. Пересекая комплекс голеностопного сустава, третья малоберцовая мышца может играть важную проприоцептивную роль в ощущении внезапной инверсии, защищая переднюю большеберцово-малоберцовую связку (наша связка, которая чаще всего подвергается растяжению).

■ НАРУЖНЫЕ МЫШЦЫ В ЦИКЛЕ ПОХОДКИ

Существует несколько предостережений, на которые следует обратить внимание, прежде чем мы приступим к анализу цикла походки. Во-первых, важно понять, что почти весь анализ походки, как правило, выполняется на плоской поверхности** и с предпочитаемой скоростью идущего. Однако в любой нормальной прогулке будут присутствовать вариации скорости и местности. Идеализированная же информация, представленная в цикле походки, должна помочь нам визуализировать то, что делают мышцы при выполнении тех или иных определенных движений и помочь интерпретировать «движение в реальной жизни».

Кроме того, ведутся многочисленные споры относительно точности показаний ЭМГ, поскольку полученные результаты могут различаться у разных людей и зависеть от ряда

* Прикрепления передней большеберцовой мышцы могут варьироваться, равномерно или неравномерно разделяясь между медиальной клиновидной и первой плюсневой костями, при этом вторая полоска может проходить к первой плюсневой кости или же может быть только одно сухожилие, прикрепляющееся к медиальной клиновидной кости (Olewnik et al., 2019).

** Чаще всего это беговая дорожка, что также вызывает споры относительно передачи информации, поскольку ходьба по беговой дорожке с постоянно движущейся поверхностью под вами — это не то же самое, что ходьба в реальной жизни. Вам даже не нужно быть ученым, чтобы понимать, что это не одно и то же, но научные соглашения, похоже, настаивают на том, что это следует делать именно так.

переменных, таких как расположение датчика и чувствительность. Но, как и в случае выше, мы используем показания ЭМГ, чтобы создать общую картину мышечного ритма; нюансы здесь менее важны. Черные области на графике (см. рис. 6.14) показывают, когда именно мышца напрягается, а высота соответствует силе сокращения. Одна из трудностей при чтении диаграмм ЭМГ заключается в том, что они не показывают тип сокращения — работает ли мышца эксцентрически, концентрически или изометрически, — поэтому мы должны предположить тип сокращения, основываясь на том, что, согласно нашим знаниям, происходит в стояе и в голеностопном суставе. Надеюсь, это наполнится смыслом после того, как мы пройдемся по приведенным ниже показателям, связывая воедино многочисленные строки из предыдущих глав.

Терминология цикла походки может напугать, но для наших целей нам не нужно вдаваться в подробности. Мы просто рассмотрим две основные фазы (см. рис. 6.14): фазу опоры (когда стопа стоит на земле, отмечена зеленым цветом) и фазу переноса (когда стопа движется вперед, выделена фиолетовым цветом). Эти фазы разделены двумя функциональными событиями: схождением с пальцев, когда стопа отрывается от земли, и касанием пятки, когда стопа снова приземляется. Для простоты общения весь цикл, путь одной стопы, разделен на проценты от 0% до 100%, и, поскольку ходьба является циклической активностью, и 0%, и 100% в данном случае представляют собой одно и то же событие — касание пяткой в конце фазы переноса является началом новой фазы опоры, и цикл продолжает повторяться снова и снова.

Точкой разделения между фазой опоры и фазой переноса является схождение с пальцев стопы, которое приходится на 62% цикла, а это означает, что наша стопа стоит на земле 62% времени, а 38% времени она переносится по воздуху. Во многих источниках для обозначения этой переходной точки будет использоваться термин «отталкивание», но я предпочитаю использовать термин «схождение с пальцев», поскольку отталкивание подразумевает активное сокращение — толчок

вперед за счет концентрической мышечной активности, что не обязательно имеет место, особенно в случае ритмичной ходьбы по ровной поверхности.

Первое, на что следует обратить внимание на рис. 6.14, — это разделение между тремя отделами подошвенных сгибателей (задним, глубоким задним и латеральным) и отделом тыльного сгибания (передним). Три отдела подошвенных сгибателей активны только во время фазы опоры, в отличие от переднего отдела, который включается непосредственно перед схождением с пальцев и остается активным в фазе переноса и в начале фазы опоры.

Активность переднего отдела имеет смысл только в том случае, если мы можем рассматривать показания в контексте функции. Как упоминалось выше, тыльные сгибатели отвечают за клиренс стопы во время фазы переноса и будут концентрически сокращаться, создавая тыльное сгибание. При касании пяткой (0% на графике) они должны контролировать создаваемое перекатом пятки быстрое подошвенное сгибание посредством эксцентрического сокращения, т. е. они укорачиваются во время фазы переноса, а затем удлиняются при касании пяткой, чтобы замедлить подошвенное сгибание и обеспечить контролируемое приземление стопы (от 0 до 12%). Вот почему нужно быть осторожными при интерпретации активности ЭМГ — диаграммы не говорят нам, работает ли мышца концентрически, эксцентрически или изометрически, и поэтому мы должны делать некоторые выводы исходя из того, что происходит в суставах в рамках функций.

Из подошвенных сгибателей только задняя большеберцовая мышца возбуждается в этой ранней части фазы опоры и остается активной примерно до 50%, когда большинство других подошвенных сгибателей также снижают свою активность. Хотя задняя большеберцовая мышца даже близко не напрягается до уровня своего потенциального максимума, на графиках

* Касание пяткой иногда также называют «началом контакта», поскольку это позволяет обсуждать и сравнивать механику ходьбы с механикой бега, в которой не всегда используется касание пяткой.

она имеет двойной пик. Начальный пик следует сразу за касанием пятки, когда активация задней большеберцовой мышцы помогает поддерживать внутреннюю часть полукупола стопы, т. е. ее прикрепление к ладьевидной кости, при подготовке к приземлению всей стопой и контролю реакции пронации в ответ на удар и череду смещающих усилий.

Как только передняя часть стопы полностью приземляется, начиная с 12% инерция тела переносит ногу через стопу посредством переката голеностопного сустава между таранной и большеберцовой костями. Голеностопный сустав переходит от подошвенного сгибания к тыльному сгибанию и нуждается в замедлении, обеспечиваемом группой подошвенных сгибателей, и именно в этом моменте мы видим, что включаются остальные задние мышцы. Единственная мышца, которая присоединяется к задней большеберцовой мышце в начале этого процесса, — это камбаловидная мышца, которую стимулирует медиальный наклон пяточной кости при касании пяткой.

После касания пяткой колено слегка сгибается и выпрямляется при тыльном сгибании голеностопного сустава. Это связано с тем, что подошвенные сгибатели замедляют движение большеберцовой и малоберцовой костей, когда они проходят над таранной костью, в то время как таз движется вперед над стопой. Два больших подошвенных сгибателя, камбаловидная и икроножная мышцы, сокращаются, чтобы замедлить движение переката голеностопного сустава (которое помогает разгибанию колена), но камбаловидная мышца начинает включаться в цикл раньше, в то время как икроножная мышца наращивает натяжение более постепенно — по мере разгибания колена и, в конечном итоге, подъема пятки.

В этом контролируемом сценарии пятка поднимается в результате того, что тазобедренный, коленный и голеностопный суставы достигают своих естественных пределов. Инерция тела толкает тело вперед, и, если мы на мгновение рассмотрим только лишь траекторию движения таза, то увидим, что бедро переходит в разгибание, когда таз движется вперед над стопой. Как только тазобедренные связки натягиваются до естественным образом

ограниченного диапазона разгибания бедра, единственной областью, способной повлиять на длину шага, будут перекаты стопы. Сначала перекат переднего отдела стопы, а затем и перекат пальцев стопы позволяют тазу двигаться дальше вперед, и поскольку эти перекаты обеспечивают дополнительное движение, пятка стопы должна будет подняться, а пальцы стоп — начать разгибаться (мы наблюдали эту динамику в упражнении 5.1).

Поскольку пятка поднимается примерно на 31%, стопе для сохранения целостности требуется дополнительная силовая поддержка. К этому времени колено также разгибается, напрягая двухсуставную икроножную мышцу, что помогает ей обеспечить дополнительную поддержку односуставной камбаловидной мышце, которая выполняла большую часть работы, когда колено было согнуто. Такая двухмышечная, одно- и двухсуставная организация позволяет камбаловидной мышце не только поддерживать стопу при согнутом колене, но и использовать естественное движение тела при разгибании колена, чтобы задействовать силу икроножной мышцы, когда в ней возникает наибольшая потребность.

По мере того как стопа приближается к стадии переката пальцев стопы, мы достигаем почти максимального сокращения камбаловидной и икроножной мышц, двух самых сильных мышц тела. Их постепенно восходящий график заканчивается резким пиком, после чего они довольно быстро выключаются. Два длинных сгибателя пальцев стопы (длинный сгибатель большого пальца стопы и длинный сгибатель пальцев стопы) включаются лишь на последних стадиях фазы опоры и остаются активными чуть дольше, чем две основные икроножные мышцы.

Паттерн возбуждения длинного сгибателя большого пальца стопы и длинного сгибателя пальцев стопы отражает работу двух малоберцовых мышц, которые, хотя и сокращаются с меньшим процентом от своего максимума, также достигают пика, когда пальцы ног начинают разгибаться. Это важное напоминание о том, что малоберцовые мышцы являются не только подошвенными сгибателями и эверторами голеностопного сустава, но также

играют жизненно важную роль в стабилизации стопы и, в случае длинной малоберцовой мышцы, в подошвенном сгибании первой плюсневой кости, тем самым помогая разгибанию большого пальца стопы (см. рис. 4.40).

Понимание функциональных требований помогает нам лучше понять ту силовую поддержку, которую обеспечивают мягкие ткани, когда стопа переходит в положение жесткого рычага.

Контекст движения помогает лучше понять время активации мышц, благодаря чему мы можем лучше видеть направление их сокращения и, что важно, ту эксцентрическую работу, посредством которой происходит контроль инерции.

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

В этой главе мы продолжили исследование формы и функции и добавили к этому дополнительный контекст в виде архитектуры мышц, их положения и тех углов, под которыми их сухожилия пересекают суставы. Разделив ногу на четыре отдела, а голеностопный комплекс на две оси, мы, как я надеюсь, помогли прояснить то, как работает каждая мышца.

Мышцы, пересекающие переднюю часть таранного сустава, классифицируются как мышцы, отвечающие за тыльное сгибание; им противостоит большее количество мышц, осуществляющих подошвенное сгибание, которые пересекают таранный сустав сзади. Большее количество и сила подошвенных сгибателей обусловлена их ролью в замедлении быстрого тыльного сгибания; их сила увеличивается еще больше за счет перистых волокон и длинных жестких сухожилий, особенно скрученного ахиллова сухожилия.

Мышцы, отвечающие за инверсию и эверсию, пересекаются с медиальной и латеральной сторон от подтаранного сустава, обеспечивая поперечную устойчивость узкой стопы. Большинство из них также является подошвенными сгибателями и поэтому натягивается теми силами, которые чаще всего создаются тыльным сгибанием во время движения. Поскольку эти мышцы прикрепляются к средней части стопы, они также способствуют силовому замыканию и супинации стопы, — в частности, речь идет о задней большеберцовой и малоберцовых мышцах.

Наружные мышцы имеют три уровня соединения; одна группа прикрепляется к верхней части пяточной кости, одна группа — к средней части стопы, а третья доходит до пальцев ног и обеспечивает сгибание и разгибание. Два длинных сгибателя пальцев стопы особенно важны при ходьбе на этапе схождения с пальцев из-за их связи с внутренней частью свода стопы.

В целом, основная идея этой главы заключается в том, что нам следует быть гибкими, когда мы рассматриваем и рассуждаем о мышечной деятельности, и мы должны четко понимать, сокращаются ли мышцы концентрически (как в «действиях») или же они работают для замедления движения (что нередко противоположно их «действию»). Действующие на тело силы могут создаваться внутри, когда мышцы действуют для создания силы, или же они могут иметь внешний источник и требовать, чтобы мышцы предотвращали или замедляли движение.

Знакомство с мышечно-сухожильными путями (такими как длинный сгибатель большого пальца стопы) и общими паттернами движений (например, разгибанием пальцев ног) помогает нам построить четырехмерную картину анатомии, которую так трудно получить из двухмерных книг.

ВНУТРЕННИЕ МЫШЦЫ

Стопу не следует изучать как отдельную единицу, поскольку ее форма и функция всегда были неотделимыми частями целостного феномена человеческой локомоции. Она не потеряла этой взаимосвязи и после того, как приобрела свой человеческий характер; изменилась лишь ее физиология, направленная на то, чтобы выполнять возложенную на нее работу по поддержке и удержанию нашего тела в свойственном человеку вертикальном положении.

Мортон (1935)

■ ВВЕДЕНИЕ

В результате нашего филогенетического наследия и эволюционной динамики мы приобрели стопы, которые напоминают наши кисти рук, — эти структуры обладают схожими генетическими чертами, и даже большинство неанатомов может легко найти сходства в присутствии им расположении костей и мягких

тканей. То же самое можно сказать и о характерных чертах наших стоп и стоп наших родственников-приматов. Как мы уже видели в главе 2, данное сходство неслучайно: Дарвин указывал на то, что эволюция часто представляет собой перепрофилирование того, что уже имеется в наличии. Однако именно в этом и заключается одно из возможных препятствий на пути к пониманию человеческой стопы. Хотя поначалу наличие проблемы может показаться неочевидным, стопу нередко интерпретируют так, как будто она все еще является хватательным отростком. И данная проблема проявляется уже в самом названии мышц.

Одной из наших психологических черт является способность распознавать постоянство формы и использования объекта независимо от его ориентации, размера или цвета. Вообще, это перцептивное постоянство, как его называют в литературе, является весьма полезной штукой. Именно оно позволяет нам запрыгнуть в арендованный автомобиль в аэропорту и успешно ехать, даже если мы никогда не ездили в машине данной марки или модели и по этим дорогам раньше, поскольку процедуры общего характера одинаковы

и для большинства автомобилей, и для большинства дорог.

Это же перцептивное постоянство вызывает проблему, когда мы смотрим на кисти рук и стопы и видим их очень похожее строение. Мы невероятно хорошо знакомы с нашими руками и их хватательными способностями. Схожесть мышц в кисти руки и в стопе человека обусловлена общим генетическим наследием*, и мы наделяем их похожими именами, следуя тем же традициям именования. Но наличие схожих форм и сходного генетического наследия не должно означать, что они выполняют одну и ту же функцию. Важно помнить, что хотя структуры могут выглядеть одинаково и прикрепляться к схожим областям, они, как и предупреждал нас Дарвин, могли пройти через процесс перепрофилирования.

Другие приматы могут проводить значительное время, перемещаясь на стопах, однако при этом их стопы по-прежнему используются для захвата предметов и манипулирования ими. Что же касается людей, то для большинства из них данная функция стопы больше не является ни основной, ни даже второстепенной. Некоторые традиции именования предполагают функциональное постоянство мышечной деятельности, однако в действительности это не так: мягкие ткани функционально пластичны и адаптируют свою роль в зависимости от потребностей движения. Особенно это касается тканей стопы.

Еще в начале 1940-х годов анатом Ф. Вуд Джонс предупредил нас о том, что «действия» мышц представляют собой исключительно академический интерес, поскольку большинство текстов настаивают на том, чтобы стопа рассматривалась по аналогии с кистью руки. (Как описывает это Вуд Джонс, стопа представляет собой структуру, которая несет на себе весовую нагрузку и продвигает нас вперед, и при этом должна сопротивляться взрывному импульсу, возникающему при ударе о землю, и обеспечивать стабильную платформу для высвобождения значительной баллистической силы, когда

остальное тело перемещается над ней.) С учетом этого, Вуд Джонс дает нам несколько полезных советов относительно функционального понимания мускулатуры стопы.

Первое, на что обращает внимание Вуд Джонс, — это глупость использования «действий» мышц, поскольку все они предполагают неограниченное движение в открытой цепи, что, конечно же, не соответствует описанным выше ролям, и поэтому должно интересовать лишь тех, кому нужно сдать экзамен. Следующей мишенью его гнева была идея «начала» и «прикрепления» мышц, согласно которой последнее обычно приближалось к первому. Хотя мы уже говорили об этом ранее в данном тексте, интересно отметить, что наименования «действий» обычно следуют той же традиции движения «прикрепления» к «началу», которую весьма трудно искоренить¹. Например, в то время как сгибатели все еще могут сгибать большой палец ноги во время потягивания коктейлей в бассейне, они с большей вероятностью приводят пальцы ноги к земле, по мере того как наше тело перемещается над ними, переходя к фазе схождения с пальцев ноги, в результате получается, что «начало» отдаляется от «прикрепления», как мы уже видели на примере подошвенных сгибателей в главе 6.

Наш естественный инстинкт перцептивного постоянства может препятствовать более функциональному пониманию стопы. Как только мы знакомимся с утвержденными названиями мышц, эти названия могут завести нас в определенные тупики. Это относится к сгибателям и разгибателям пальцев стопы, которые кто-то мог бы рассматривать как антагонисты по отношению друг к другу. Однако в сложном мире стопы они действуют согласованно, координируя многосуставное расположение фаланг и их разгибательного капюшона.

Чтобы по-настоящему понять мышцу, вам нужно знать не ее название или ее действия (хотя, безусловно, знание этих составляющих

* Для обозначения структур схожего генетического наследия используется технический термин «гомологичный».

¹ Я осознал всю иронию того, что я сам также следую этой традиции, предоставляя в данном тексте тот же список «действий». В качестве другого варианта можно было бы предоставить вам все функциональные альтернативы и создать более длинный и запутанный текст.

помогает!), а ее положение. Где крепятся мышцы? Какие суставы они пересекают? И с какими силами приходится иметь дело этим суставам при нормальном движении?

Когда дело доходит до стопы, основная роль мышц состоит в том, чтобы не допустить ее разрушения при ударе, — никому не нужна разрушенная стопа! — и снова сблизить все кости вместе для супинации. Таким образом, основным требованием к пролегающим между костями стопы тканям является обеспечение целостности костей и удержания их вместе. Первая задача мышц состоит в том, чтобы обеспечить стабильность, а не движение — в большинстве случаев движение обеспечивается другими источниками, расположенными за пределами стопы, — будь то инерция, уже присутствующая в остальном теле, или более крупные мышцы, расположенные выше по конечности и имеющие механическое преимущество. Чаще всего стопа реагирует на движения расположенного над ней тела, постоянно изменяя и адаптируя свою форму и тонус, чтобы обеспечить ту основу, на которой могут происходить все эти движения.

Адаптивная стопа обладает тонким бессознательным контролем над всеми своими многочисленными составляющими, а ее мускулатура способна точным образом регулировать жесткость стопы. Значительная часть этой реактивности обеспечивается ее внутренними мышцами, которые также называют «ядром стопы» (McKeon и др., 2014). Как мы увидим далее, в последнее время внутренним мышцам стопы уделяется повышенное внимание. В основном это связано с возрождением интереса к минимально возможной обуви и все большим признанием того, что стопа является нашей основной точкой взаимодействия с землей при ходьбе — вне обуви с жесткой подошвой стопа лучше приспосабливается к рельефу земли. Любое изменение поверхности является стимуляцией для стопы и, следовательно,

для ее внутренних мышц, стабилизирующих все ее небольшие кости.

Закрепление внутренних мышц происходит особенно активно, когда мы приближаемся к фазе схождения с пальцев стопы. Обувь с жесткой подошвой обеспечивает внешнее укрепление по мере подъема пятки и разгибания пальцев стопы; что же касается минимальной обуви, то она дает меньше поддержки и побуждает внутренние мышцы обеспечивать жесткий рычаг изнутри стопы. Именно поэтому отзывчивую, умную и сильную стопу следует сделать краеугольным камнем любой тренировочной программы.

Как мы увидим в главе 9, функциональная оценка стопы может помочь нам более качественно подойти к ее тренировке. В то время как в физиотерапии для кистей рук можно использовать различные инструменты для сжатия (чаще всего, поощряя тем самым приращение «прикрепления» к «началу»), стопа нуждается в нагрузке и в воздействии гораздо больших сил, чтобы научиться реагировать на малейшие изменения в балансе и положении остального тела (чаще всего, отдаление «прикрепления» от «начала»). Изолированная работа с мышцами стопы посредством хватательных движений будет иметь лишь ограниченный эффект — ограниченный не только с точки зрения силы, но также и с точки зрения проприоцепции и двигательного контроля.

Выполняя роль посредников между землей и движением остального тела, наши стопы должны воспринимать малейшие изменения в давлении и в углах воздействия. Стопы, с одной стороны, невероятно чувствительны, а с другой — способны выдерживать силы, во много раз превышающие вес нашего тела. Мы стоим, ходим, прыгаем и бегаем на них целыми днями напролет, при этом нередко втискивая их в тесные маленькие коробочки под названием «ботинки», и тем не менее они все же обеспечивают проприоцепцию через кожу и мышцы. Любое движение между костями стопы не только растягивает и напрягает ее внутренние мышцы, тем самым обеспечивая все преимущества преднатяжения, но также стимулирует мышечные веретена. Наполненные механорецепторами мышечные

* Особенно при одичании аскаридов! Если же вы не обсуждали тщательно образцы идеи, изложенные в данном тексте, или если вы не сидели на этот текст во время занятий, будьте осторожны с ответами на любые тесты, установленные традиционным академическим институтом.

веретена — это лишь один из источников информации; чувствительный к щекотке слой имеющей склонность к потливости кожи^{*} буквально загружен механорецепторными клетками, которые готовы сработать в любой момент, когда в них возникнет необходимость.

В этой заключительной главе, посвященной анатомии стопы, будут показаны некоторые из тех способов, с помощью которых стопа выполняет на первый взгляд противоречивые функции поглощения больших сил и действия в качестве сенсора. Здесь будут объединены многие из тех функциональных тем, которые уже были изложены ранее, особенно касающиеся роли фасциальных тканей в увеличении силы. Затем, в следующих нескольких главах, мы познакомим вас с инструментами для оценки функциональных возможностей стопы и предложим некоторые стратегии по ее улучшению.

■ ДОРСАЛЬНОЕ ПРОТИВ ПОДОШВЕННОГО — ЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ПОДОШВА

Ранее мы обсуждали скручивание нижней конечности в период внутриутробного развития, при котором «передняя часть» тела перемещается назад и наоборот (см. рис. 6.1). В соответствии с общим дорсально-подошвенным расположением защиты верхняя, дорсальная сторона стопы является преимущественно костной и имеет тонкие слои кожи и фасциальные покрытия. Большая часть мягких тканей стопы расположена на безволосой подошвенной стороне и имеет несколько стратегий, помогающих справляться со стрессами и напряжениями, возникающими во время ежедневной локомоции.

Подошвенная поверхность стопы покрыта толстой кожей с множеством потовых желез и, как мы все знаем из опыта длительного летнего отдыха на пляже, и сама кожа, и ее более глубокие слои могут утолщаться и адаптироваться к любому повышенному воздействию

стресса. Так же, как ручной труд способствует затвердеванию кожи на ладонях, хождение босиком приводит к утолщению кожи на подошве стопы, которая, несмотря на это, не теряет своей тактильной чувствительности (Holowka и др., 2019).

Для дополнительной амортизации область кожи под пяточной костью также содержит толстый слой плотного жира, который помогает поглощать удары и разделен на отсеки, помогающие удерживать его на месте (рис. 7.1). Жировая подушка под пяткой имеет толщину около 18 мм и образована U-образными столбиками, которые укреплены эластичными волокнами, пересекающими ткань под разными углами. Устройство тканей вокруг пятки обусловлено необходимостью справляться с ударными нагрузками — жировая подушка на пятке отличается от жировой подушки под головками плюсневых костей, которым необходимо выдерживать силы сжатия и сдвига, возникающие при схождении с пальцев (Strandberg, 2008).

Силы сдвига являются для стопы обычным явлением, поскольку контакт и трение о землю (носок или обувь) временно закрепляют эту область кожи, в то время как внутренние, более глубокие структуры стопы все еще сохраняют

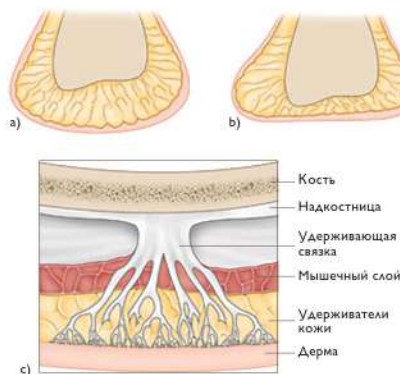


Рисунок 7.1. Пяточная кость получает дополнительную защиту от ударных нагрузок за счет слоя толстых, плотных жировых клеток. Эти клетки расположены в виде U-образных столбцов (а и б), которые поддерживаются и удерживаются на месте сильными и плотными соединительнотканными тяжами (удерживателями кожи) (с).

* Кожа на подошве стопы, технически описываемая как «бемоидный участок кожи», имеет высокую плотность нервных окончаний и потовых желез.

некоторую инерцию. Между слоями кожи и жировыми слоями проходят прочные связки, защищающие их взаимодействие, — подобно веревке между лодкой и ее якорем. Эти вертикальные связки называются удерживателями кожи (*retinacula cutis*, от лат. *retinere* — удерживать; *cutis* — кожа): они управляют скольжением между кожей, расположенной под ней жировой тканью, более глубокими мышцами и костями стопы.

Если бы не удерживатели кожи, то кости стопы скользили бы внутри кожи, что затрудняло бы контроль движений. Длина и количество удерживателей кожи варьируются в зависимости от той или иной области тела и придают характерную подвижность коже лица, коленей и нижней части спины (Nash и др., 2004). Попробуйте сравнить подвижность кожи верхней части стопы с подвижностью кожи подошвы — вы обнаружите, что на тыльной стороне гораздо больше свободы. Более короткая и прочная связь между подошвенными слоями обеспечивает более прямую передачу силы между слоями и уменьшает трение — то самое трение, которое возникает, когда вы отправились на неожиданно долгую прогулку, надев под пару резиновых сапог неподходящие носки*.

Нередко жир частично теряет свою целостность вокруг пятки, особенно это характерно для людей среднего возраста. Атрофия жировой ткани может быть вызвана снижением эластичности коллагена и изменением процентного содержания коллагеновых волокон, что является естественной частью старения. Это часто связано с женской менопаузой, когда более низкие уровни эстрогена вызывают снижение выработки эластичных волокон коллагена III типа и увеличение выработки менее эластичных волокон коллагена I типа (Fede и др., 2019).

Одной из опасностей уменьшения толщины и упругости подошвенного жирового слоя, помимо снижения амортизации и защиты, является то, что это также может влиять на механорецепцию. Постуральный контроль

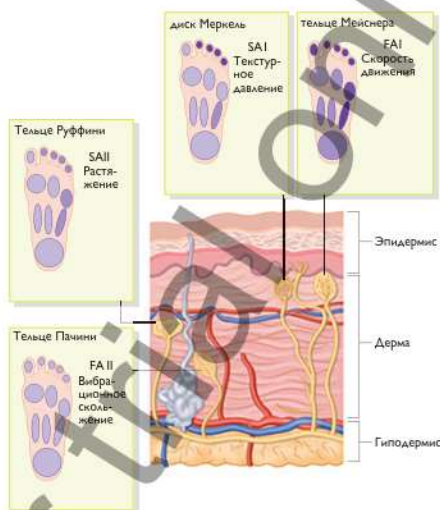


Рисунок 7.2. В дермальном слое подошвы стопы находятся четыре типа механорецепторов, передающих афферентную информацию в центральную нервную систему. Как показано на рисунке, каждый тип рецепторов связан с разными ощущениями. Плотность распределения обозначена штриховкой — от темной (высокая плотность) до светло-серой (низкая плотность). Нервные окончания чувствительны к раздражителям в течение разных периодов времени и называются либо медленными, либо быстрыми, адаптируясь в зависимости от продолжительности времени, необходимого каждому из них для прекращения передачи сигналов в присутствии раздражителей. (Адаптировано из Viseux, 2020.)

зависит от ряда входных данных, и значительная часть локальной реакции нижней конечности исходит от афферентных данных**, поступающих от подошвы стопы. Как и в случае с ладонью, подошвенная поверхность стопы богата иннервирована механорецепторами, которые реагируют на различные стимулы, такие как вибрация, растяжение и давление (рис. 7.2, Viseux, 2020).

Стопа является основным источником информации о центре тяжести нашего тела, его движении и положении относительно земли, поэтому стопа отвечает за большую часть

* Вполне вероятно, что все это еще сопровождалось дождем, и невыпущенный плескание по лужам уже давно приелось, в результате, вас постигло несчастье образования волдырей от трения.

** Афферентные нервы посылают сигналы в спинной мозг, а его ответ поступает по так называемым эфферентным нервам.

нашего проприоцептивного контроля. Наше чувство равновесия и способность координировать свои действия зависят от нескольких источников, включая полукружные каналы внутреннего уха и их рефлексы, глаза и подзатылочные мышцы, однако стопы обладают уникальным положением, позволяющим им давать обратную связь о нашем взаимодействии с землей. Стопа справляется с этой задачей с помощью ряда встроенных в дермальный слой механорецепторов.

Эти кожные нервные окончания могут затем объединяться с другим типом механорецепторов, мышечными веретенами, которые чувствительны к растяжению и скорости растяжения в мышцах. Добавьте к этому информацию от механически чувствительных удерживателей вокруг голеностопного сустава, и вы увидите, что комплекс стопы вносит значительный вклад в контроль осанки, используя как автоматические рефлексы, так и сознательный контроль (Viseux, 2020).

Поскольку постуральный контроль организован как на сознательном, так и на бессознательном уровне, это обеспечивает определенные преимущества при оптимальной стимуляции рецепторов в сочетании с упражнениями на равновесие. Одним из преимуществ обуви с тонкой гибкой подошвой является беспрепятственная механическая передача информации в стопу. Было показано, что стандартная обувь ухудшает восприятие положения стопы (Holowka и др., 2019; Robbins и др., 1995).

Двигательный контроль и координация — это пластические навыки, которые улучшаются по мере обучения, что особенно важно для людей с разными неврологическими проблемами, такими как, например, болезнь Паркинсона (Olson и др., 2019). Выполнение упражнений развивает как навыки, так и силу, при этом программу упражнений можно оптимизировать таким образом, чтобы в большей степени сосредоточиться на одном или на другом. Наилучшая программа для людей с неврологическими проблемами должна включать в себя как упражнения с весовой нагрузкой, так и упражнения на равновесие.

■ ОТДЕЛЫ

Мышцы, как и жировые клетки, должны удерживаться на месте. Неудивительно, что мягкие ткани стопы разделены на отделы, ведь именно такая организация используется во всем теле (рис. 7.3). Как мы видели на примере отделов ноги, такое разделение имеет как свои преимущества, так и издержки. Издержки компартментализации связаны с компартмент-синдромами, когда, преимущественно в результате травмы, отек начинает мешать правильной функции. Компартмент-синдромы стоп менее изучены, поскольку в основном являются острой реакцией на травмирующее событие, а не следствием нарастания давления, которое может возникнуть в мягких тканях ноги во время смены упражнений.

Вполне возможно, что вы можете столкнуться с компартмент-синдромом стопы, тем более что концепция упражнений для стоп набирает обороты, поэтому полезно знать о них как о возможном источнике дисфункции. Маловероятно, что вам когда-либо понадобится оценивать его (в любом случае, это выходит за рамки возможностей мануальных и двигательных терапевтов), что облегчает вашу жизнь и возлагает дополнительную ответственность на хирурга, которому и придется решать, сколько отделов существует в стопе, как измерить их давление и, главное, где необходимо выполнить разрез, чтобы сбросить избыточное давление.

Существует множество споров о количестве отделов в стопе, в литературе предлагается 3, 4, 5, 8, 9 или 10 отдельных фасциальных отделов (Reach и др., 2007). По-видимому, данный диапазон зависит от того, когда и как проводились исследования, но наиболее часто упоминаемые тексты делят стопу на четыре или девять отделов. Для наших целей мы будем использовать наиболее распространенный перечень из четырех отделов, который используется в большинстве текстов, с которыми вы, возможно, столкнетесь.

Наша главная цель — осознать, что мускулатура стопы состоит из нескольких мешков, которые, как мы видели в главе 5, способствуют выходной силе. Исследование Ямаути и Козмы

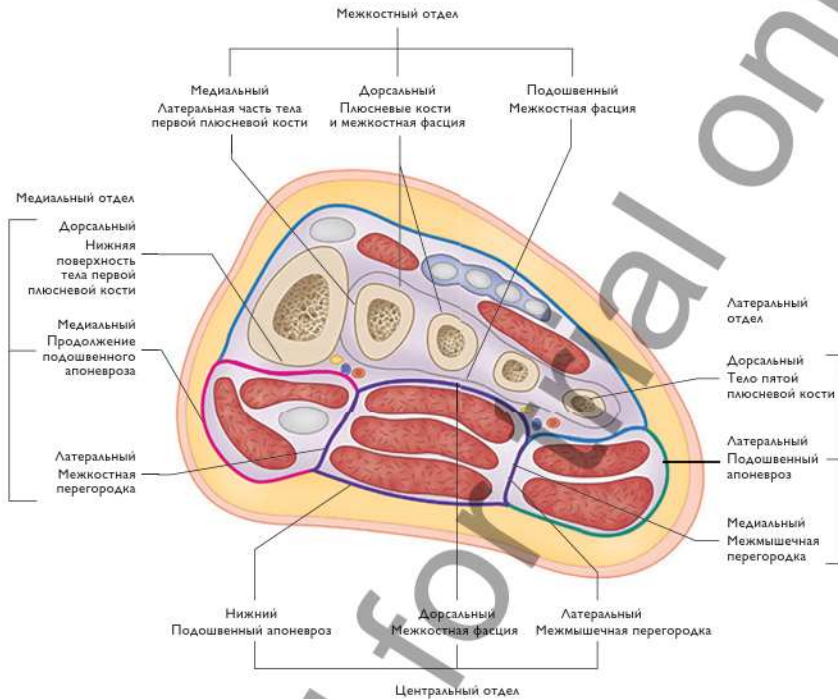


Рисунок 7.3. Четыре основных отдела и их границы. Различные методы исследования привели к разным категоризациям, согласно которым можно выделить от трех до десяти перечисленных компартментов (Reach и др., 2015).

(2019) показало, что сила сгибателей пальцев стопы увеличивается в положении стоя по сравнению с положением сидя. Когда испытуемые стояли, деформация стопы вызывала достаточную пронацию и, следовательно, расширение стопы для натяжения фасциальных тканей. Благодаря тому что работа происходила в ставшем жестким «мешке», сила сгибателей пальцев стопы увеличивалась по сравнению с показателями силы сгибателей пальцев стопы без нагрузки.

В главе 5 мы представили концепцию гидравлического усиления и то, как правильное внутрикомпаратментное давление

увеличивает выходную мышечную силу. Данная концепция актуальна как для полукупола стопы, так и для представления внутренних мышц, например, в виде надувных мешков, которые действуют как амортизаторы и поднимают подъем.

Как и следовало ожидать, увеличение нагрузки на внутренние мышцы увеличивает их размер и силу. Этот простой аргумент является важной частью «босоногого» типа мышления: при уменьшении амортизирующей роли современной обуви стопа может делать то, что и должна была делать всегда, при этом выигрывая от этого получит как сама стопа, так и все остальное тело. Миллер и др. (2014) исследовали это, измерив влияние 12-недельной программы бега на стопы здоровых бегунов. После проведения ряда измерений и разделения

* «Деформация» может звучать как что-то плохое, однако этот термин всего лишь означает, что стопа прогибается, а кости нежного расходятся.

33 бегунов на случайные группы исследование показало, что у тех, кто бегал в минимальной обуви, увеличились площадь поперечного сечения и объемы короткого сгибателя пальцев стопы и мышцы, отводящей мизинец стопы, а также значительно увеличилась жесткость продольной арки стопы.

Данные результаты являются классическим примером того, как наука может показать нам именно то, что мы должны бы были ожидать: позволение стопе реагировать на силы, создаваемые во время бега, увеличивает их рабочую нагрузку. Увеличение нагрузки на любую мышцу при соответствующем графике тренировок, включающем отдых и восстановление, приведет к ее развитию. Хотя чаще всего мы ощущаем преимущества от наращивания бицепсов или квадрицепсов в виде их повышенной способности поднимать больший вес, мы также осознаем, как они «набухают» и становятся более заметными. Мы даже описываем некоторых бодибилдеров словом «пневматический», когда они кажутся чрезмерно «перекачанными». Исследование Миллера иллюстрирует непосредственную пользу такой «накачки» для нашей системы поддержки свода стопы, поскольку было доказано, что увеличенный объем подошвенных мышц и площадь поперечного сечения собственных подошвенных мышц напрямую связаны с мышечной силой (Курихара и др., 2014).

Для наших целей мы будем использовать наиболее распространенный перечень четырех отделов, который соответствует большинству текстов, с которыми вам, вероятно, еще предстоит столкнуться.

1. **Медиальный отдел.** Мышца, отводящая большой палец стопы, короткий сгибатель большого пальца стопы, сухожилие длинного сгибателя большого пальца стопы, медиальные подошвенные артерии, вены и нервы.
2. **Центральный отдел.** Этот отдел разделен на три уровня. Первый уровень включает в себя приводящую мышцу большого пальца стопы. Второй уровень включает квадратную мышцу подошвы, червеобразные мышцы, добавочный сгибатель, мышцу, приводящую большой палец стопы и сухожилия длинных

сгибателей большого пальца стопы и пальцев стопы. В третий уровень входит короткий сгибатель пальцев стопы.

3. **Латеральный отдел.** Мышца, отводящая мизинец стопы, короткий сгибатель мизинца стопы, мышца, противопоставляющая мизинец, и ответвления латеральной подошвенной артерии, вены и нервы.
4. **Межкостный отдел.** Этот отдел также можно разделить на дорсальную и подошвенную части. Дорсальная часть включает в себя дорсальные межкостные мышцы, а в подошвенную часть входят подошвенные межкостные мышцы, а также подошвенная артерия, вена и нерв.

Другое влажище сухожилий проходит над дорсальным межкостным отделом и содержит сухожилия длинного и короткого разгибателей, и может составить пятый отдел стопы, и даже шестой, если вы хотите разделить межкостный отдел на два; восемь — если вам нравится идея трех отделов в центральном отделе; девятым иногда называют пяточную часть центрального отдела, чтобы выделить квадратную мышцу подошвы. Спустя некоторое время обсуждение того, сколько же всего существует отделов, становится довольно академическим, превращается в бурные дебаты, и накал страстей возрастает особенно быстро, если кто-то занимает определенную позицию по этому поводу. Так что имейте это в виду.

Если вас беспокоит наличие компартмент-синдрома, всегда лучше пройти надлежащую диагностику, но общие симптомы легко запомнить: боль, бледность, парестезия, паралич и отсутствие пульса. Эти пункты говорят сами за себя, если учесть влияние повышенного внутрикомпарментного давления на сосудисто-нервные пучки, проходящие через отделы. Любое сдавливание сосудов может повлиять на нервную проводимость и приток крови к данной области или от нее (боль и отсутствие пульса). Отек и повреждение тканей могут вызывать боль и изменение цвета кожи (бледность), ограничение нервной передачи сигналов может вызывать болезненные ощущения покалывания (парестезии), снижать координацию или полностью нарушать ее (паралич).

■ ЧЕТЫРЕ СЛОЯ МЫШЦ

По аналогии с голенью, у которой основная масса мышц находится в икре, стопа имеет мягкие ткани на той стороне, которая выполняет большую часть работы, то есть на подошвенной поверхности. Нередко в описаниях можно увидеть, что подошвенные мышцы более развиты у наших цепких кузенов-приматов (Aiello & Dean, 2002), однако здесь можно привести аргумент (как указано выше!), что относительная слабость нашей стопы является результатом ношения современной обуви и культурных запретов на босые ноги. У Мортон и его современников были всевозможные представления о том, что следует считать правильным, а посвященная анатомии и здоровью стопы литература начала и середины двадцатого века может представлять собой некомфортное чтение для современных более просвещенных исследователей. Казалось, что сексизм, расизм и откровенный снобизм в то время были в порядке вещей для многих, и хотя трудно их оправдывать тем, что они являлись «продуктами своего времени», но именно таковыми они и были. Сегодня мы знаем чуть больше, и уже не судим о человеке по его обуви или ее отсутствию*.

Традиционно в учебниках представлены четыре слоя мышц, и их принято перечислять от поверхностного к глубокому. Интересно, что толстая и прочная «связка» подошвенной фасции (известная также как подошвенный апоневроз**) не включена в список и обычно считается отдельной структурой, однако есть аргументы в пользу включения ее в состав первого слоя.

Как уже упоминалось ранее, анатомические описания изобилуют путаницей между функцией и структурой; частично это вызвано необходимостью разделять и описывать

(анатомировать), что само по себе уже противоречит желанию понять функциональную целостность. Подошвенная фасция также стала жертвой этой тенденции, несмотря на то что ее многочисленные связи с окружающими мышцами изучались в течение некоторого времени. Например, в 1944 году Вуд Джонс описал связь между коротким сгибателем пальцев стопы и подошвенной фасцией как «плотно сплетенную в области пятки» (стр. 163). Однако, как мы увидим ниже, подошвенная фасция также является продолжением и многих других сократительных тканей. Таким образом, подошвенная фасция вполне вписывается в концепцию «динамосвязок», описанных в работе ван дер Валя, в которой он говорит, что мы не должны рассматривать связки исключительно как пассивные структуры, предотвращающие разрыв суставов, поскольку — за счет своей непрерывности с окружающими мышцами — они также способны регулировать жесткость (van der Wal, 2009).

Мощная центральная часть подошвенной фасции сужается кзади, по мере приближения к месту своего прикрепления к пяточной кости, и затем разветвляется к каждому пальцу (рис. 7.4). Эти ответвления связаны между собой серией поперечных полос, которые не позволяют им — а следовательно, и пальцам стопы — слишком сильно раздвигаться. Пять ответвлений и соединяющие их полосы дают дополнительную защиту пальцам ног, обеспечивая опорные точки для жировых подушечек, лежащих между плюсневыми костями, которые, в свою очередь, защищают нервно-сосудистые пучки, проходящие между костями. При таком количестве важных функций жизненно важно, чтобы апоневроз мог оставаться на месте под давлением, и он достигает этого благодаря своим соединениям с кожей через удерживатели кожи.

Латерально подошвенный апоневроз охватывает мышцу, отводящую мизинец стопы, и образует часть латерального тяжа подошвенной фасции, который соединяет внешнюю сторону пяточной кости с основанием пятой плюсневой кости. Таким образом, фасция и короткая мышца, отводящая мизинец стопы, охватывают пяточно-кубовидный мост, проход для длинной

* Или нет?

** Название этой структуры по-прежнему обсуждается, причем кто-то выступает за подошвенную «фасцию», поскольку именно она окружает мышцу, кто-то — за подошвенный «апоневроз», потому что он соединяет мышцу с теми составляющими, движение которых она осуществляет. Можно привести самые разные аргументы в пользу каждого из этих вариантов, поэтому я просто поменяю местами подошвенную фасцию и подошвенный апоневроз, чтобы представить читателю некоторое разнообразие.

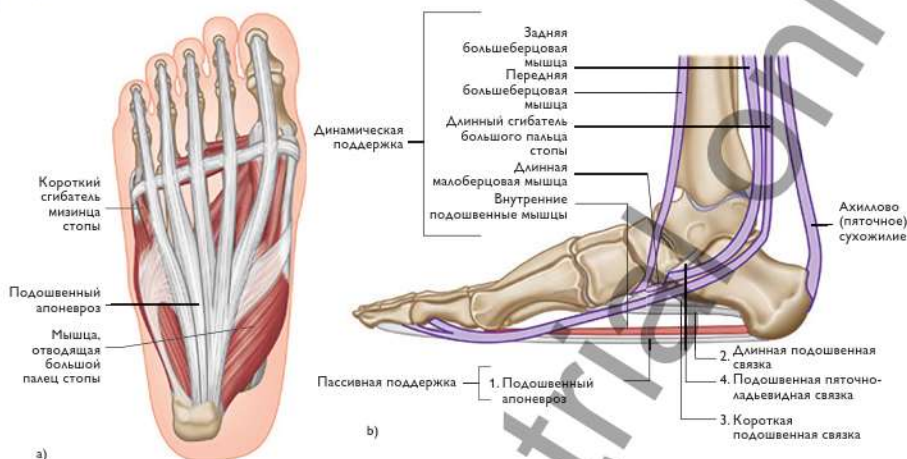


Рисунок 7.4. а) Вид снизу на подошвенный апоневроз показывает его сильное проксимальное прикрепление к пяточной кости, а также и ответвления от центральной полосы, которые простираются к подушечкам стопы, где они связаны вместе поперечными волокнами. Апоневроз простирается латерально, охватывая короткий сгибатель пальцев стопы, и медиально, охватывая мышцу, отводящую большой палец стопы. б) Вид с медиальной стороны представляет собой стандартную анатомическую разработку динамической поддержки от внешних мышц, которую мы видели в предыдущей главе, и трех основных слоев «пассивной» поддержки, состоящих из подошвенного апоневроза (также известного как подошвенная фасция), и длинной и короткой подошвенных связок. (Адаптировано из книги Вуда Джонса, 1944)

малоберцовой мышцы, область, которая укорачивается во время пронации и должна снова удлиниться, чтобы позволить супинацию. Эту область может быть интересно проверить в стопах, которые либо вообще не способны формировать жесткий рычаг, либо делают это с большой неохотой (мы рассмотрим это в главе 8).

Подошвенный апоневроз человека считается уникальным по своей форме и степени жесткости. «Механизм лебедки» был предложен Хиксом в серии статей в 1950-х годах. С тех пор «механизм лебедки» стал стандартной частью истории о том, как человеческая стопа, в отличие от стоп других приматов, становится жесткой при подготовке к схождению с пальцев. Однако недавнее сравнительное исследование подошвенной фасции приматов показало, что у некоторых видов также есть хорошо развитые центральные полосы, которые, вопреки распространенному мнению, также помогают придавать жесткости их стопам, действуя как часть «механизма лебедки» (Sichting и др., 2020, см. ниже).

Уверенность в том, что «механизм лебедки» является главным «механизмом жесткости» человеческой стопы, недавно была поставлена под сомнение, когда Фаррис и др. (2020) в своей статье задались вопросом, каким образом подошвенный апоневроз может действовать, как амортизирующая пружина, и быть достаточно жестким, чтобы создавать «жесткую связь» между пяткой и пальцами стоп. Их работа указывает на то, что внутренние подошвенные мышцы играют более важную роль в стабилизации стопы, чем подошвенная фасция, когда стопа поднимается, создавая разгибание пальцев стопы.

Пожоже, что за создание и поддержание жесткого рычага отвечает не какой-то один конкретный механизм, а смешанная стратегия, сочетающая костную архитектуру (замыкание поперечного сустава предплюсны), подошвенную фасцию, внешние и внутренние мышцы. Ответственность за создание и удержание жесткого рычага переходит во время движения от одной ткани к другой.

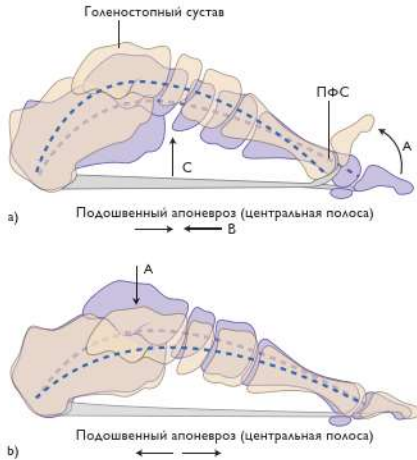


Рисунок 7.5. Начиная с работы Хикса (1955 и 1956), демонстрирующей «механизм лебедки», подошвенная фасция считалась неотъемлемой составляющей создания жесткого рычага для отталкивания (a). Подошвенная фасция также деформируется под нагрузкой, накапливая эластичную энергию, что способствует двигательной эффективности (b). Сихтинг и его коллеги предполагают, что две эти роли являются взаимоисключающими, поскольку трудно одновременно быть и эластичной, и жесткой. (Адаптировано из Sighting и др., 2020.)

Очевидно, что подошвенная фасция — это больше, чем просто пассивная связка, и здесь было бы заманчиво предположить возможное влияние, оказываемое ее непрерывностью с сократительными тканями ахиллова сухожилия, короткого сгибателя мизинца стопы и мышцы, отводящей большой палец стопы (Stecco, 2015), и короткого сгибателя пальцев стопы (Вуд Джонс, 1944). Из-за насыщенности механорецепторами и непрерывности со многими мышцами Стекко сравнивает подошвенную фасцию с «кучером, направляющим мышцы подошвы стопы и помогающим координировать все эти структуры во время движения», — образ, который еще больше подчеркивает взаимодействие между непрерывными тканями (рис. 7.6). Вполне понятно, что роли и обязанности распределены между тканями и что они могут взаимодействовать с многочисленными уровнями организации, способствуя

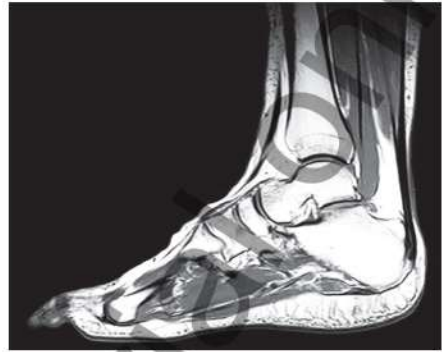


Рисунок 7.6. Эта МРТ демонстрирует непрерывность огибающего пяточную кость ахиллова сухожилия с подошвенной фасцией, что позволяет трехглавой мышце голени натягивать подошвенную фасцию. На данном изображении также показано, что короткий сгибатель пальцев стопы проходит по глубокой части подошвенной фасции и соединяется с ней. Как предложил ван дер Валь (2009), слой связок следует рассматривать как активное расширение сократительных тканей, поскольку все внутренние и внешние сгибатели могут регулировать натяжение подошвенной фасции.

одной и той же динамике, особенно если учесть большие силы, возникающие при супинации и при сходе с пальцев.

Как предупреждали нас Мортон и Вуд Джонс, функциональное, движущееся тело нельзя понять с помощью учебника анатомии. Важную роль играют существующие в нем взаимодействия и непрерывности, которые лишь с недавних пор стали исследоваться и оцениваться на основе целостного и функционального подхода. В своей статье Sighting и др. (2020) прекрасно проиллюстрировали это, проведя сопоставление с основными направлениями волокон подошвенной фасции у ряда приматов (см. рис. 7.7). Только у человека подошвенная фасция была выровнена преимущественно в сагитальной плоскости, причем как центральные, так и латеральные волокна были ориентированы сзади вперед. На рис. 1.8, где приведено сопоставление некоторых паттернов походки, показано, что у других приматов передача силы происходит от латеральных волокон к медиальным (см. рис. 7.7b, с и e)

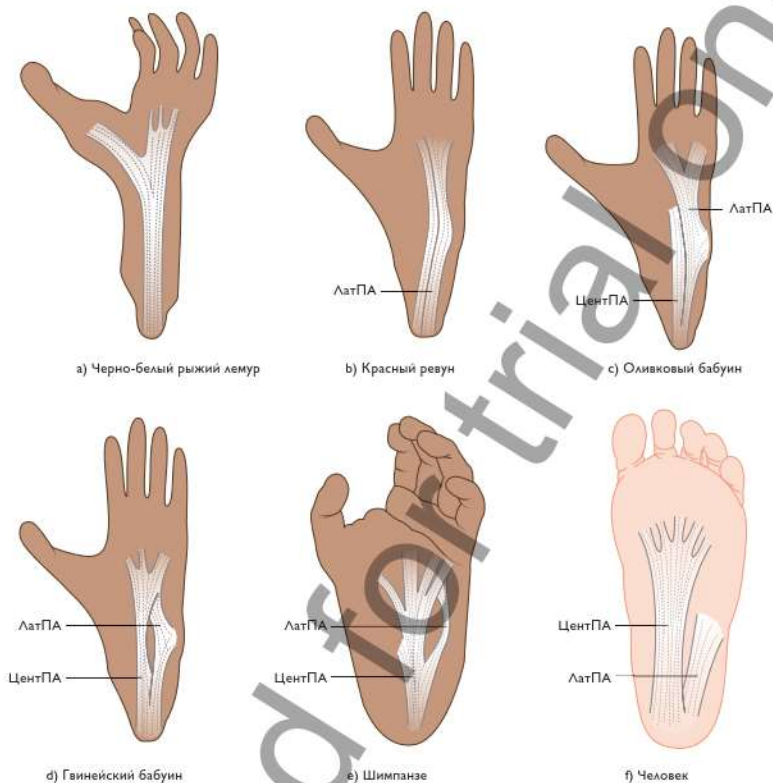


Рисунок 7.7. Среди приматов было идентифицировано шесть основных типов стопы, но только человеческая стопа продемонстрировала постоянное выравнивание ткани подошвенного апоневроза (ПА) спереди назад. Остальные типы имели разную степень отклонения латеральной (латПА) или центральной (центПА) порций апоневроза. (Адаптировано из Sicking и др., 2020.)

или от медиальных волокон к отведенному большому пальцу стопы (см. рис. 7.7а и е), что иллюстрирует определенное пересечение между двигательными паттернами и архитектурой тканей.

Преобладающее направление волокон в подошвенном апоневрозе соответствует прохождению через четыре переката стопы, от пятки к носку, и если посмотреть на ЭМГ внешних мышц в предыдущей главе, мы увидим

интересную закономерность (см. рис. 6.14). Все они становятся менее активными после 50% цикла походки. Примерно на этой стадии цикла ходьбы пятка начинает подниматься, а пальцы разгибаются — на этом завершается работа стабилизаторов голеностопного сустава (внешние мышцы), и ответственность за создание жесткого рычага переходит к четырем слоям внутренних мышц стопы (Farris и др., 2020; Zelik и др., 2014).

Ахиллово сухожилие, пяточная кость и подошвенная фасция как функциональная единица

Идея непрерывности тканей между подошвенной фасцией и ахилловым сухожилием существует уже некоторое время и была исследована еще в 1995 году (Snow и др.). В этом исследовании было обнаружено, что сразу после рождения между этими двумя структурами существует сильная непрерывность, однако с возрастом она уменьшается, что предполагает, что подобная непрерывность постепенно перестает быть функционально значимой.

Тем не менее две недавние статьи внесли дополнительную ясность в расположение костей и мягких тканей вокруг области пятки. В одной статье показано, что подошвенная фасция и ахиллово сухожилие имеют морфологическое сходство по толщине ткани и площади поперечного сечения по обе стороны от пяточной кости (Singh и др., 2021, рис. 7.6). Авторы предполагают, что сопоставимость этих показателей указывает на функциональную связь между двумя сильными коллагеновыми структурами.

В более ранней статье у девяти взрослых в возрасте от 28 до 93 лет исследовалась поверхностная костная ткань вокруг пяток (Zwinger и др., 2020). В документе сообщается, что выравнивание поверхностных трабекул ориентировано по направлению к двум мягким тканям на каждом конце. Такое верхне-нижнее расположение трабекул контрастирует с косым веерообразным рисунком трабекул, оба они хорошо видны на рис. 7.6.

Было обнаружено, что поверхностный слой кости вокруг заднего отдела пяточной кости содержит коллагеновые волокна и адипоциты, что позволяет предположить, что существовавшая прежде непрерывность мягких тканей частично окостенела, но продолжает действовать как функциональная связь между ахилловым сухожилием и подошвенной фасцией. Такая функциональная связь

обосновывает терапевтические стратегии, направленные на облегчение состояния подошвенной фасции посредством упражнений на растяжение и укрепление икроножных мышц.

I. Первый слой — поверхностный

Три мышцы первого подошвенного слоя расходятся веером от пяточной кости к пальцам ног, напоминая дельтовидную мышцу (рис. 7.8). Хотя слово «сгибатель» содержится лишь в названии короткого сгибателя пальцев стопы (посередине), все три мышцы участвуют в сгибании пальцев стопы (Mickle и др., 2012). Таким образом, каждая из этих мышц участвует в замедлении и контроле разгибания пальцев стопы, и, поскольку все три мышцы охватывают половину купола стопы, они помогают подтягивать пяточную кость к пальцам стопы при подъеме пятки, в результате чего мы приближаемся к положению схода с пальцев. Как мы уже видели выше, функциональным при схождении с пальцев стопы является такое ее положение, при котором внутренняя часть стопы становится более жесткой и помогает сохранять жесткий рычаг при подготовке к сходу с пальцев стопы.

Короткий сгибатель пальцев стопы — одна из немногих «коротких» мышц, расположенных поверхностно по отношению к «длинной» мышце, пересекающей те же суставы. Длинный сгибатель пальцев стопы идет от задней части голени к дистальным фалангам и проходит глубже короткого сгибателя, когда пересекает подошву стопы. Сухожилия короткого сгибателя пальцев стопы разделяются в области проксимальных фаланг, чтобы позволить длинным сухожилиям пройти до дистальных фаланг (см. вставку на рис. 7.8).

Подобное расположение весьма необычно, поскольку тканям значительно легче упорядочиваться, когда более длинные мышцы «перепрыгивают» поверх глубоких тканей без необходимости проходить сквозь них (см. рис. 7.11). Аналогичное расположение можно наблюдать в ладони: благодаря ему более

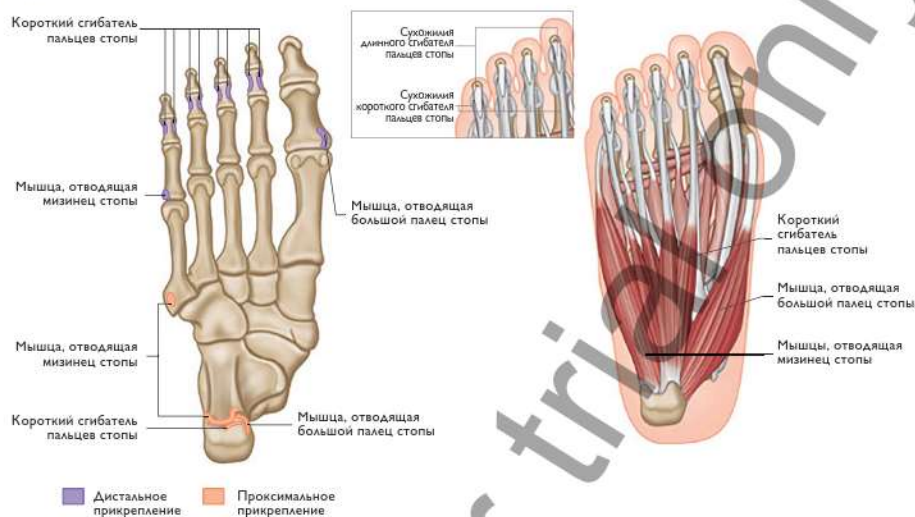


Рисунок 7.8. Первый слой внутренних мышц

Короткий сгибатель пальцев стопы: проксимальное прикрепление — медиальный отросток пяточной кости и подошвенный апоневроз. Дистальное прикрепление — средние фаланги второго-пятого пальцев стопы. Действие — сгибание средних фаланг второго-пятого пальцев стопы (проксимальные межфаланговые суставы).

Мышца, отводящая большой палец стопы: проксимальное прикрепление — медиальный отросток пяточной кости и подошвенный апоневроз. Дистальное прикрепление — проксимальная фаланга первого пальца стопы (ПФС). Действие — отведение первого пальца стопы. Сгибание первого ПФС.

Мышца, отводящая мизинец стопы: проксимальное прикрепление — латеральный отросток пяточной кости и подошвенный апоневроз. Дистальное прикрепление — проксимальная фаланга пятого пальца стопы. Действие — сгибание пятого пальца стопы (ПФС). Отведение пятого пальца стопы (ПФС).

крупные и сильные мышцы имеют возможность прикрепляться к дистальным фалангам, которым требуется больше силы для захвата и контроля.

Последовательное прикрепление мышц к каждой из фаланг обеспечивает точный контроль над каждым суставом, при этом данное механическое преимущество для захвата уменьшается по мере того, как человек перемещения вдоль пальцев дистальнее. Чтобы компенсировать потерю механического преимущества, более сильная мышца проходит к дистальной фаланге, а более короткая внутренняя мышца контролирует проксимальный межфаланговый сустав, где она может проявлять большую силу.

То, что более длинные внешние мышцы имеют возможность пройти через дистальные фаланги, дает ряд преимуществ. Во-первых, как указано выше, это увеличивает силовой потенциал: большие и тяжелые мышечные брюшки располагаются более проксимально, чтобы снизить двигательные затраты на движение тяжелых дистальных конечностей. Увеличение длины мышечных волокон, которые прикрепляются к дистальным фалангам, также дает дополнительное преимущество из-за прямой зависимости между длиной волокна и амплитудой движения: чем длиннее мышечное волокно, тем больше оно может укорачиваться. Таким образом, прикрепление более

длинных мышц к костям, которые двигаются дальше всего, имеет смысл как для увеличения силы захвата, так и для увеличения диапазона движений.

Как мы видели выше, в нескольких статьях предполагается, что этот первый слой внутренних мышц имеет тесное взаимодействие с подошвенным апоневрозом, а их сплетающиеся прикрепление к передней части пяточной кости создает очаг высокой нагрузки. В то время как большинство текстов больше фокусируются на том, как эти мышцы воздействуют на пальцы ног, их прикрепление к пятке фокусируется на относительно узкой области. Особенно это касается центральной части стопы, средней порции подошвенного апоневроза и короткого сгибателя пальцев стопы, поскольку расположение их волокон соответствует преимущественно сагиттальному продвижению стопы, когда она поднимается в положение схода с пальцев. Близость их прикрепления и непрерывность ткани между волокнами короткого сгибателя пальцев стопы и подошвенной фасции могут затруднить выявление источника боли, которая может развиваться в этой области. В этой области, среди многих других состояний, могут возникать пяточные шпоры, подошвенный фасциит и переломы, и для проведения соответствующего лечения необходимо правильно диагностировать источник боли (Yi и др., 2011) (рис. 7.9).

2. Второй слой

Квадратную мышцу подошвы иногда называют добавочным сгибателем пальцев стопы*, но мне не нравится это последнее название,



Рисунок 7.9. Передний отросток пяточной кости является областью высокой нагрузки, что делает его восприимчивым к развитию пяточных шпор, которые иногда приводят к боли и дискомфорту (но не всегда!). В месте прикрепления подошвенного апоневроза и ткани первого слоя внутренних мышц также может развиваться ряд проблем, требующих экспертной дифференциальной диагностики.

поскольку мне кажется, что оно напрасно отвлекает нас от реальной функции мышцы. Квадратная мышца подошвы отсутствует в стопах других приматов — помните косые углы подошвенного апоневроза и шаткую походку человекообразных обезьян? У людей прямой подошвенный апоневроз и преимущественно прямолинейная походка. Таким образом, основная функция квадратной мышцы подошвы состоит не в том, чтобы «дополнять» длинный сгибатель пальцев стопы, когда он сгибает пальцы, а в том, чтобы контролировать продвижение в сагиттальной плоскости к разгибанию пальцев стопы. Как мы все это время исследовали, для понимания функции нередко требуется перевернуть наооборот обозначенное типичное действие мышцы. Но в большинстве дискуссий об угле и положении квадратной мышцы подошвы крайне редко упоминается (если вообще упоминается) необходимость стабилизации стопы при подъеме пятки и переходе к схождению с пальцев.

Было высказано предположение, что квадратная мышца подошвы, будучи сгибателем пальцев стопы, задействуется для создания дополнительной силы при ускоренной ходьбе (Aiello & Dean, 2002). Вполне возможно, что когда нам нужно увеличить скорость

* Иногда присутствует еще одна мышца — длинный добавочный сгибатель пальцев стопы. Как вы слышали, в некоторых текстах упоминается его случайное присутствие, в то время как в остальной части текста он упоминается как квадратная мышца подошвы, а не как добавочный сгибатель пальцев стопы. И если кто-то человек не знает о том, что квадратную мышцу подошвы иногда называют добавочным сгибателем пальцев стопы, можно потратить часы на поиски короткого добавочного сгибателя пальцев стопы, которого не существует. Иногда создается впечатление, что нас намеренно хотят запутать.

ходьбы, происходит дополнительная выработка силы квадратной мышцей подошвы, но можем ли мы быть уверены, что именно это дополнительное производство силы толкает нас вперед? Или же квадратная мышца подошвы увеличивает свое участие, чтобы компенсировать возрастающую вероятность нестабильности стопы? Опять же, это может оказаться вполне академической дискуссией, поскольку обе динамики происходят одновременно, и при этом должны быть удовлетворены обе потребности.

Должен ли ответ быть бинарным? Положение квадратной мышцы подошвы позволяет ей увеличить сгибание пальцев стопы для дополнительного продвижения вперед, и, поскольку она охватывает подошвенную сторону, дополнительное усилие также поможет стабилизировать полкупол.

Продвижение в сагитальной плоскости через перекаты стопы сначала задействует подошвенный апоневроз и «механизм лебедки», чтобы мягкие ткани могли обеспечить жесткий рычаг,

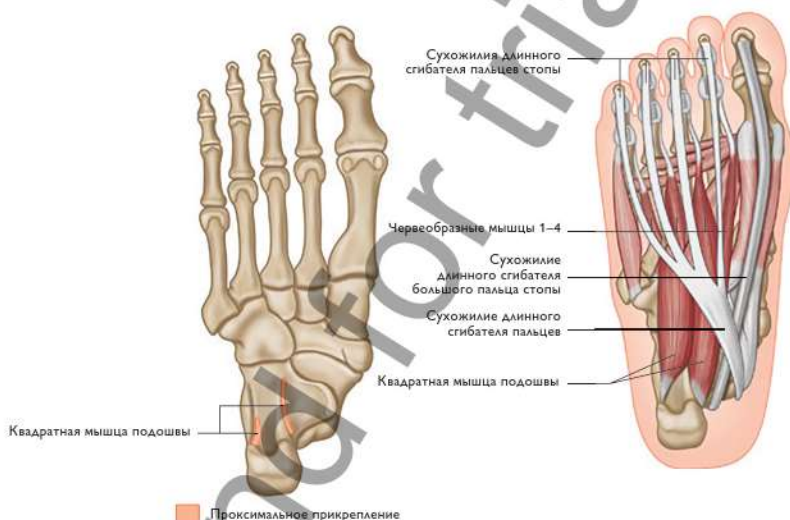


Рисунок 7.10. Второй слой внутренних мышц

Соединяется с сухожилием длинного сгибателя пальцев стопы. Две головки квадратной мышцы подошвы (также известной как «добавочный сгибатель пальцев стопы») проходят от передней части пяточной кости к сухожилию длинного сгибателя пальцев стопы, когда оно проходит через середину стопы. Сухожилие длинного сгибателя пальцев стопы делится на четыре части, чтобы обслуживать четыре латеральных пальца стопы, и обеспечивает место для прикрепления червеобразных мышц, которые дистально прикрепляются к основаниям второй-пятой проксимальных фаланг.

Квадратная мышца подошвы: проксимальное прикрепление — медиальная и латеральная стороны пяточной кости. Дистальное прикрепление — задняя, латеральная часть сухожилия длинного сгибателя пальцев стопы. Действие — помогает длинному сгибателю пальцев стопы сгибать пальцы со второго по пятый. Часто предлагается выпрямить линию натяжения длинного сгибателя пальцев.

Червеобразные мышцы: проксимальное прикрепление — сухожилия длинного сгибателя пальцев стопы. Дистальное прикрепление — основания проксимальных фаланг второго-пятого пальцев стопы и сухожилия длинного разгибателя пальцев стопы (на тыльной поверхности пальцев стопы) — часть тыльного пальцевого расширения. Действие — сгибает проксимальные фаланги второго-пятого пальцев стопы в ПФС. Разгибает средние и дистальные фаланги второго-пятого пальцев стопы в межфаланговых суставах.

а затем, по мере дальнейшего разгибания пальцев стопы, уже вступают в действие более глубокие слои. Там, где первый слой внутренних мышц плотно прилегает к подошвенному апоневрозу, этот второй слой, особенно квадратная мышца подошвы, связан с другой прочной опорой стопы — длинной подошвенной связкой (рис. 7.10).

Квадратная мышца подошвы имеет две головки, отходящие от передней части пяточной кости, между которыми расположена длинная подошвенная связка. Из двух головок медиальная больше и длиннее, а латеральная — плоская и сухожильная, так как прикрепляется к латеральному краю длинного сгибателя пальцев стопы. Как это бывает со многими другими мышцами, ее наличие индивидуально: иногда она может вообще отсутствовать, или же

отсутствует ее латеральная порция, прикрепляющаяся к четвертому и пятому пальцам стопы; и примерно в 9% случаев может присутствовать ее третья полоска (Pretterklieber, 2018).

Червеобразные мышцы представляют собой еще одну необычную группу мелких мышц: они исходят из сухожилий и обеспечивают как сгибание, так и разгибание пальцев стопы (хотя и в разных суставах, рис. 7.10). Эта группа из четырех небольших мышц берет начало от сухожилия длинного сгибателя пальцев стопы. Первая червеобразная мышца исходит от медиальной части сухожилия; все остальные берут начало внутри углов разделения сухожилий, и, следовательно, каждая из них прикрепляется сразу к двум сухожилиям.

Участвуя в формировании сложного апоневроза, окружающего суставы пальцев

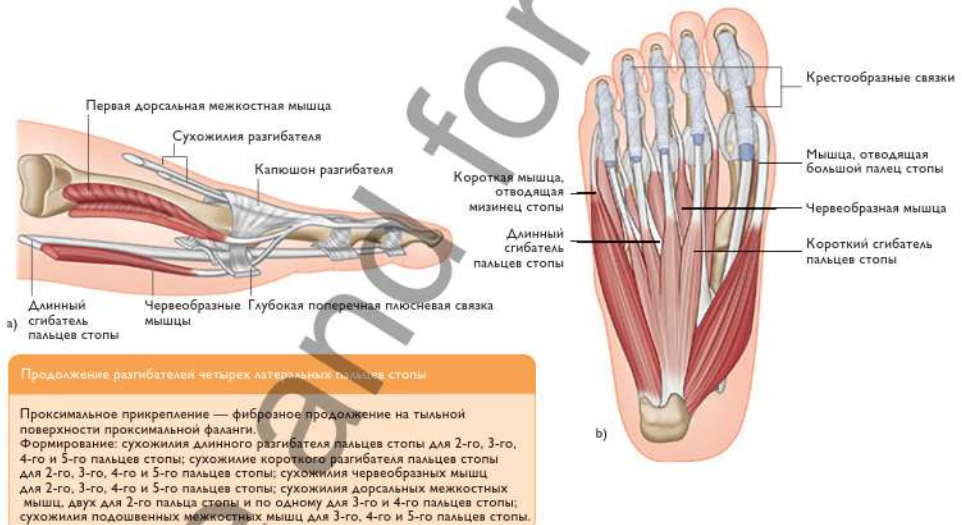


Рисунок 7.11. а) Словно и без того все не слишком запутано, расширение разгибателей также известно как разгибательный капюшон, дорсальное расширение или капюшон, или как дорсальный апоневроз. Он преимущественно формируется непрерывностью тканей, обеспечиваемых сухожилиями разгибателей (отсюда и его название), но также обеспечивает место прикрепления для червеобразных и подошвенных межкостных мышц. б) Фасциальная оболочка пальцев стопы формируется из дорсальной фасции, которая получает сухожилия от мышцы, отводящей большой палец стопы, и от мышцы, отводящей мизинец стопы, а также от разгибателей, показанных на рисунке а. Межфаланговые суставы, классифицируемые как блок-видные суставы, не имеют собственной костной поддержки, претворяющей ротацию, но получают связочную поддержку от крестообразных связок, которые и претворяют ротацию между ними.

стопы, червеобразные мышцы помогают длинному сгибателю пальцев стопы и разгибателям пальцев стопы лучше контролировать движения пальцев стопы. Этот апоневроз, известный как расширение разгибателя, обеспечивает различные сухожилия местами прикрепления, а также удерживателем, который помогает им изменять направление своего движения. Мы особенно четко видим это на примере червеобразных мышц, когда они опускаются под глубокую поперечную связку, а затем снова поднимаются к капюшону разгибателя над средним и дистальным межфаланговыми суставами (рис. 7.11а).

3. Третий слой

Данная группа мышц имеет идеальное расположение для глубокого контроля предплюсневых и плюсневых костей во время движения. Поскольку первые два поверхностных слоя заняли все места прикрепления к пяточной кости, то для третьего слоя внутренних мышц, которые охватывают и поддерживают средний и передний отделы стопы, там не осталось места. Вместо этого они прикрепляются к поперечному суставу предплюсны и плюсневым костям (рис. 7.12а). Распределение их волокон под четырьмя углами создает рисунок,

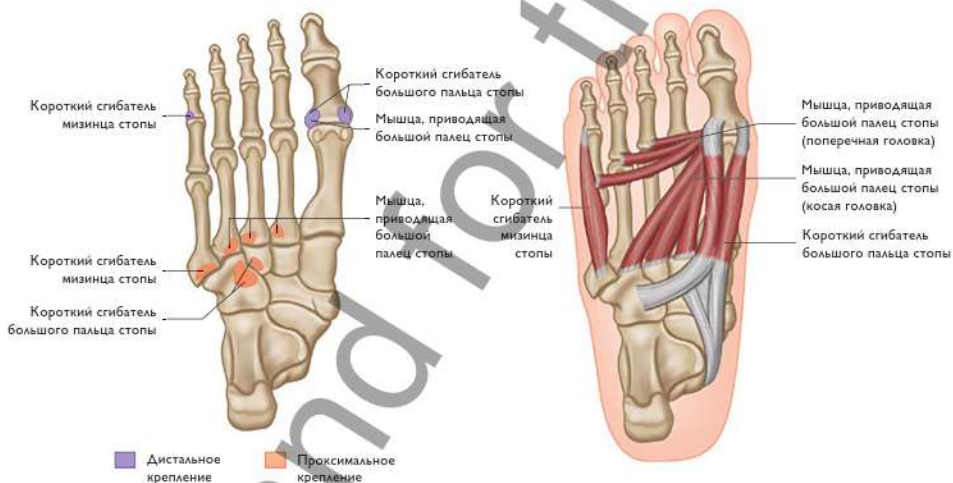


Рисунок 7.12. Третий слой внутренних мышц

Пересекая стопу от латерального края к медиальному, эти мышцы обеспечивают и движение, и стабильность.

Короткий сгибатель большого пальца стопы: проксимальное прикрепление — подошвенная поверхность кубовидной и латеральной клиновидных костей. Дистальное прикрепление — медиальная и латеральная поверхности основания проксимальной фаланги первого пальца стопы. Действие — сгибание первого пальца стопы в ПФС.

Мышца, приводящая большой палец стопы: проксимальное прикрепление — косая головка — основания второй-четвертой плюсневых костей. Поперечная головка — подошвенная связка третьего-пятого ПФС. Дистальное прикрепление — латеральная поверхность основания проксимальной фаланги первого пальца стопы. Действие — приведение и сгибание первого пальца стопы в ПФС. Поддержка и сохранение «поперечной арки стопы».

Короткий сгибатель мизинца стопы: проксимальное прикрепление — основание пятой плюсневой кости. Дистальное прикрепление — основание проксимальной фаланги пятого пальца стопы. Действие — сгибание пятого пальца стопы в ПФС.

напоминающий коробку на подошве стопы, обеспечивая целостность кости за счет диапозона углов.

Мы могли бы рассмотреть три мышечные головки (поперечную и косую порции мышцы, приводящей большой палец стопы, и короткий сгибатель большого пальца стопы) как еще одну дельтовидную мышцу, которая может либо придать стопе чашеобразную форму, тем самым помогая ей осуществить захват, либо обеспечить связь с большим пальцем стопы с трех разных ракурсов. Поперечная головка имеет наилучшее расположение для приведения пальца стопы, а также для поддержки головок плюсневых костей и проходящих между ними связок. Поперечная головка деформируется во время пронации, обеспечивая мышечное волокно механорецепторной информацией и преднатягивая поддерживающую его фасциальную ткань для увеличения поддержки этой дистальной арки. Две другие головки этой дельтовидной мышцы, короткий сгибатель большого пальца стопы и косая головка мышцы, приводящей большой палец стопы, помогают медиальной продольной арке стопы. Эти две мышцы имеют общее сухожилие там, где они встречаются на внутренней стороне проксимальной фаланги, но при этом они по-разному иннервируются и поэтому могут действовать независимо друг от друга. Тем не менее данную группу лучше всего рассматривать в совокупности, с учетом того, что все три головки помогают поддерживать полукупол, — аналогичная перевёрнутая форма создается, когда они «складываются в горсть», помогая стопе захватывать или удерживать предметы.

Короткий сгибатель большого пальца стопы разделяется по мере приближения к большому пальцу ноги, и в эти разветвления входят сухожилия: медиально — от мышцы, приводящей большой палец стопы, и латерально — от мышцы, отводящей большой палец стопы. Эти большие и сильные сухожилия содержат в себе и управляют двумя сесамовидными костями, которые образуют туннель для сухожилия длинного сгибателя большого пальца стопы (см. рис. 7.13).



Рисунок 7.13. Внутри разделенного сухожилия короткого сгибателя большого пальца стопы находятся две сесамовидные кости. Они обеспечивают путь для сухожилия длинного сгибателя большого пальца стопы, но могут смещаться из-за различных деформаций стопы (чаще всего — вальгусной деформации) и воспаляться из-за повторяющегося напряжения.

Сухожилие короткого сгибателя мизинца стопы вплетается в мышцу, отводящую мизинец стопы. В целом, эти сливающиеся сухожилия, подходящие к пальцам ног из разных источников и прикрепляющиеся к ним, обеспечивают более прочные опорные точки, и хотя это может уменьшить их индивидуальный контроль и диапазон движения, человеческая стопа намного больше нуждается в силе и стабильности, нежели в способности осуществлять тонкие манипуляции.

Сухожилия трех мышц этого слоя сливаются со связками и суставными капсулами вокруг ПФС, и каждая мышца играет роль в поддержании структурной целостности и мобильности этих суставов. Головки плюсневых костей и, следовательно, соответствующие им суставы с проксимальными фалангами оказывают значительное давление на землю по мере того, как мы приближаемся к разгибанию пальцев стопы. Капсулы ПФС реагируют утолщением подошвенной ткани. Эти защитные утолщения

называются подошвенными пластинами и являются частью прочной и толстой фасциальной сети, которая непрерывна с глубокой частью подошвенной фасции (рис. 7.14).

Головки плюсневых костей и связанные с ними подошвенные пластины требуют определенной степени подвижности по сравнению с надежными проксимальными суставами между основаниями плюсневых костей, клиновидными и кубовидными костями. Уравнение мобильности/стабильности для головок плюсневых костей решается посредством глубокой поперечной связки, которая проходит между головками и охватывает каждую из подошвенных пластин. Глубокая поперечная связка и подошвенные пластины образуют поперечную перемычку — анатомическое устройство, которое предотвращает вывих передней части стопы и сохраняет положение подошвенных пластин.

Непрерывность между подошвенным апоневрозом, подошвенными пластинами и глубокой поперечной связкой позволяет стопе расширяться во время пронации, тем самым натягивая всю систему. Поскольку подошвенный апоневроз расположен поверхностно и охватывает большую часть стопы, он получает большую часть нагрузки во время пронации. Таким образом, с механической точки зрения вполне обоснованно, что поверхностная ткань подошвенного апоневроза оборачивается вокруг более глубоких сухожилий сгибателей, чтобы достичь подошвенных пластин и способствовать преднатяжению всего соединительного механизма.

Поперечная головка мышцы, приводящей большой палец стопы, обеспечивает сократительную реакцию для мониторинга и контроля расширения стопы и имеет соединения с суставными капсулами для дополнительной поддержки и безопасности. Несмотря на плотность ткани и дополнительное укрепление, подошвенные пластины склонны к разрывам и иногда могут позволить плюсневой кости двигаться в пределах капсульного окружения (Stainsby, 1997).

Снижение целостности глубокой поперечной связки может способствовать развитию вальгусной деформации большого

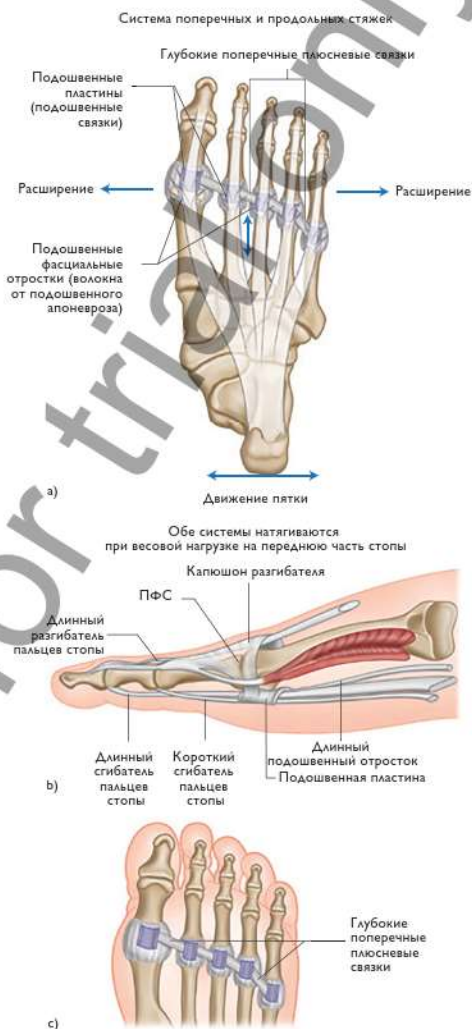


Рисунок 7.14: а) Под действием весовой нагрузки стопа расширяется при пронации и натяжении подошвенных тканей. Ее целостность поддерживается за счет ряда слоев и направлений тканей. Подошвенный апоневроз имеет волокна, которые идут к капсулам ПФС и поддерживают подошвенные пластины (подошвенные связки) ниже суставов. б) Подошвенная пластина обеспечивает амортизацию и скольжение головок плюсневых костей во время движения и удерживается на месте сложными стропами капюшона разгибателя. в) Поперечная связка по Мортону (1922).

пальца стопы. В ранней статье по сравнительной анатомии Мортон (1922) предполагал, что поперечная связка человека менее развита между первым и вторым пальцами стопы по сравнению с соединениями между остальными пальцами.

Мортон предположил, что виной этому стала потребность в более широкой подвижности большого пальца ноги у наших древесных предков, что и привело к такому анатомическому паттерну. С тех пор было высказано предположение, что отсутствие привязки между первой и второй плюсневыми костями позволяет первому лучу мигрировать от второго, что подтверждается исследованием трупов, в котором было обнаружено снижение поддержки поперечной связки с большим пальцем стопы при растяжении на стопах (Abdalbary et al., 2016).

4. Четвертый слой

Два набора межкостных мышц не являются зеркальным отображением друг друга. Подошвенная группа имеет только по одной головке на каждый палец стопы и покрывает только пальцы стопы с третьего по пятый. Напротив, дорсальная группа является двуперистой, с головками, отходящими от соседних плюсневых костей, и включает в себя второй палец стопы (см. рис. 7.15).

С функциональной точки зрения соединение сгибания с приведением вполне обоснованно, поскольку для действия захвата требуется смыкающее действие. Отпускание предмета, будь то ветка или инструмент, использует открывающее движение разгибания и отведения.

Хотя межкостные сгибатели покрывают только пальцы с третьего по пятый, им помогают многие другие мышцы подошвенной поверхности. Нам требуется хороший контроль сгибания для захвата, и нам нужна сила сгибателей, чтобы контролировать движение разгибания.

Большая часть разгибания пальцев ног человека производится либо в ответ на нашу инерцию, когда мы перемещаемся по передней части стопы, и пережат пальцев стопы, либо при уменьшающемся сопротивлении, когда

мы поднимаем пальцы стопы во время и сразу после схождения с пальцев стопы. В любом из этих действий требуется лишь небольшое усилие, особенно если сравнить их с осуществляемой сгибателями амортизацией.

■ РАЗГИБАТЕЛИ ПАЛЬЦЕВ СТОПЫ

Короткие разгибатели пальцев стопы — тонкие и непостоянные мышцы, их иногда рассматривают как одну мышцу с четырьмя головками, идущими к каждому из первых четырех пальцев стопы (рис. 7.16). Многие люди даже не подозревают об их существовании, пока не завяжут слишком туго шнурки и не почувствуют, как что-то начинает давить под ними.

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

Внутренние мышцы имеют сложную многослойную систему, причем некоторые из них не совсем соответствуют нормальному анатомическому расположению поверхностных к глубоким и длинным к коротким. Суставы пальцев стоп заключены в оболочку, в которую поступают ткани из ряда сухожилий, что создает проходы для сухожилий, прокладывающих свой путь проксимально или дистально, чтобы обеспечить точный контроль. Такая запутанная организация обеспечивает дополнительный контроль над паттерном сгибания и разгибания через суставы пальцев и имеет схожую организацию с кистью руки.

В отличие от кисти руки, основная роль стопы человека заключается в том, чтобы справляться с воздействующими на нее силами, а не выполнять тонкие манипуляции. Но наряду с теми многими функциями стопы, которые она выполняет в контроле за передачей силы, не менее важной является ее способность двигательного контроля, позволяющая ей адаптироваться к изменениям позы и движения. Лучшее понимание этих ролей привело к возрождению интереса к внутренним мышцам, чему в значительной степени способствовали исследования преимуществ занятий босиком и использования минимальной обуви.

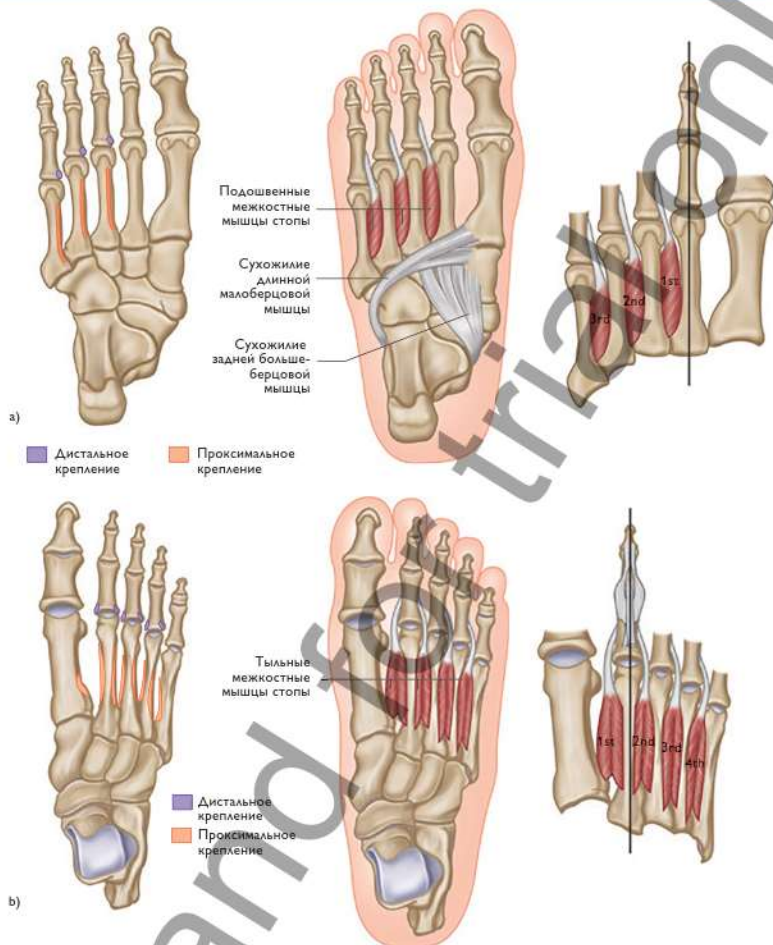


Рисунок 7.15. Четвертый слой внутренних мышц

а) Самый глубокий слой подошвенных тканей включает сухожилия задней большеберцовой и длинной малоберцовой мышц (описано в предыдущей главе), а также подошвенные и тыльные межкостные мышцы. Действие коротких подошвенных мышц легко запомнить, просто сгибая и разгибая пальцы ног, чтобы почувствовать их естественную склонность создавать приведение при сгибании и отведение — при разгибании. б) Вид стопы с тыльной стороны показывает тыльные межкостные мышцы стопы и два разгибателя — разгибатель большого пальца стопы и короткий разгибатель пальцев стопы.

Подошвенные межкостные мышцы: проксимальное прикрепление — медиальные поверхности третьей-пятой плюсневых костей. Дистальное прикрепление — медиальные поверхности проксимальных фаланг третьего-пятого пальцев стопы. Действие — сгибание и приведение третьего-пятого пальцев стопы в ПФС.

Тыльные межкостные мышцы: проксимальное прикрепление — прилегающие поверхности всех плюсневых костей. Дистальное прикрепление — первая — проксимальная фаланга второго пальца стопы. Со второй по четвертую — латеральные поверхности проксимальных фаланг второго-четвертого пальцев стопы. Действие — разгибание и отведение второго-четвертого пальцев стопы в ПФС.

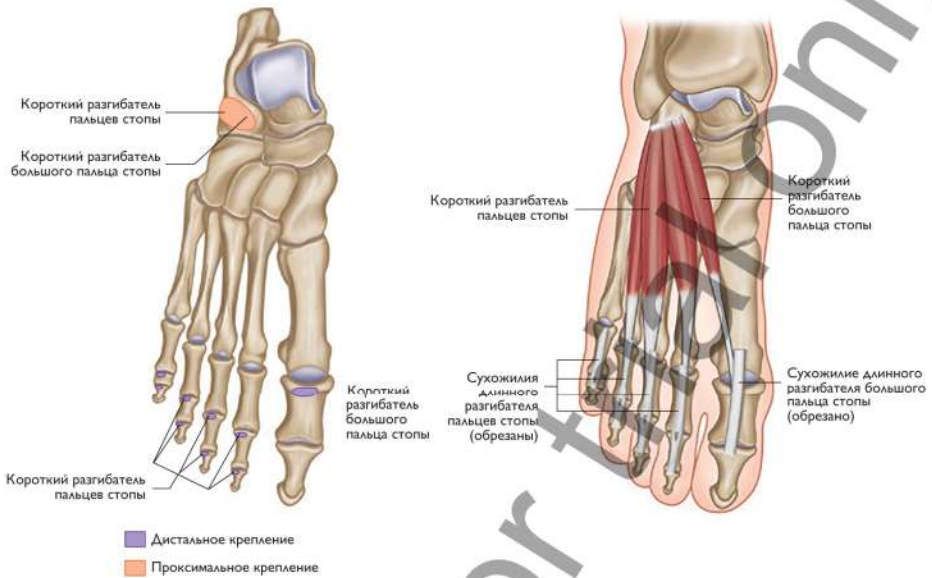


Рисунок 7.16. Тыльные разгибатели

Короткий разгибатель большого пальца стопы: проксимальное прикрепление — тыльная поверхность пяточной кости. Дистальное прикрепление — проксимальная фаланга первого пальца стопы. Действие — разгибание первого пальца стопы в ПФС.

Короткий разгибатель пальцев стопы: проксимальное прикрепление — тыльная поверхность пяточной кости. Дистальное прикрепление — проксимальная фаланга второго-четвертого пальцев стопы. Действие — разгибание первого пальца стопы в ПФС.

Были поставлены под сомнение сложившиеся ранее представления об обеспечиваемой стопой опоре и действии «механизма лебедки» для супинации, и было подчеркнуто значение этих небольших мышц. Большинство внутренних мышц ориентированы спереди назад и обеспечивают контроль нашей естественной походки, что можно легко наблюдать по укреплению подошвенной фасции вдоль того же вектора, в отличие от других приматов. Из-за естественной формы стопы многие мышечные массивы имеют треугольную, дельтовидную форму, что имеет как функциональное, так и анатомическое значение.

Стопа часто рассматривается как тренажник с тремя типичными точками контакта

с полом — основанием пятой и первой плюсневых костей и пяткой. Мы можем рассматривать ее мускулатуру либо как веер, расходящийся к плюсневым костям от пяточной кости, либо наоборот. Когда пятка поднимается во время движения, а плюсневые кости закреплены на земле, медиальные и латеральные мышцы тянутся назад и фокусируются внутрь к пятке. Данная точка зрения особенно актуальна при рассмотрении требований к стабильности, возникающих при продвижении к фазе схода с пальцев.

Мы исследовали естественную механику костей, которая обеспечивает некоторую степень геометрического замыкания стопы во время супинации. В предыдущей главе мы уже видели,



как внешние мышцы могут помочь с силовым замыканием, однако они начинают снижать свою активность к моменту последних двух перекатов стопы, во время которых именно внутренние мышцы берут на себя функцию обеспечения внутренней устойчивости стопы. Они образуют то, что МакКеон и его коллеги называют «ядром стопы». К сожалению, это ядро было подорвано

современной жизнью — либо недостаточным его использованием, либо ношением обуви.

В следующих нескольких главах мы разберем некоторые варианты оценки стопы, помогающие получить лучшее представление о работе стопы, а также рассмотрим некоторые идеи упражнений и мобильности, после чего закончим изучением роли обуви.

ФУНКЦИЯ И ОЦЕНКА СТОПЫ

(в соавторстве с Марком Парфитт-Джонсом)

■ ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие годы я обнаружил, что люди подходят к главам книг и семинарам, посвященным оценке, с разными эмоциями. Эти эмоции варьируются от воодушевления тем, что вот-вот будут раскрыты все проблемы, до некоторого трепета, потому что оценки иногда сложны и трудны для интерпретации. Цель данной главы — удовлетворить тех, кто находится на обоих концах этого спектра, с оговоркой, что описание полной ортопедической оценки выходит за рамки данной книги и, вполне вероятно, даже выходит за рамки практики большинства ее читателей.

Ключевым моментом в применении любой оценки является понимание того, почему вы ее используете. До сих пор данный текст был направлен на то, чтобы вооружить вас пониманием функциональной роли каждой ткани. Переходя от одной главы к другой, мы то погружались во все более и более мелкие детали, то возвращались к более широкой картине; теперь мы можем собрать все это воедино посредством обзора взаимодействий между тканями и их функций. Прочная основа

в понимании стопы позволит вам уверенно применять как оценки, так и упражнения.

Описанные в данной главе оценки подкрепляют ту информацию, которую вы уже читали ранее. Каждый тест отбирался по принципу его полезности для построения картины того, что происходит или не происходит со стопой клиента. Полученная на его основе информация поможет вам далее выбрать наиболее подходящие упражнения и растяжки из главы 9. Эти оценки включены сюда, чтобы помочь вам глубже понять, что же именно происходит внутри стопы и почему. Данная глава не является просто сухим перечнем всех возможных тестов связок и суставов стопы.

Социальные сети стимулируют тенденцию к увеличению сложности упражнений и проводимых оценок. Хотя многие из них могут быть действительно полезными, существует риск попасть в опасную профессиональную ловушку чрезмерного усложнения в сочетании с недостаточной информативностью. Потратив время на изучение этой главы, вы сможете интегрировать прочитанную информацию и поместить ее в контекст. В начале книги я пообещал, что поспособствую улучшению вашего понимания стопы, а не что предоставлю контрольный

список всех анатомических ориентиров и всех возможных тестов для запоминания наизусть, — их можно найти во многих других источниках. Ниже мы разберем ответы на вопросы «почему», «что» и «как», основываясь на истории эволюции, а также поговорим о функциональных ролях и возможностях стопы, обеспечиваемых костями и мягкими тканями.

Приведенные оценки и последующие упражнения нацелены на проверку и на поддержку основных функций стопы. Полная ортопедическая оценка важна лишь для тех, кто обладает полным набором навыков работы с ней и лечения, — эти сложные, высококласные навыки следует передавать из рук в руки и предпочтительно в формате очной встречи. Развитие компетенций в выполнении приведенных ниже тестов и работа с использованием описанных далее упражнений принесет пользу большинству стоп, в то же время позволяя практикующему оставаться в рамках своей практики.

В основе приведенных ниже оценок лежит вопрос «способна ли данная ткань делать то, что она должна делать»? Поэтому начнем с повторения того, что должна делать стопа: она должна быть в состоянии выполнять амортизацию и управлять распределением силы; она должна быть мобильной и адаптивной; и она должна иметь возможность снова собраться, чтобы обеспечить жесткую платформу для продвижения вперед.

Как указывает Либерман (глава 2), большинство дискуссий о стопе вращается вокруг ходьбы, но человеческая стопа должна выполнять гораздо больше задач, чем просто шагать вперед. Наши стопы должны помогать нам не только ходить, но также и бегать, прыгать, приземляться, бросать, драться, приседать, подниматься, стоять, тянуть и толкать, поворачиваться, крутиться и танцевать. Каждое из этих действий, а также многие другие, оказали определенное эволюционное давление на адаптивность стопы, в результате чего она приобрела ту самую форму, которую мы видим сегодня. Вполне вероятно, что именно стремление к эффективной походке стало главной движущей силой формирования стопы, но если бы все ограничивалось исключительно этим, наш вид не был бы таким успешным, каким он является.

Большинство функций стопы можно разделить на четыре категории.

1. Амортизация.
2. Диапазон движения.
3. Формирование выровненного жесткого рычага.
4. Продвижение и выходная сила.

■ АМОРТИЗАЦИЯ

Способность стопы поглощать удары обеспечивается двумя основными источниками: пяткой и прочной пяточной костью, частично защищенной толстой жировой подушкой; и способностью стопы к пронации, в ходе которой происходит размыкание ее многочисленных суставов для распределения усилий в мягких тканях. Пронация и распределение сил влияют на многие из динамик, которые мы видели в главе 5, — деформация тканей помогает увеличить выходную мышечную силу и накопить упругую энергию в коллагеновых тканях.

Амортизацию также можно рассматривать как распределение силы. В здоровой стопе ни одна ткань или область ткани не должна принимать на себя всю ударную нагрузку. Это достигается за счет костной организации, благодаря которой стопа может разомкнуться и выполнить пронацию. Независимо от того, происходит ли при ходьбе касание земли пяткой или же приземление происходит на какую-либо часть средней или передней части стопы после прыжка или разбега, естественная реакция действующих через кости сил приводит стопу в пронацию. Взаимодействие между костной структурой, силой тяжести и силами реакции опоры (глава 4) обеспечивает задействование мягких тканей для контроля удара.

В твердой, неподвижной стопе супинированного типа все ударные нагрузки приходится на кости, что не только вызывает дискомфорт в костях, но и уменьшает проприоцептивную информацию для остального тела. При правильной работе стопы в распределение силы более широко вовлекаются мягкие ткани, а воспринимаемые любыми мягкими тканями силы

также стимулируют механорецепторы в этой области. Таким образом, сила — это информация, и стопа — наш главный передатчик этой информации вверх к остальной части нашего тела с целью общей проприоцепции и контроля.

Проприоцептивная информация поступает к нам от богатой механорецепторами подошвы стопы, а также от сенсоров в мягких тканях стопы, голени и бедра. Большая часть этой информации идет вверх к нашей центральной нервной системе, но некоторые поступающие от механорецепторов стимулы обрабатываются локально.

Такая локальная обработка обеспечивает быструю корректировку и точную настройку уровней жесткости тканей (Sawicki и др., 2009). Скорость передачи информации через спинальные рефлексы слишком мала для той степени настройки, которая требуется стопе и голеностопному суставу, чтобы ориентироваться в постоянно меняющейся силовой среде. Таким образом, обеспечение четких путей для распределения силы повышает наш тонус и эффективность. Ограничения суставов и тканей, а также среда, в которую мы помещаем наши стопы, могут вызывать блокировку распределения силы или направлять ее в другие ткани.

Одной из составляющих любой оценки должна быть обувь, так как она может способствовать функции стопы или же ограничивать ее — в зависимости от типа обуви или способностей стопы. Мы рассмотрим обувь подробнее в главе 10, но если вы понимаете основы механики стопы, то даже беглый взгляд на обувь клиента может дать некоторую информацию о том, что может и чего не может делать его стопа. Осмотр обуви клиента и просьба к клиентам подвигаться как босиком, так и в обуви могут стать частью тщательной оценки, и нередко именно обувь может дать подсказку относительно проблемы, которая не очевидна при оценке босой стопы.

Несмотря на то что обувь любого типа обычно рекламируют как обеспечивающую комфорт и амортизацию, она может препятствовать естественной амортизационной способности стопы. Это не значит, что обувь

плохая, — она выполняет множество функций и может быть очень полезной для проблемной стопы. Несмотря на то, в чем иногда пытаются нас убедить сообщения в социальных сетях, лишь немногие приспособления являются либо универсально положительными, либо универсально отрицательными, и это будет в значительной степени зависеть от контекста. Любое приспособление, будь то обувь или ортопедическая стелька, может изменить передачу усилия, что может быть как хорошо, так и плохо. Наша задача — понять, что это за эффекты и почему они происходят.

■ ДИАПАЗОН ДВИЖЕНИЯ

По моему опыту, многие терапевты борются с несоответствием между тем, что они видят, когда клиент движется в реальном мире, и применением определенного диапазона тестов движения. Я считаю полезным различать длинные и короткие цепи движения. Наши обычные повседневные движения представляют собой длинные цепочки сложных действий, требующих участия многих суставов и тканей. Но важным фактором в этой цепочке является то, что каждый сустав и ткань должны вносить соответствующий вклад. Если я не могу исследовать конкретную область, то для меня почти невозможно узнать, где именно может крыться проблема в длинной цепи или что ее вызывает.

Во всех длинных цепях движения требуется вклад от каждого сустава, расположенного между фиксированной точкой тела и целью совершаемого движения: вы пытаетесь куда-то дотянуться рукой? Одна стопа пытается что-то пнуть? Вы поворачиваетесь, чтобы посмотреть через плечо? Если хотя бы одна стопа находится на земле, когда вы выполняете какое-либо из этих движений, то от тканей этой стопы потребуются внести некоторый вклад в общий диапазон.

Типичное упражнение, которое я использую на моих семинарах, заключается в том, чтобы встать в нейтральное положение босиком и повернуться вправо настолько, насколько вам удобно, точно так же как мы делали это в предыдущих главах. На этот раз обратите

внимание на то, как далеко вы повернетесь и как это подействует на ваши стопы. Если вы поворачиваетесь направо, ваша левая стопа должна выполнить пронацию, а правая — супинацию. Если этого не происходит, убедитесь, что ваш таз поворачивается вместе с вами, и, если вы это сделали, вы сможете отметить кое-что интересное в следующих оценках! Теперь повторите это упражнение, на этот раз не позволяя левой стопе уходить в пронацию (при условии, что она может это сделать).

Вы повернулись так же далеко?

Можете попытаться выполнить движение в том же диапазоне, что и в первый раз?

Каковы ваши ощущения? Ощущали ли вы какую-либо конкретную область, какое-либо напряжение или какой-либо дискомфорт?

В первом упражнении ваши стопы вносили свой вклад в общий диапазон вашего движения, и, если вы захотите повторить его, вы, возможно, почувствуете механическую цепь, проходящую через все остальное тело.

На самом деле почти каждый сустав от ваших стоп до головы должен внести свой вклад в это движение. Когда мы убрали один (заведомо сложный и многосуставной) диапазон движений — пронацию левой стопы, — это уменьшило и общий диапазон вашего движения. Однако мы можем компенсировать эту потерю, попросив внести чуть больший вклад другие области — и скорее всего, это будут те самые области, которые выдавали какие-либо жалобы.

При рассмотрении движения полезно разбить его на диапазон перемещения и диапазон движения. Каждая из наших повседневных активностей, будь то ходьба, уборка, приготовление пищи или спорт, требует длинной цепочки движений. Мы действуем с целью перенести наши руки, нос, рот или ноги из какого-то одного места в другое место. Часто мы не обращаем внимания, как именно мы с этим справляемся, это просто происходит само собой, но для успешности диапазона перемещения требуется вклад от серии отдельных диапазонов движения.

Существует тенденция проверять диапазон движений суставов только в тех областях,

на которые есть жалобы и которые, возможно, имеют некоторую патологию. Но, как мы только что видели, жаловались не те области, которые напрягались в вашем теле во время упражнения, когда мы блокировали пронацию стопы, а области, которые пытались сделать немного больше. Важно понимать, что взаимосвязь между каждым движением, связанным с определенным действием, и положением тела относительно земли имеет значение (оказывает влияние) на диапазон движений в стопах.

Каждый из многочисленных суставов в стопе обладает способностью к движению, что позволяет им не только способствовать амортизации и распределению силы, но и вносить свой вклад в общий диапазон движений стопы.

Наш длинный шаг развился в результате ряда адаптаций, особенно в области пятки, пальцев ног, позвоночника и таза. Каждая из этих областей зависит от диапазона движений других областей во время ходьбы. Если уменьшается разгибание пальцев ног, это либо укорачивает шаг, либо заставляет стопу уходить в ротацию, чтобы компенсировать недостаток диапазона в сагиттальной плоскости. Потеря разгибания пальцев затем изменяет объем и угол сил, передающихся в колено и бедро, с последствиями для эффективности движения.

Диапазоны движений большого пальца стопы, таранного, коленного и тазобедренного суставов взаимосвязаны, и дефицит одного из них будет иметь эффект домино в других. Уменьшение диапазона уменьшит величину деформации тканей, получаемой за счет инерции, и приведет к увеличению нагрузки на мышцы (Sawicki и др., 2009; Whittington и др., 2008; Silder и др., 2007). Вы можете почувствовать это сами, если немного пройдитесь, преднамеренно ограничивая разгибание пальцев ног или тыльное сгибание голеностопного сустава и ощущая возникающие компенсации. Наиболее вероятной компенсацией в этом упражнении является увеличение активности мышц бедра и таза.

Взаимодействие между нашими бедрами и стопами происходит в обоих направлениях, и ограничения в области тазобедренного сустава могут повлиять на механику стопы. Например, ограниченное разгибание тазобедренного

сустава повлияет на величину тыльного сгибания голеностопного сустава и разгибания пальцев стопы во время ходьбы.

Оценка боли или повышение эффективности?

Важно не попасть в ловушку биомеханического детерминизма — навязчивую идею о том, что если у клиента механический дефицит, он обречен на боль и дисфункцию. Как мы видели в главах 3 и 5, наши ткани адаптируются к повторяющимся стрессам. Будь то закон Вольфа (кость) или эквивалентная концепция мягких тканей (закон Дэвиса), всегда возможно, чтобы ткань клиента идеально адаптировалась к его собственному уникальному выравниванию.

Вопросы, которыми мы задаемся при проведении оценки, должны быть сосредоточены на том, может ли какой-либо дискомфорт клиента иметь биомеханическую составляющую и есть ли области, которые кажутся менее эффективными, чем должны были бы быть. Сосредоточив нашу энергию на повышении эффективности, мы остаемся в пределах нашего соответствующего объема практики с важными вторичными преимуществами поддержки психологического и эмоционального здоровья за счет облегчения движений.

■ ЖЕСТКИЙ РЫЧАГ

Как мы видели в предыдущих двух главах, один из механизмов создания жесткого рычага зависит от разгибания пальцев стопы. Неспособность соответствующим образом разогнуть пальцы ноги снизит общую жесткость внутренних и внешних тканей и, следовательно, также уменьшит жесткость внутри стопы.

В главе 3 мы видели, как бедренную кость укрепляли окружающие ее мышцы, тем самым формируя жесткую кость, поддерживающую

движения между тазобедренным и коленным суставами. Если бы кость изгибалась при воздействии больших сил, она была бы менее стабильной. С другой стороны, если бы бедренная кость была фиксированной и жесткой, она была бы хрупкой и легко ломалась при воздействии изгибающих сил. Тело создало оптимальное решение для создания гибкой кости с некоторым запасом прочности, которая при этом может стать жесткой при увеличении сил за счет поддерживающих ее мышц, которые реагируют на эти силы и уравнивают их.

Представьте, с какими трудностями мы столкнулись бы, если бы бедренная кость представляла собой набор маленьких костей, а не одну длинную кость — было бы невероятно сложно их стабилизировать. Конечно же, мы бы тем самым увеличили наши возможности движения: большее количество суставов добавило бы диапазоны и направления движения. Однако новые возможности мобильности стоили бы нашей стабильности и эффективности. Каким-то образом это привело к эволюции наших стоп, которые сбалансировали эти противоречивые требования и нашли решение, которое обеспечивает высокую степень адаптивности к движению и в то же время жесткость, необходимую для продвигающего нас вперед схода с пальцев.

Исключительность человека

Хотя восхвалять адаптивное величие человеческой стопы весьма заманчиво, она не более особенна, чем стопа любого другого животного. Можете ли вы себе представить, как вы пытаетесь сбить с ног зебру передними и задними «когтями», как скачете вдоль почти вертикальных скал или изящно прыгаете с ветки на ветку? Стопа каждого млекопитающего адаптировалась к той экологии, в которой

* Запас прочности в случае бедренной кости означает, что она способна сгибаться немного больше, чем обычно требуется при повседневных нагрузках. Часть акта балансирования, которое использует тело для поддержания себя в порядке, состоит в том, чтобы производить материалы, которые, с одной стороны, соответствуют цели, и с другой — все же имеют некий запас.

оно обитает. Хищнику нужна большая подвижная стопа, вооруженная когтями, гарцующему козлу нужны длинные, тонкие и точные копыта, а прыгающему лемуру нужны вытянутые пальцы и противопоставленный большой палец. Лишь наша склонность восхвалять исключительность человека поддерживает иллюзию, что наша подвижная или жесткая стопа более развита, чем у остальных животных.

Есть три механизма, которые помогают сближать кости стопы. Во-первых, это геометрическое замыкание костей, о котором мы говорили в главе 4. Перекрывающиеся лодыжки большеберцовой и малоберцовой костей создают механизм сцепления в голеностопном суставе, который позволяет передавать их ротацию в таранную кость. От таранной кости латеральная ротация проходит вперед через кости стопы, приводя их к смыканию и формированию полукупола. Одним из ключевых аспектов этого «геометрического замыкания» является латеральная ротация опорной ноги, которая приводится в движение переносом вперед другой ноги. Если вы пытаетесь решить биомеханическую проблему в одной стопе, всегда стоит обратить внимание на то, что происходит со стопой, бедром и коленом другой ноги, чтобы убедиться, что они могут выполнить достаточный мах вперед, чтобы запустить латеральную ротацию в другой конечности.

Второй механизм, который сближает кости стопы, — это силовое замыкание, создаваемое наружными мягкими тканями. Тильное сгибание голеностопного сустава опорной ноги во время ходьбы натягивает все подошвенные сгибатели. В главе 5 мы видели, как все сухожилия, пересекающие заднюю часть таранного сустава, помогают в геометрическом замыкании стопы, сближая кости в более плотное положение.

Супинации способствует смещение опоры сухожилия, пересекающего медиальную ось, к подтаранной оси, при этом особое значение имеют камбаловидная мышца, задняя большеберцовая мышца и длинный сгибатель большого пальца стопы. Камбаловидная мышца

прикрепляется к медиальной пяточной кости, задняя большеберцовая мышца прикрепляется ко всем костям в средней части стопы, а длинный сгибатель большого пальца охватывает медиальный продольный свод и доходит до большого пальца стопы. Эти три мышцы создают опору для заднего, среднего и переднего отделов стопы, тем самым обеспечивая стабильность растущему числу суставов.

Третьим механизмом, поддерживающим супинацию, является система внутренних мышц. В главе 6 были рассмотрены эти короткие мышцы и то, как их разнообразные фасциальные взаимодействия обеспечивают преимущества за счет преднатяжения их коллагеновых тканей. Внутренние мышцы берут на себя ответственность за создание жесткого рычага на этапе, когда поднимается пятка и стопа движется к разгибанию пальцев стопы. Наряду с икроножной мышцей камбаловидная мышца натягивает подошвенную фасцию, поддерживая внутренние слои мышц (см. рис. 7.6). Внутренним мышцам дополнительно помогает исходное расширение стопы во время фазы опоры, поскольку расправление (раздвижение) костей и движение к разгибанию пальцев стопы вызывают преднатяжение покрывающих мышцы слоев подошвенной фасции. Несмотря на то что внутренние мышцы короткие и маленькие, их расположение и преднатяжение дает им достаточно преимуществ для стабилизации стопы во время фазы переката через пальцы стопы.

Почти независимо от того, с какой травмой или дискомфортом пришел клиент, все эти три механизма заслуживают изучения, особенно в случаях постепенного или необъяснимого появления симптомов.

1. Обладают ли кости достаточной степенью ротации?
2. Достаточно ли тильного сгибания, чтобы создать натяжение подошвенных сгибателей?
3. Достаточно ли преднатяжение достигает внутренних мышц, и достаточно ли они сильные?

При идеальном положении схода с пальцев упругая энергия поступает в каждую из упомянутых выше тканей, после чего подошвенные сгибатели и сгибатели пальцев стопы имеют

некоторую долю свободной энергии, которая будет способствовать переносу ноги после того, как она оторвется от земли. У человека этап схождения с пальцев создает эффект катапульты, при котором упругая энергия, накопленная во время движения, затем высвобождается, способствуя следующему переносу ноги вперед. Однако для того чтобы нагрузить катапульту, должно произойти взаимодействие ряда взаимозависимых суставов, поскольку коленный и тазобедренный суставы влияют на движение стопы.

Для оптимальной нагрузки и высвобождения упругой энергии в каждом суставе требуется правильное выравнивание всех суставов, а также адекватный диапазон движений в каждом из них. В главе 7 мы видели, что наша подошвенная фасция предпочитает сагитальную плоскость по сравнению с таковой у наших двоюродных братьев-приматов, у которых есть некоторые отличия в передаче медиально-латеральной силы. Люди перемещаются по прямой вперед до разгибания первого и второго ПФС, и это конечное положение для схождения с пальцев стопы должно быть выровнено с коленным суставом и передней частью бедра.

То, как влияет на бедро повернутая в сторону стопа при схождении с пальцев, можно легко понять с помощью быстрого эксперимента. Когда вы выходите в выпад с параллельными стопами, это должно вызвать у вас ощущение растяжения либо в задней части голени, либо в передней части заднего бедра. Принятие того же положения с вывернутой наружу задней стопы уменьшит чувствительность голени и сместит растяжение бедра к медиальной ткани.

Ткань передней части бедра способна лучше справляться с высокой нагрузкой, нежели ткань внутренней стороны бедра. Но то, как бедро воспринимает нагрузку, определяется выравниванием стопы и стабильным основанием первой и второй плюсневых костей. Хотя вторая плюсневая кость обычно длиннее первой, есть две сесамовидные кости, лежащие ниже первой плюсневой кости, которые у большинства из нас уравнивают эту разницу в длине. Однако иногда могут возникать структурные или функциональные различия, которые создают проблемы с нашей способностью двигаться по траектории сустава большого пальца ноги.

Эти различия могут быть вызваны вариациями в структурной длине плюсневых костей, функциональными различиями из-за повышенной супинации или пронации стопы или недостаточной стабильностью первого луча.

■ ПРОДВИЖЕНИЕ И ВЫХОДНАЯ СИЛА

Наша история эволюции оставила нам рудименты противопоставленного хватательного большого пальца ноги, что означает, что наш первый луч менее стабилен, чем второй и третий. Первому лучу требуется дополнительное силовое замыкание со стороны окружающих его мышц, поскольку его суставы и связки не обеспечивают такого же уровня суставной конгруэнтности и поддержки, как во втором луче. Следует отметить, что одним из основных стабилизаторов основания первой плюсневой кости является длинная малоберцовая мышца, которая также уводит кость в подошвенное сгибание, чтобы обеспечить больший диапазон движения, когда ПФС переходит в разгибание. Однако длинная малоберцовая мышца пересекает заднюю часть таранного сустава и, следовательно, требует адекватного тыльного сгибания голеностопного сустава во время ходьбы, которое бы создало натяжение ее волокон, — таким образом, мы начинаем видеть взаимозависимость между диапазоном движения, производством силы и стабилизацией.

Стопа должна не только стабилизироваться при подъеме на головки плюсневых костей, но и выполнять все другие виды активностей, требующие от нее создания, замедления и поглощения больших усилий, — прыжки, приземления и бег создают воздействие силы, во много раз превосходящей ту, которая приходится на стопу через вес нашего тела. В большинстве этих движений голеностопный сустав переходит в тыльное сгибание и задействует внешние мышцы, но многие другие движения, требующие силы и стабильности стопы, могут выполняться из более нейтрального положения голеностопного сустава. В этом случае суставы и местные мышцы должны активизироваться, чтобы обеспечить на локальном уровне достаточную подвижность, стабильность

и силу, поскольку сильные подошвенные сгибатели находятся не в том положении, чтобы в значительной степени с этим помочь.

Наиболее распространенной стратегией движения для увеличения силы является использование контрдвижения. При первоначальном движении в противоположном направлении соответствующая ткань преднапрягается, накапливая упругую энергию для подготовки к выработке энергии во время обратного движения. Например, чтобы увеличить силу подошвенных сгибателей, мы используем тыльное сгибание; чтобы увеличить силу внутренних мышц стопы, мы используем расширение стопы и разгибание пальцев стопы.

Расправление стопы и разгибание суставов обеспечивает жесткость поддерживающих фасциальных тканей и увеличивает внутрикомпарментное давление в стопе. Жесткость ткани, как правило, является нейтральной характеристикой, которая при правильной настройке с помощью диапазона движений и мышечного тонуса может использоваться для оптимизации силы. Однако существует еще одна взаимосвязь между амплитудой движения сустава, мышечной силой и жесткостью тканей: сустав должен иметь достаточную амплитуду, чтобы нагружать ткани; мышцы должны быть достаточно сильными, чтобы контролировать контрдвижение и создавать его коррекцию; и фасциальные ткани должны быть достаточно эластичными, чтобы выдерживать задействованные силы. Дефицит одного из этих составляющих либо тормозит всю систему, либо создает дополнительную нагрузку на одну из областей.

■ РОВНО СТОЛЬКО, СКОЛЬКО НЕОБХОДИМО, И НЕ СЛИШКОМ МНОГО

Добиться правильного баланса не так-то просто. Каждая из четырех динамик (амортизация, диапазон движения, создание жесткого рычага и производство силы) требуют сотрудничества и координации, а также силы и мобильности. Все эти качества можно оценить и улучшить. Любая тренировочная программа должна включать в себя сочетание этих задач и, в отличие от того, что вы можете увидеть

в социальных сетях, нет ни одного магического упражнения, равно как и нет «мусорных» упражнений, которые следовало бы вообще вычеркнуть из репертуара, так же как не существует какого-либо идеального универсального упражнения.

Однако бывает так, что какие-то упражнения неправильно назначаются, неправильно выполняются или же человек слишком усердствует при выполнении. Лекарством от всех этих «болезней» является понимание причины и намерения каждого движения. Что то или иное движение требует от системы? А в чем нуждается система клиента? Ответьте на эти два вопроса, и вы на пути к созданию идеально подобранной программы.

Ключом к нахождению этого совпадения являются хорошие навыки оценки и наблюдения.

Прочитав этот текст, вы будете гораздо лучше осведомлены о передаче силы, анатомических особенностях и обосновании тех оценок и упражнений, которые здесь представлены.

Вся эта предыдущая информация и отвечает нам на вопрос «почему» — почему мы делаем эти движения? Почему эта оценка важна? Почему стопа смотрит в ту сторону?

То, что вы прочитаете далее, касается вопроса «как».

■ ОЦЕНКА

Амортизация

Для амортизации необходима пронация стопы, представляющая собой сложное действие многих суставов и мягких тканей. С точки зрения походки главный вопрос заключается в том, может ли подтаранный сустав выполнить эверсию или нет; с точки зрения бега* и приземления для амортизации также необходимо тыльное

* Форма бега является спорной, переменчивой и, судя по онлайн-дебатам, для некоторых явно эмоциональной темой. Лично я предпочитаю, — и здесь приведены именно мои личные предпочтения, так что, пожалуйста, не издевайтесь меня за них на виселицу, — чтобы стопа приземлялась под тазобедренным суставом с относительно полным контактом с поверхностью, чтобы голеностопный сустав выполнил тыльное сгибание в ответ на силы торможения в тканях голени. Для получения дополнительной информации я рекомендую вам прочитать Benzie, 2020 и Michaud, 2021.

стибание. Существует множество способов оценить способность стопы к пронации, и сначала мы определим некоторые визуальные подсказки, прежде чем проверять их посредством пассивных и активных движений.

Визуальная оценка

После подробной консультации естественно посмотреть на стопы клиента. В какой-то литературе предлагается понаблюдать за походкой до оценки в статике, а в какой-то — после. Я думаю, что лучше сохранять определенную гибкость подхода, нежели следовать какому-то фиксированному правилу. Оценка походки сложна и может быть столь же запутанной, сколь и полезной, поэтому можно упростить себе задачу путем создания более контролируемой среды посредством удаления переменных. И наоборот, иногда постуральные оценки или ортопедические тесты не выявляют какой-то интересной связи с историей клиентов, и тогда именно походка может выявить скрытые особенности их двигательных моделей.

Целью любой оценки является разработка четкого плана вмешательства, будь то программа упражнений или мануальная терапия. Крайне важно не торопиться и найти историю, которая соответствует потребностям клиента. Методично проработайте каждую область: лучше потратить больше времени на тщательную оценку и выводы, чем торопиться с составлением программы, не имея четкого плана.

При этом нет какого-то определенного порядка ни для одной из этих идей оценки. Порядок, в котором они представлены здесь, достаточно удобен, особенно с точки зрения первого знакомства с ними. Но перечисление оценок ради самого формата книги в определенном порядке и с «распутыванием» обозначенных тем, — это не то же самое, что находиться в реальной ситуации встречи с клиентом.

Во время любого сеанса, будь это этап оценки или нет, я всегда смотрю, на что способны суставы и ткани и какова отправная точка. Если я вижу клиента с высоким сводом стопы, у меня в действительности мало

информации о функциональности этой стопы. Все, что я знаю, это то, что стопа начинает свое движение из относительно супинированного положения. У нее может быть большой диапазон для пронации, у нее может быть некоторое движение пронации или же стопа может «застраять» и быть жесткой.

С другой стороны, стопа с низкой аркой стопы может по-прежнему иметь возможность как пронации и супинации, так и только пронации или только супинации. Визуальную оценку не стоит воспринимать как диагноз, это лишь начало выстраивания общего представления о стопе. Однако это может стать хорошей отправной точкой для начала работы терапевта, поскольку, в отличие от оценки походки, здесь задействовано несколько запутанных переменных.

Наш первый вопрос: где находится стопа по шкале пронации-супинации? Существует ряд визуальных подсказок, на которые следует обращать внимание, и основными индикаторами являются (рис. 8.1):

- **выравнивание пяточной кости** — она располагается вертикально, наклонена медиально или наклонена латерально? Мы оцениваем пяточную кость, потому что ее опора таранной кости в значительной степени отвечает за сохранение положения таранной кости, которое часто является ключевым для соотношения пронации/супинации в стопе. Это наблюдение иногда называют наблюдением пяточной кости в расслабленном положении, а отклонение более 4° от вертикали иногда считают показателем стопы пронируемого типа;
- **форма ахиллова сухожилия** — искривлено ли оно? Часто, когда пяточная кость наклонена медиально, сухожилие должно скорректироваться до выравнивания с большеберцовой костью;
- **форма передней части стопы при взгляде сзади** — не «слишком ли много видно пальцев»? Поскольку пронация вызывает ротацию суставов стопы, при взгляде сзади в такой стопе будет видно больше пальцев по сравнению с более нейтральной стопой;



Рисунок 8.1. а) Линия задней поверхности пяточной кости должна быть относительно вертикальной. б) Медиальный наклон может свидетельствовать о стопе пронированного типа (как показано выше). Латеральный наклон (не показан) может указывать на стопу супинированного типа. Как мы видим на рисунке (б), если пяточная кость наклонена в ту или иную сторону, ахиллово сухожилие часто изгибается, чтобы выровняться с камбаловидной и икроножной мышцами. Вид сзади также позволяет терапевту заметить, какая часть передней части стопы видна сзади. В истинно пронированной стопе из-за вызванной пронацией ротации будет видно больше пальцев стопы (как видно при сравнении а и б). В стопе супинированного типа латеральная часть будет видна в меньшей степени. Вид с медиальной стороны может дать некоторое представление о положении ладьевидной кости, которое также можно определить с помощью описанных ниже тестов на опущение и смещение.

- **высота расположения бугристости ладьевидной кости от пола** (мы оценим это ниже).

В поисках нейтрального положения подтаранного сустава

Может быть полезно оценить, где находится таранная кость по отношению к ее нейтральному суставному положению. Перечисленные выше визуальные индикаторы могут дать вам некоторую подсказку, но для других тестов может быть полезно определить, где находится таранная кость, и наблюдать, что происходит со стопой, когда кость двигается к центру ее суставов с большеберцовой и малоберцовой костями.

Для того, чтобы это сделать, найдите головку таранной кости, пальпируя две впадины по обе стороны от нее (см. рис. 8.2), затем вращайте ногу (на фиксированной стопе) до тех пор, пока не выровняется расстояние между таранной костью и двумя костями ноги. Если для того, чтобы найти нейтральное положение, ногу пришлось поворачивать латерально, это свидетельствует о стопе пронированного типа. Если же, чтобы найти нейтральное положение, ногу нужно было повернуть медиально, то стопа, вероятно, супинирована.

Падение ладьевидной кости

Визуальная оценка стопы дает лишь некоторые подсказки относительно того, где проводить дальнейшее исследование, и ее не следует рассматривать как демонстрацию абсолютно любых функциональных возможностей. Для того чтобы измерить, насколько стопа адаптируется во время принятия веса, можно измерить расстояние, на которое опускается ладьевидная кость в ответ на весовую нагрузку.

Бугристость ладьевидной кости является полезным ориентиром из-за его видимости и расположения на высоте медиальной продольной арки стопы. Когда стопа уходит в пронацию, опора таранной кости наклоняется, и таранная кость следует за ней, в результате чего сустав между таранной и ладьевидной костями открывается, пружинная связка напрягается и ладьевидная кость следует за таранной костью вниз. Следовательно, во время пронации должно происходить некоторое движение бугристости ладьевидной кости, и его можно легко измерить (рис. 8.3).

- Попросите вашего клиента сесть или перенести вес тела на другую ногу, расположив стопу и голеностопный сустав таким образом, чтобы подтаранный сустав оказался в нейтральном положении (как указано выше), пропальпируйте и отметьте бугристость и измерьте расстояние между ней и полом, чтобы получить базовые измерения.
- Попросите клиента встать или перенести вес на оцениваемую ногу и повторно измерьте



Рисунок 8.2 Нейтральное положение погтаранной кости а) Уведите стопу в положение полной пронации, чтобы найти складку латеральной впадины, при необходимости отметьте ее. б) Уведите стопу в положение полной супинации, чтобы найти медиальную впадину. в) Поместите большой и указательный пальцы в углубления и поворачивайте ногу до тех пор, пока углубления не станут равными с обеих сторон.

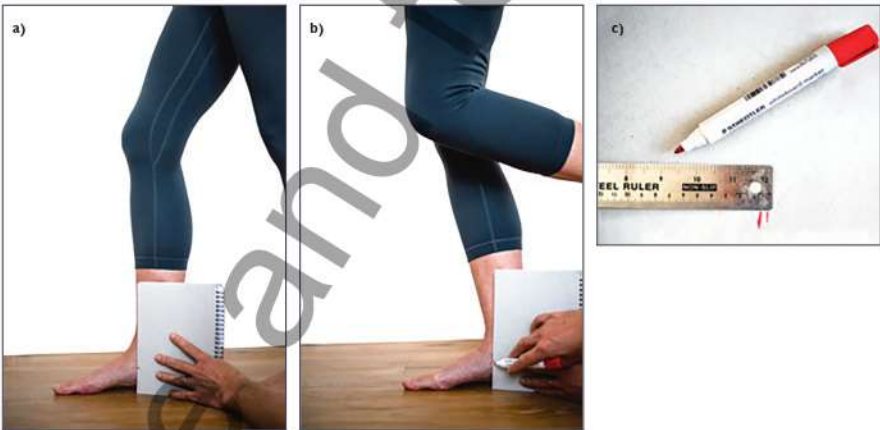


Рисунок 8.3. Тест на падение ладьевидной кости

а) Попросите клиента не нагружать стопу весом и поместите его стопу в положение нейтрал погтаранной кости, расположив лист картона под медиальной стороной. Поместите картон вдоль медиальной стороны и отметьте высоту бугристости ладьевидной кости. б) Попросите клиента перенести вес и повторите измерение, сделав отметку в новом положении ладьевидной кости. в) Уберите картон и измерьте расстояние между двумя метками.

расстояние между бугристостью ладьевидной кости и полом.

- Самый простой способ — использовать кусок картона, поскольку бумага обычно слишком тонкая и с помощью нее сложнее проконтролировать точность считывания.
- Повторно найдите бугристость для второго измерения, так как кость сместится под отмеченным участком кожи.

Можно ориентироваться на то, что стопа с ограничениями будет двигаться менее чем на 5 мм, «нормальная» — от 5 до 9 мм, а стопа с повышенной пронацией — более чем на 9 мм (тест на падение ладьевидной кости 2020). Эти измерения не являются абсолютными, и их необходимо рассматривать в контексте реального клиента. Следует учитывать массу тела, возраст, общую силу и здоровье мягких тканей. Опушение на 6 мм может вызвать проблемы у пожилого человека с хрупкими тканями, но с ним легко справится молодой человек с достаточной мышечной силой.

Как и в случае с большинством ортопедических тестов, опубликованные «приемлемые диапазоны» могут различаться, в результате чего возникает ряд споров относительно надежности этого теста. Я не рекомендую использовать опущение ладьевидной кости и смещение ладьевидной кости (ниже) в качестве сравнения между клиентами; вместо этого полезно определить программу тренировок для клиента и измерять его прогресс или происходящие изменения. Поскольку чувствительность тканей у всех разная, опущение в размере 6 мм будет незначительным для одного клиента и создаст дискомфорт для другого — это будет зависеть от их анамнеза.

Смещение ладьевидной кости

Полезным и быстрым дополнением к тесту на падение ладьевидной кости является измерение величины медиального «смещения» бугристости под действием весовой нагрузки (рис. 8.4).

Чтобы выполнить этот тест, начните с нейтрального положения подтаранного сустава



Рисунок 8.4. Смещение ладьевидной кости

а) Усадите клиента и поставьте его стопу таким образом, чтобы подтаранный сустав оказался в нейтральном положении. Расположите лист картона под медиальной стороной. Проведите прямую линию вниз от бугристости ладьевидной кости и отметьте место ее приземления на бумаге. б) Попросите клиента перенести вес и повторите измерение, сделав отметку в новом положении ладьевидной кости. в) Уберите картон и измерьте расстояние между двумя метками.

и с помощью картона измерьте, насколько бугристость ладьевидной кости смещается медиально под действием весовой нагрузки.

Полученные в рамках двух тестов измерения (падение ладьевидной кости и ее смещение) можно затем сравнить, и в идеале они должны быть относительно близкими друг к другу. Тест на падение измеряет вертикальное движение ладьевидной кости, тест на смещение измеряет ротационное движение кости, и между этими движениями в двух плоскостях должен быть баланс.

В этих тестах есть небольшие различия, и мнения относительно их эффективности разделились. Они полезны для предоставления некоторых рекомендаций и предложений по возможным упражнениям, поскольку могут указать на то, какие ткани могут воспринимать большую силу при амортизации. Хотя увеличенное движение ладьевидной кости деформирует пружинную связку, другие ткани будут задействованы в соответствии с преобладающим направлением движения ладьевидной кости.

Например, если больше показатель смещения (горизонтальная плоскость), чем измерение опущения (сагиттальная плоскость), можно рассмотреть дополнительные ротационные упражнения для укрепления замедлителей медиальной ротации костей. Если же больше показатель опущения, можно рассмотреть возможность укрепления как внутренних мышц, так и мышц, проходящих под опорой таранной кости и ладьевидной костью (длинного сгибателя большого пальца стопы и задней большеберцовой мышцы).

Данные, указывающие на повышенную тенденцию к пронации, могут свидетельствовать о наличии «приобретенного плоскостопия». Если это так, то следует задуматься о силе задней большеберцовой мышцы и связанных с ней подошвенных сгибателей, и тогда мы могли бы применить укрепляющие упражнения из главы 9. Уменьшенная пронация и движение ладьевидной кости, естественно, привели бы нас к рассмотрению упражнений на мобильность.

2. Диапазон движения

Существует три основных способа оценки диапазона движения сустава: активный,

пассивный и ассистированный. Эти термины относятся к стратегии, используемой для входа в позицию. Если клиент делает движение сам, — например, следуя какой-то инструкции, вроде «можете ли вы приподнять пальцы ног от пола?» — движение создается за счет работы его собственных мышц и считается «активным».

Если же движение за клиента выполняет терапевт, — например, когда терапевт использует свои собственные пальцы, чтобы поднять пальцы ног клиента в разгибание, — движение считается пассивным.

Если терапевт помогает клиенту выполнить движение, и обе стороны прилагают некоторое усилие, это считается ассистированным движением.

Каждый тип движения предоставляет разную информацию. Тест активного диапазона движения проверяет способность клиента создавать, контролировать и достигать определенного диапазона движения посредством активного сокращения соответствующих мышц. Неспособность достичь полной амплитуды во время активного движения может быть вызвана не ограничениями в суставе, а другими факторами, такими как мышечная слабость или сниженная способность контролировать движение. В этом случае может быть полезно проверить пассивное движение.

Использование пассивного теста движения сустава позволяет терапевту исключить многие переменные, связанные с силой и координацией клиента. Оценки активных движений проверяют силу мышц и их способность сокращаться, в то время как оценки пассивных движений проверяют возможный диапазон движения суставов и тканей.

Если пассивный тест показывает хороший диапазон движения, но при этом движение меньше, чем при активном тесте, рекомендуется использовать ассистированное движение, чтобы направить клиента в необходимый диапазон. Ассистированные движения информативны как для терапевта, так и для самого клиента, поскольку система клиента получает некоторую проприоцептивную обратную связь от терапевта, что может помочь клиенту реактивировать двигательный контроль в этой области.

Проверка диапазона движений в суставах дает больше информации, чем просто измерение угла, на который может двигаться сустав. Каждый сустав имеет свое уникальное расположение мягких и костных тканей, и это определяет, что произойдет, когда сустав достигнет своего естественного предела — своего последнего «блока». Ощущение, возникающее при ослаблении этого «блока», называется «конечным ощущением» сустава.

Конечное ощущение можно оценить во время проведения пассивного теста, когда терапевт побуждает ткани совершать последние несколько степеней движения. Каждый тип ткани, ограничивающий диапазон движения сустава, имеет характерное ощущение при пассивном задействовании во время оценки. Хотя классификации конечного ощущения могут различаться в зависимости от источника, существует пять его основных типов: костное, эластичное, тягучее, приближенное и холодное.

- **Костное конечное ощущение** возникает при соприкосновении двух или более костей в конце диапазона, и оно будет очень «четко выраженным», «твердым», «абсолютным». К действиям суставов, имеющим естественное костное конечное ощущение, относятся разгибание колена и локтя, а также эверсия подтаранного сустава.
- **Эластичное конечное ощущение** указывает на растяжение мышечно-сухожильных тканей в конце диапазона, и оно будет ощущаться как «пружинящее», «упругое», «эластичное». К диапазонам движений, имеющим естественные эластичные конечные ощущения, относятся разгибание запястья, горизонтальное отведение плечевого комплекса, тыльное сгибание голеностопного сустава и разгибание пальцев ног.
- **Тягучее конечное ощущение** возникает тогда, когда диапазон движения ограничивается пассивными мягкими тканями связок и суставных капсул. Примерами естественного конечного ощущения связок являются локтевая и лучевая девиация запястья и инверсия подтаранного сустава. Эти конечные ощущения может быть трудно отличить от костных конечных ощущений, поскольку

они имеют сходное с ними «четко выраженное» качество, однако можно выявить тонкие различия, если сравнить конечное ощущение разгибания колена (костное) с конечным ощущением инверсии подтаранного сустава (тягучее).

- **Конечное ощущение приближения** — это когда конечный диапазон не достигнут, потому что на пути мешают другие ткани. Это происходит при сгибании локтя и колена, так как бицепс руки и икра ноги мешают продолжению движения еще до того, как суставы пройдут весь возможный диапазон.
- **Холодное конечное ощущение** обычно является плохим признаком, так как это означает, что движение кости ничем не ограничивается. Обычно это происходит в случаях разрыва связок, особенно крестообразных связок колена, и является одним из диагностических показателей надрыва или разрыва внутренних поддерживающих структур сустава.

Поскольку каждый сустав имеет естественный нормальный ограничивающий фактор — мягкие ткани, кости, связки или сближение тканей, — любое отклонение от нормы указывает на какой-то тип происходящих в суставе изменений. Например, если сустав в норме должен иметь костное или тягучее конечное ощущение, но при пальпации ощущается как эластичный, вполне вероятно, что соответствующие ему мягкие ткани по какой-то причине стали гипертоническими. И наоборот, если должно быть эластичное конечное ощущение, но сустав ощущается так, словно кости сближаются с твердым, костным конечным ощущением, значит, произошла потеря целостности мягких тканей и, возможно, присутствуют костные изменения вокруг сустава.

Вполне вероятно, что для большинства читателей все, что находится за пределами нормального конечного ощущения мягких тканей, выходит за рамки практики, и тогда пациента следует направить на полное обследование. Аномальное костное, тягучее, холодное конечное ощущение или конечное ощущение приближения может указывать на изменения в суставах, разрыв мягких тканей, потерю целостности

сустава или наличие воспаления соответственно. В каждом из этих случаев требуется профессиональная помощь*.

При отсутствии боли, отека или каких-либо другихстораживающих признаков, таких как недавняя травма, эластичное конечное ощущение находится в рамках практики, и тогда можно использовать соответствующую мобилизацию и растяжение.

Тыльное сгибание голеностопного сустава

Движение большеберцовой кости над таранной костью является жизненно важной частью амортизации при приземлении после любого прыжка или подскока. Когда большеберцовая кость переходит в тыльное сгибание, она натягивает внешние мышцы и задействует очень сильную камбаловидную мышцу и ахиллово сухожилие. Хотя диапазон (примерно 10° при прямых коленях и 20° при согнутых) невелик, тыльное сгибание голеностопного сустава также играет важную роль в супинации, натягивая камбаловидную мышцу и глубокие мышцы заднего отдела, поднимая пятку и замыкая более широкую часть таранной кости между лодыжками для создания дополнительного контроля стопы.

По мере того как во время ходьбы большеберцовая и малоберцовая кости проходят над передней частью таранной кости (блоком/куполом), они также выполняют латеральную ротацию из-за переноса вперед противоположной ноги. Увеличивающаяся конгруэнтность между лодыжками и более широкой частью таранной кости в сочетании с натяжением тканей подошвенных сгибателей способствует геометрическому и силовому замыканию голеностопного сустава и стопы во время фазы переката переднего отдела стопы.

Тыльное сгибание в голеностопном суставе легко проверить, поместив клиента в положение выпада, в котором оцениваемая конечность



Рисунок 8.5. Тыльное сгибание голеностопного сустава

а) Положение выпада с опорой на стену. Клиент должен находиться на расстоянии примерно 0,5 м от стены. Клиент медленно сгибает переднее колено вперед, в то время как терапевт либо направляет стопу и голеностопный сустав, чтобы сохранить нейтральное положение подтаранного сустава, либо клиент получает сигнал направлять бугристость большеберцовой кости над второй плюсневой костью. Для измерения угла (около 10°) можно использовать гониометр, грубую визуальную проверку или приложение для оценки осанки. Обратите внимание, что задняя стопа должна стоять прямо, параллельно передней стопе, — легкий поворот наружу, как показано на рисунке, может свидетельствовать об ограничении подошвенного сгибания. б) Перестановка стоп в нейтральное положение позволяет провести дифференциальный тест по мере того, как колени сгибаются с) и продвигаются вперед над второй плюсневой костью. Сгибание в колене снижает нагрузку на икроножную мышцу и должно увеличить тыльное сгибание до прибл. 20° .

будет располагаться позади с прямым коленом (рис. 8.5). Нередко клиент при этом стоит перед стеной для дополнительной устойчивости и поддержки.

* Хорошим ресурсом для более подробного изучения этих тем является <https://www.massagetherapyreference.com/from-end-feet/>.

По мере сгибания переднего колена вперед оцениваемый (задний) голеностопный сустав должен в ответ выполнить тыльное сгибание на 10–15 градусов.

Выполнение этой оценки также дает информацию о разгибании колена и бедра, а также о стабильности задней части стопы. Колено клиента должно быть в состоянии выпрямиться, а его бедро также должно разогнуться на 10–15 градусов. Недостаточный диапазон движения в любом из этих суставов приведет к изменению нагрузки на ткани во время ходьбы и, как правило, к снижению эффективности движения*.

Пока клиент выполняет тест, терапевт может оценить способность стопы сохранять нейтральное положение подтаранного сустава. Когда тыльное сгибание ограничено, подтаранный сустав и поперечный сустав предплюсны часто задействуются для обеспечения некоторого движения в сагиттальной плоскости. Если задействован подтаранный сустав, стопа, скорее всего, пронируется из-за смещения подтаранного сустава. Тыльное сгибание по линии поперечного сустава предплюсны вызывает перелом поперечного сустава предплюсны. Любая из этих адаптаций создаст дополнительную нагрузку на пассивные ткани, пересекающие связанные суставы.

При прямом колене удлиняется икроножная мышца, и это также является частью теста. Если тест положительный (т. е. тыльное сгибание ограничено), мы не можем сказать наверняка, какой из подошвенных сгибателей может быть ограничивающим фактором, поскольку это может быть любая комбинация мышц из трех задних отделов. Повторяя тест с согнутым задним коленом, мы исключаем из теста двухсуставную икроножную мышцу.

Если теперь тест стал отрицательным (т. е. диапазон тыльного сгибания восстановлен), мы знаем, что нужно нацелиться на работу с растяжением икроножной мышцы. Если сгибание колена не влияет на результат теста, то маловероятно, что дело в икроножной мышце, и большинство растяжек икроножных мышц можно выполнять с согнутым коленом,

чтобы воздействовать на другие подошвенные сгибатели.

Этот тест часто выполняется пассивно, когда клиент сидит или лежит на процедурном столе, и иногда его называют тестом Сильверскиольда в честь шведского хирурга, который его разработал. Терапевт удерживает стопу, чтобы привести голеностопный сустав в тыльное сгибание, когда колено клиента согнуто, а затем тыльное сгибание повторяется, когда колено выпрямлено. Хотя собранная информация может быть полезна для построения картины общей функциональности клиента, было обнаружено, что тест имеет низкую надежность (https://www.physiotherapy.com/Silverskiold_Test).

Инверсия/эверсия подтаранного сустава

Повторим: движение таранной кости — это взаимодействие между большеберцовой костью (и, в меньшей степени, малоберцовой костью) и таранной костью при подошвенном и тыльном сгибании. Подтаранный сустав представляет собой связь между таранной и пяточной костями и имеет ось инверсии и эверсии. Подтаранный сустав имеет движение в каждой плоскости, но меньше всего — в сагиттальной плоскости (которая может быть задействована для замены недостаточного тыльного сгибания, как указано выше), а наибольший интерес представляет фронтальная плоскость.

Движение подтаранного сустава во фронтальной плоскости позволяет пяточной кости наклоняться медиально (уходить в эверсию) при касании пяткой и вновь возвращаться в нейтральное положение, помогая замыкать стопу в супинации. Движение подтаранного сустава можно наблюдать во время длинной цепи движения, но его диапазон во фронтальной плоскости лучше всего проверять изолированно, когда клиент лежит на животе, а колено согнуто примерно на 135 градусов (рис. 8.6). Терапевт может обхватить пяточную кость и наклонить ее медиально (эверсия) и латерально (инверсия). Как описано выше, при инверсии подтаранной кости должно возникать тягучее, связочное конечное ощущение, в то время как эверсия должна иметь более твердое,

* Подробнее см. «Рожденный ходить», Джеймс Эрлз, 2020.

костное конечное ощущение, вызванное вклиниванием пяточной кости в латеральную

лодыжку. Хотя эверсия необходима для возникновения пронации, она имеет только половину диапазона, доступного для инверсии, отчасти из-за нижнего положения латеральной лодыжки (Yates, 2012).

Разгибание пальцев ног

Разгибание пальцев ног является важным конечным положением, подготавливающим ткани стопы, колена и бедра к высвобождению энергии для переноса ноги вперед во время ходьбы. Первый ПФС является наиболее часто поражаемым суставом, и неспособность добиться разгибания в этом суставе может привести к цепной реакции по всей механической цепи как с точки зрения организации усилий, так и с точки зрения использования энергии, как мы уже видели это в данном тексте.

Нередко даже просто визуальная оценка дает представление о том, что сустав большого пальца стопы ограничен: большой палец может находиться в приведении, его дистальная фаланга может быть направлена вверх или же на латеральной стороне пальца могут быть мозоли (рис. 8.7). Бурсит часто ассоциируется с ограниченным разгибанием пальца стопы, и эта взаимосвязь может происходить в любом направлении с точки зрения причины и следствия. При уменьшении разгибания пальца стопы стопа может развернуться наружу, чтобы компенсировать это, тем самым изменяя угол действия сил в ПФС. И наоборот, при развитии бурсита и приведении пальца стопы ПФС теряет свою целостность, в результате чего уменьшается доступное ему разгибание.

Уменьшение разгибания пальцев стопы можно легко заметить при выполнении упражнений или во время ходьбы, поскольку это либо заставляет стопу поворачиваться наружу по мере того как поднимается пятка, либо стопа приподнимается за счет мышц бедра, чтобы избежать переката через суставы пальцев ног. Первый ПФС получает большую нагрузку и является одним из наших самых

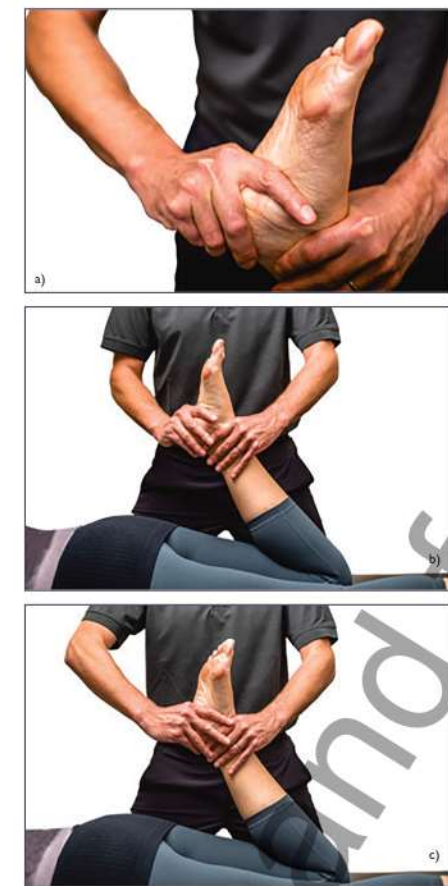


Рисунок 8.6: Эверсия/инверсия подтаранного сустава

- а) Одной из многих оценок движения во фронтальной плоскости в подтаранном суставе является размещение клиента на животе с коленом, согнутым под углом 135 градусов. б) Затем терапевт может обхватить пяточную кость и наклонить ее медиально, уводя в эверсию. Нормальным диапазоном считается примерно 10° эверсии. в) Латеральный наклон позволяет оценить инверсию подтаранного сустава во фронтальной плоскости. Нормальным диапазоном считается приблизительно 20° инверсии.

* Латеральнее средней линии стопы, а не латеральнее средней линии тела.



Рисунок 8.7. Ограниченное разгибание первого ПФС часто сочетается с некоторой степенью вальгусной деформации большого пальца стопы. Недостаток разгибания в ПФС может стимулировать разгибание в межфаланговом суставе. Мы можем видеть, как проксимальные и дистальные фаланги приняли разогнутое положение, чтобы создать компенсаторное «ложное разгибание пальца», т. е. разгибание в неправильном суставе. Скатывание с внутренней стороны стопы часто вызвано уменьшением разгибания ПФС и создает большую нагрузку на кожу с этой стороны, в результате чего на коже образуются защитные мозоли.

сложных суставов, и, как мы уже упоминали выше, он связан дальше по цепочке с другими суставами. Следовательно, проверка разгибания пальцев ног с помощью, по крайней мере, одной формы пассивного теста (рис. 8.8) должна быть неотъемлемой частью осмотра клиента.

С функциональной точки зрения подошвенное сгибание ПФС имеет меньшее значение и редко затрагивается, но для тщательности проверки можно посмотреть, насколько в первом ПФС доступно приблизительно 20 градусов подошвенного сгибания.

В подобных случаях возникает соблазн назначить упражнения на разгибание и растяжку пальцев ног, но важно сначала исключить любое поражение суставов и костей. Потеря диапазона может указывать на изменения в росте кости вокруг сустава, что противопоказывает мобилизацию сустава в разгибании. Если вокруг сустава развились остеофиты или экзостозы (см. рис. 4.40d), то во время любого принудительного разгибания они, вероятнее всего, будут дополнительно раздражаться, что будет стимулировать дальнейший aberrantный рост кости.



Рисунок 8.8. Пассивное разгибание пальцев стопы

а) Когда пациент освобожден от нагрузки, захватите проксимальную фалангу между большим и указательным пальцами и потяните ее вверх в разгибание. б) Пассивное разгибание ПФС должно составлять от 55 до 65 градусов, и любое ограничение здесь является посредством конечного ощущения, предоставляющего информацию о возможной причине ограничения. в) При пассивном тесте полный диапазон нередко сопровождается подошвенным сгибанием первой плюсневой кости, чего невозможно добиться при ходьбе. Поэтому для проверки функционального диапазона сустава необходим тест под нагрузкой.

К счастью, можно легко провести дифференциальный пассивный тест диапазона

движения, который поможет определить, подходит ли клиенту разгибание пальцев стопы. Пусть ваш клиент расслабится, пока вы пассивно тянете его ПФС в разгибание. Это позволит вам почувствовать конечное ощущение; если оно ограничено и имеет костный характер, не назначайте клиенту растяжки и упражнения на мобильность; при эластичном, но ограниченном конечном ощущении упражнения на мобильность и растяжку будут вполне уместны.

Оптимальный диапазон разгибания первого ПФС составляет от 55 до 65 градусов, и многие люди достигают его при выполнении вышеупомянутого пассивного теста, однако данный показатель является ложным из-за опускания первой плюсневой кости (рис. 8.8а и с). Хотя пассивный тест не отражает истинную механику сустава при ходьбе, его использование необходимо для получения четкой информации о костях.

Функциональный тест можно легко выполнить, когда клиент находится в положении стоя, и его тестируемая нога располагается впереди с согнутым коленом (рис. 8.9). Некоторая часть веса тела должна приходиться на вынесенную вперед ногу, и клиенту может понадобиться какая-то опора для поддержания баланса, например, стул или стена. Затем терапевт может проскользнуть большим или указательным пальцем под дистальную фалангу большого пальца ноги и поднять палец вверх, в разгибание.

Этот тест в положении стоя на разгибание пальцев ног называют по-разному — тестом Джека или маневром Хабшера, и он дает несколько результатов. Когда терапевт помещает палец под дистальную фалангу, он проверяет межфаланговый сустав на разгибание, которое должно быть минимальным, если вообще должно присутствовать (рис. 8.7). Поскольку разгибание ПФС происходит пассивным образом, это натягивает длинные и короткие сгибатели и подошвенную фасцию, провоцируя «механизм лебедки» для супинации стопы.

Таким образом, при выполнении теста терапевт получает информацию о целостности как межфаланговых, так и плюснефаланговых суставов, об уровне их сопротивления разгибанию, качестве конечного ощущения в конце



Рисунок 8.9. Тест Джека (или Хабшера). ПФС первого пальца стопы следует оценивать как под нагрузкой, так и без нагрузки. Пассивный тест без нагрузки, описанный выше, может выявить ригидность большого пальца стопы, для которой характерны костные изменения и значительное уменьшение разгибания. Если пассивный диапазон без нагрузки находится в пределах нормы, функциональный предел все еще может присутствовать и требует оценки стопы в положении стоя. Ограниченное разгибание во время выполнения теста Джека будет указывать на ограничение большого пальца стопы, соответственно в этом случае будут показаны упражнения и растяжка.

а) Попросите клиента встать так, чтобы проверяемая стопа была впереди. Обеспечьте поддержку для клиента, если он в этом нуждается, для более легкого удержания баланса. б) Терапевт просовывает палец под дистальную фалангу и тянет ее вверх, чтобы разогнуть суставы. Достаточный диапазон (от 55 до 65 градусов) разгибания ПФС помогает задействовать «механизм лебедки» для подъема медиальной продольной арки стопы. Разгибание первого ПФС может составлять вплоть до 90 градусов, что необходимо для желающих носить высокие каблуки. Использование дистальной фаланги для проверки ПФС может выявить компенсаторное разгибание в межфаланговом суставе (см. рис. 8.7).



Рисунок 8.10. Другие пальцы реже страдают от потери диапазона, но все же их также следует проверить на наличие каких-либо аномалий. Дистальные межфаланговые суставы должны иметь 60 градусов подошвенного сгибания и отсутствие тыльного сгибания; проксимальные межфаланговые суставы должны иметь 35 градусов подошвенного сгибания и 30 градусов тыльного сгибания. Пассивные диапазоны легко проверяются с помощью контроля каждой фаланги большим и указательным пальцами, что позволяет изолировать соответствующие суставы.

диапазона движения и тайминга «механизма лебедки».

3. Формирование выровненного жесткого рычага

Отсутствие продвижения вперед во время схода с пальцев или при ходьбе с носками наружу может указывать на «несупинированную» стопу. Каждый из измеренных выше диапазонов вносит свой вклад в способность стопы к супинации, и уменьшение любого из этих диапазонов уменьшит жесткость тканей подошвенной фасции, заднего и глубокого заднего отделов голени, внутренних сгибателей или их комбинации. Чтобы каждый сустав и ткань полноценно взаимодействовали и создавали прочную платформу, нужную для высвобождения энергии при схождении с пальцев стопы, необходимо, чтобы во время переката пальцев стопы выравнивание стопы стремилось к сагиттальной плоскости.

Уменьшение разгибания пальцев стопы может привести к развороту носков наружу, однако также могут быть задействованы и другие

факторы, требующие оценки. Как мы видели на рис. 4.36, парабола головок плюсневых костей стопы человека отличается от стопы других приматов и облегчает наше перемещение в сагиттальной плоскости при ходьбе. Однако существует некоторая степень нормальной вариации в длине плюсневых костей у разных людей. В среднем вторая плюсневая кость бывает длиннее первой, а затем каждая последующая плюсневая кость постепенно укорачивается по мере того, как мы продвигаемся по костному массиву наружу.

Стопа Мортон

Наиболее важную роль играет соотношение длины между первой и второй плюсневыми костями, поскольку их головки образуют основу для двух последних точек контакта во время фазы переката пальцев стопы. Если одна из них длиннее другой, это вызовет скручивание стопы при ее подъеме в разгибание пальцев стопы (рис. 8.11). Как мы увидим ниже, мозоли на стопе могут быть признаком того, что нужно проверить относительное положение двух ПФС, поскольку такой дисбаланс вызывает неравномерную нагрузку на кожу.

Мортон (1935) был первым, кто серьезно задокументировал значение изменения длины плюсневой кости и посвятил довольно много страниц в обеих своих книгах рассуждениям и оценке того, что сейчас принято называть «стопой Мортон». В некоторых современных источниках более длинный второй палец стопы также называется «пальцем Мортон», но я не нашел данного термина в его работах. Более длинный второй палец стопы не влияет на механику походки так, как это делает более длинная вторая плюсневая кость. Мортон и определяющим признаком стопы Мортон является положение ПФС, которое совершенно не зависит от длины фаланг.

Однако более длинный второй палец стопы является проблемой для примерки обуви. Большинство людей измеряют свою обувь в соответствии с расстоянием между большим пальцем стопы и носком обуви и редко проверяют, насколько в обуви достаточно места для второго

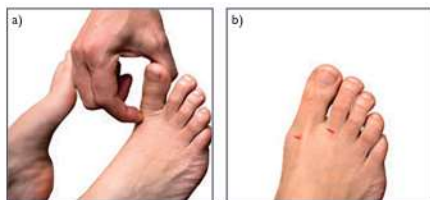


Рисунок 8.11. Чтобы проверить наличие стопы Мортона, а) попросите клиента расслабиться и проверьте наличие вторичных признаков разницы в длине, а затем б) согните суставы, чтобы проверить положение головок плюсневых костей. Между концами двух костей должна быть разница в 1-2 мм, так как укороченность первой плюсневой кости компенсируется двумя сесамовидными костями, лежащими под суставом. Эти две плавающие кости образуют платформу, на которую опирается головка первой плюсневой кости, и уравнивают длины двух плюсневых костей. Консервативное лечение для облегчения любой связанной с этим дисфункции заключается в назначении ортопедом использования «расширения Мортон». Небольшая подкладка расширения размещается под первым ПФС и компенсирует его недостаточную длину, а также выравнивает дисбаланс между соседними суставами.

пальца стопы. Частое ношение неподходящей обуви может привести к дополнительной нагрузке на дистальные фаланги, особенно после прогулки вниз с горки, при котором стопа смещается в обуви вперед, и может привести к деформации суставов второго пальца стопы. Лекарство от этого весьма простое — следует покупать обувь, которая подходит не только большому пальцу стопы, но и второму пальцу стопы.

Подвижность первого луча

Варианты фиксации поперечной связкой первого и второго луча упоминались в предыдущей главе. Являясь пережитком цепкой стопы наших предков, первый луч имеет тенденцию терять большую часть своей естественной фиксации и становится гипермобильным. Нестабильный первый луч имеет тот же эффект, что и стопа Мортон выше, и нередко эти два состояния происходят в сочетании.

Доступная вдоль ПФС подвижность должна соответствовать вполне предсказуемой схеме,

которую можно оценить, удерживая соседние суставы и перемещая их вперед и назад относительно друг друга. Значительная подвижность должна присутствовать между пятым и четвертым суставами, меньшая подвижность — между четвертым и третьим, и наименьшая подвижность — между третьим и вторым суставами. Затем подвижность между первым и вторым суставом снова увеличивается, но это всего лишь вопрос нескольких степеней свободы. Лишь проведя этот тест для целого ряда различных стоп, вы сможете в достаточной степени познаться с общим ощущением среднестатистической подвижности, чтобы иметь возможность отличить гипермобильный луч от нормального, не используя таких подтверждающих доказательств, как тесты, показанные на рис. 8.11 и 8.12.

Формирование мозоли

Чтобы эффективно и действенно передавать силу, стопа развивалась в течение многих миллионов лет. Она прошла через множество адаптаций, позволяющих использовать ряд двигательных паттернов, которые отражены в ее мягких тканях и суставах. Как мы подчеркивали на протяжении всей книги, тело адаптируется в соответствии с действующими на него силами, и в случае нарушения естественной последовательности стопа может установить защитные механизмы. Первая и наиболее распространенная линия защиты — это образование мозолей — затвердевание кожи, которая подвергается чрезмерной нагрузке (рис. 8.13).

На регулярно носимой обуви также можно выявить схожие паттерны. На первый взгляд экспертное прочтение закономерностей износа может показаться гаданием на кофейной гуще, однако в действительности в его основе лежит определенная логика и обоснование. Легче всего объяснить структуру мозоли стопы Мортон, поскольку вторая плюсневая кость длиннее первой, что создает область высокого напряжения в единственной точке контакта во время фазы переката пальцев стопы. Единственная точка опоры способствует формированию линии мозолей, если стопа движется прямо

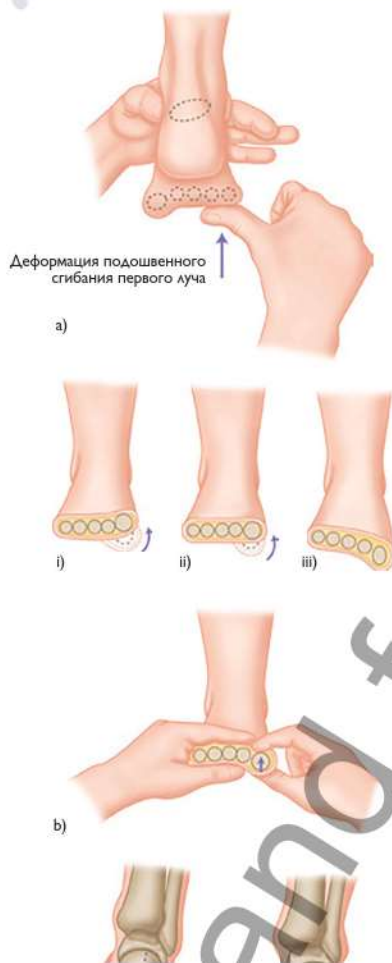


Рисунок 8.12. Подвижность первого луча

а) Если стопа находится в нейтральном выравнивании и первый луч остается ниже уровня остальных, его следует проверить на мобильность. б) Если он гипермобилен и поднимается выше уровня остальных (i–iii), это может создать нестабильность первого луча и привести к пронации. Если он зафиксирован, (с) произойдет обратное, и стопа перейдет в супинацию при воздействии на нее латерально. Когда первая плюсневая кость, располагаясь на одной линии с другими, обладает лишь частичной мобильностью, ударные силы будут передаваться на нижележащие сесамовидные кости, вызывая воспаление, которое может привести к другим компенсациям и хромоте. Для избавления от этих паттернов необходимо работать с длинной малоберцовой мышцей, а также выполнять манипуляции с суставами, имеющими ограничение в движении. (Адаптировано из Michaud, 2011.)

- А – под головкой второй плюсневой кости (линейная или округлая) — может свидетельствовать о стопе Мортона.
- В – под подушечками стопы — проверьте первый луч на предмет гипермобильности.
- С – под головками пятой и первой плюсневых костей — проверьте ригидность и/или подошвенное сгибание первого луча.
- Д – под головками первой и второй плюсневых костей — проверьте наличие полуподвижного первого луча.
- Е – под головкой пятой плюсневой кости — проверьте подошвенное сгибание пятого луча.
- Ф – под подушечками стопы — проверьте, не ходит ли человек на носках, не ограничено ли у него тыльное сгибание и не напряжены ли икроножные мышцы.
- Г – внешний край большого пальца стопы — («защемленная» мозоль) — проверьте, не уменьшено ли разгибание большого пальца стопы.

Прохождение линии силы во время фазы опоры (от касания пяткой до схода с пальцев ноги)

Рисунок 8.13. Формирование мозоли

а) Стопа Мортона может вызвать формирование линейных или округлых мозолей под головкой второй плюсневой кости. б) Нестабильный первый луч также приводит к большей нагрузке на головку второй плюсневой кости или на более широкую область подушечки стопы. «Защемленная мозоль» на внешнем крае большого пальца может быть вызвана потерей разгибания пальца (см. также рис. 8.7). с) Мозоли под головками первой и пятой плюсневых костей могут указывать на ригидный подошвенный сгиб первого луча. d) Мозоли вокруг подушечки стопы и головки первой плюсневой кости могут быть вызваны полуподвижным первым лучом. е) Давление, вызванное подошвенным сгибанием пятого луча, может привести к образованию мозолей под головкой пятой плюсневой кости. f) Ходьба на носках или чрезмерно напряженные подошвенные сгибатели приводят к дополнительному давлению на всю переднюю часть стопы.

вперед, или округлой мозоли, если стопа уходит в ротацию.

«Защемленная» мозоль является распространенным образованием на стороне большого пальца ноги, часто вокруг межфаланговой линии, и связана с ограниченным разгибанием пальца ноги. Защемление вызвано тем, что стопа перекачивается через носок сбоку, а не разгибается по прямой.

Каждая мозоль является надежным индикатором того, как действующие во время ходьбы повторяющиеся силы проходят через стопу и как кожа адаптировалась к этой силовой схеме. Мозоли могут не указывать на точную

причину, но дают вам подсказку относительно того, как действуют силы.

4. Продвижение вперед и выходная сила

Наше движение является результатом взаимодействия между скелетной, фасциальной и мышечной системами, координируемыми нервной системой в ответ на воздействие сил. Для создания жесткого рычага к моменту схода с пальцев требуется скоординированное участие каждой из этих систем.

Если связки и суставы допускают преимущественно продвижение в сагиттальной плоскости, мы подходим к головкам первой и второй плюсневых костей для того, чтобы выполнить схождение с пальцев на «высокой передаче», поскольку в этом случае для движения вперед могут быть задействованы все миофасции сгибателей стопы. Если же мы отклоняемся на латеральные головки плюсневых костей и выполняем сход с пальцев стопы на «низкой передаче», то в этом случае используется меньшее количество миофасциальных единиц, и они будут задействованы с меньшей эффективностью.

Таким образом, траектория прохождения через каждый из перекатов стопы обеспечивает механизмы замыкания стопы, натяжение тканей и стремление к высвобождению энергии при сходе с пальцев. Чтобы воспользоваться этими преимуществами, нам все еще нужна сила, чтобы контролировать стопу на различных ее стадиях. Как мы уже видели, в фазе опоры задействуются разные группы мышц, первоначально это наружные подошвенные сгибатели, а затем ответственность переходит к внутренним сгибателям.

Простой способ оценить общую силу и контроль — попросить клиента выполнить подъемы на мыски на двух, а затем на одной ноге (рис. 8.14). Эта простая оценка проверит силу обеих групп мышц и предоставит информацию о траектории движения в суставах, а также даст клиенту немедленную обратную связь об их силе и способностях.

Когда вы оцениваете наклон пяточной кости во время подъема, вспомните,



Рисунок 8.14. Подъем голени. Чтобы оценить силу подошвенных сгибателей, попросите клиента поднять пятки таким образом, чтобы он балансировал на головках плюсневых костей. Относительную силу мышечных групп можно оценить по количеству повторений, которые может выполнить клиент, сохраняя при этом хорошую технику (см. также главу 9).

а) Со спины можно оценить наклон пятки, высоту подъема и направление разгибания пальцев стопы. б) Здесь мы видим, как обе пятки наклонены латерально, что может указывать на способность к супинации, но мы также должны отметить, как обе стопы развернуты наружу, чтобы вытянуться вдоль головок плюсневых костей 2–5. в) Аналогичную оценку можно провести с подъемом пятки одной ноги. г) Увеличение нагрузки на комплекс стопы и голеностопного сустава выявляет потенциальную слабость подошвенных сгибателей.

как располагаются сухожилия, пересекающие подтаранный сустав (мы говорили об этом в главе 5). Глубокий задний отдел и камбаловидная мышца пересекают внутреннюю часть сустава и приподнимают опору таранной кости, чтобы создать инверсию пятки; малоберцовые

мышцы перекрещиваются на противоположной стороне и выполняют эверсию пятки. Когда пятка поднимается, мы хотим видеть, что пятка при этом уходит в инверсию, — это будет являться признаком сильной и поддерживающей задней большеберцовой мышцы, а также длинного сгибателя пальцев стопы и длинного сгибателя большого пальца стопы.

Ротация — супинация и пронация

Можно иметь силу для подъема пятки, но не обладать достаточной длиной связок, необходимой для создания жесткого рычага при супинации. В главе 2 мы уже видели, что для того, чтобы стопа эволюционировала в знакомую нам современную форму полукупла, потребовалось удлинение латеральной стороны стопы. Во время пронации внутренняя часть стопы удлиняется, суставы открываются и мягкие ткани поглощают удар, в то время как латеральная сторона, особенно пространство между пяточной костью и шиловидным отростком, укорачивается. Чтобы вновь вернуть стопу в супинацию, должно произойти обратное действие, и суставы, связки и сухожилия должны позволить латеральной стороне снова удлиниться.

Латеральная сторона стопы нередко бывает ограничена, и это можно оценить с помощью простой ротации (см. рис. 8.15). Когда вы стоите в нейтральном положении и поворачиваете тело в одну сторону, одна стопа будет уходить в пронацию, а другая — в супинацию. Поскольку движение начинается из нейтрального положения, сухожилия не растягиваются, и такое движение в первую очередь проверяет способность костей и связок к адаптации.

■ КРАТКИЙ ОБЗОР

Четкое понимание того, что происходит со стопой клиента, позволяет составить план лечения. Мы должны начинать каждый сеанс с составления четкого представления о том, какие суставы ограничены, какие безопасно и небезопасно растягивать и мобилизовать и какие



Рисунок 8.15 Использование ротации для оценки пронации и супинации. Когда клиент стоит в нейтральном положении и поворачивается влево, его правая стопа должна уходить в пронацию, а левая — в супинацию, поскольку ротация таза заставляет кости левой ноги вращаться латерально, а кости правой ноги — медиально. Как мы обсуждали ранее, движение большеберцовой и малоберцовой костей сопряжено с движением таранной кости и стопы из-за соединения по принципу гнезда и шипа между лодыжками и таранной костью. С помощью этого движения можно оценить качество пронации и супинации каждой стопы, но особенно полезно наблюдать за способностью раскрываться у латеральной стороны супинирующей стопы. Латеральный тяж подошвенной фасции и короткая малоберцовая мышца охватывают промежуток между пяточной костью и шиловидным отростком пятой плюсневой кости. Любому ограничению в этой области пошло бы на пользу движение по принципу «восьмерки», скручивания стоп и упражнений «часы на коленях» из главы 9. Сравнивая стопы (а) и (б), мы можем видеть, как пронация правой стопы вызывает складывание в голеностопном суставе в обоих случаях, но большее опущение можно увидеть на медиальной стороне на рисунке (б) — описанный выше тест на опущение лодыжечной кости можно использовать в качестве исходной точки для измерения изменений от любых предписанных упражнений. Скручивание через уходящую в супинацию левую стопу заставляет пяточную кость отодвигаться от шиловидного отростка и поднимает медиальную продольную арку как для (а), так и для (б). В случае (а) видна меньшая способность правой стопы к пронации, но переход в супинацию выглядит значительно лучше, чем на рисунке (б), которая также изо всех сил пытается сохранить контакт с полом посредством большого пальца стопы. Как правило, приведенные здесь два примера указывают на необходимость большей мобильности в случае (а) и большей стабильности — в случае (б).

мышцы могут нуждаться в дополнительном укреплении.

Понимание общих принципов оценки, способов их проведения и знание того, какую информацию можно получить с помощью различных движений и конечных ощущений, вооружает терапевта словарным запасом, который поможет связать те или иные ограничения, действия и отклонения в траекториях с соответствующими тканями. Приведенные выше оценки не являются исчерпывающими: стопа представляет собой сложную механическую область, и для ее тщательного изучения требуется целая жизнь. Но ознакомление с принципами, а не только с механикой каждого

ортопедического теста поможет вам заручиться лучшим пониманием, когда дело доходит до наблюдения за естественными движениями.

Я рекомендую перечитать эту главу хотя бы еще один раз, не обязательно для того, чтобы изучить особенности оценки, но для того, чтобы проследить логику того, что происходит, когда движение выполняется определенным образом, и как должны реагировать ткани — кости, связки или мышцы. Данная информация не является набором каких-то тайных правил и предписаний, в ее основе лежит простой здравый смысл. Понимание общего смысла анатомического и функционального устройства значительно облегчит дальнейшее изучение нюансов оценки.

УПРАЖНЕНИЯ ДЛЯ РАБОТЫ СО СТОПОЙ

Автор главы — Люси Уинтл. См. ее биографию на стр. 269.

Крылья — как мечты. Перед каждым полетом птица совершает небольшой прыжок — прыжок веры в то, что ее крылья сработают. Такой прыжок можно совершить, только когда твердо стоишь на ногах.

Дж. Р. Рим

Кто из нас может покаяться в том, что пренебрегает своими ногами? На протяжении многих лет мы были заняты приведением в тонус ягодичных мышц, формированием талии, работой над выравниванием и осанкой, но кто из нас до недавнего времени хоть ненадолго останавливался, чтобы обратить внимание на свои стопы и на их участие во всех упражнениях с весовой нагрузкой? Единственное, с чем мы, вероятно, все согласимся, пройдя столь долгий совместный путь по этой книге, заключается в том, что такой подход необходимо менять: хотя нам, возможно, и не нужно «твердо стоять на ногах» в буквальном смысле слова, мы, безусловно, хотим и нуждаемся

в сильных, адаптивных стопах, способных выдерживать нагрузки и жизненные стрессы.

Наблюдая за множеством «все более сложных» упражнений, которыми нас ежедневно бомбардируют в социальных сетях, я нередко задаюсь вопросом: какой смысл во всей этой сложности, если прежде не достигнуты такие простые задачи, как стояние, ходьба и сохранение баланса?

Клиницисты и исследователи в значительной степени игнорируют внутренние мышцы. Таким образом, эти мышцы редко затрагиваются в программах реабилитации. При проблемах со стопами вмешательства чаще направлены на внешнюю поддержку стопы, а не на тренировку этих мышц, чтобы они могли функционировать так, как должны.

МакКеон и др. (2014)

Если вы регулярно будете обращать внимание на исправление паттернов своей стопы,

в конечном итоге это принесет значительные дивиденды не только вашим ногам, но и всему вашему телу. Возможно, прежде чем вы заметите какие-то изменения, пройдет некоторое время, но в долгосрочной перспективе такой последовательный подход обязательно окупится. Некоторые из преимуществ, которые вы можете заметить, если продолжите регулярную практику, — это улучшение силы ваших голеностопных суставов, коленей и таза, улучшение пояснично-тазовой стабильности и улучшение баланса.

Упражнения, включенные в эту главу, не претендуют на затейливость и сложность, скорее, они разработаны как некоторая основа, указывающая вам правильное направление и побуждающая вас к исследованию.

Прочитав главу 8 о методах оценки, вы уже должны были составить себе хорошее представление о том, какой у вас тип стопы и, следовательно, какова ваша отправная точка. У каждой стопы будет своя отправная точка и своя история. Переломы, растяжения, типы обуви, повторяющиеся виды спорта и окружающая среда вносят свой вклад в экосистему стопы. Не забывайте, что вы уникальны, и ваша стопа может не вынести того, что будет легко для стопы вашего соседа!

Я разделил приведенные здесь упражнения на две основных категории: те, которые помогают укрепить стопу, и те, которые направлены на расслабление, — при этом в некоторых упражнениях будет сочетаться и то, и другое.

Как и во всех упражнениях, которые вы выполняете впервые, важно обращать внимание на свою форму, слушать свое тело и не работать через боль. Указанное количество повторений является ориентировочным и может оказаться слишком большим, когда вы только начинаете свое путешествие по упражнениям для стоп. Всегда придерживайтесь здравого смысла и увеличивайте количество повторений лишь по мере того, как растет ваша осознанность и сила. Лучше сделать два или три упражнения действительно хорошо, чем торопиться выполнить все.

Вот список реквизита, необходимого для выполнения всех упражнений.

1. Небольшой мягкий мяч размером примерно с мяч для сквоша.
2. Теннисный мяч или что-то похожее по размеру.
3. Резинка или эластичная лента.
4. Йога-блок или книга толщиной примерно 8 см.
5. Хотя это и не обязательно, вам может пригодиться небольшой клин, особенно в том случае, если у вас слишком прониравшая или слишком супинированная стопа, — клин вроде того, который используется в качестве порога, вероятно, вполне подойдет.

Теперь вы готовы. Наслаждайтесь путешествием по знакомству со своими стопами!

■ УПРАЖНЕНИЯ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СТОП

1. Общее пробуждение стоп

Это упражнение предназначено для осознания стопы путем стимуляции механорецепторов, встроенных в кожу подошвы, и для «открытия» стопы при подготовке к дальнейшим упражнениям. Вы можете обнаружить, что, воздействуя таким образом на стопы, вы также привнесете ощущение легкости в другие части вашего тела. Может быть, вы стали как-то по-другому ощущать свой таз или поясницу? В этом упражнении нет правильного или неправильного... Делайте только то, что приятно!

Для этого упражнения по стимуляции стопы используйте, на ваш выбор, мягкий или твердый мяч размером примерно с мяч для сквоша. Если при этом вы будете стоять на твердой поверхности, то результаты будут лучше (рис. 9.1а).

- Надавливайте на подушечку под основанием каждого пальца ноги (головкой каждой плюсневой кости) и затем отпускайте; проделайте так, начиная с большого пальца стопы и двигаясь к пятному пальцу (или наоборот). Двигайтесь к своду стопы, продолжая то нажимать на мяч, то ослаблять давление, направляя мяч к латеральной, затем к средней,



Рисунок 9.1а. Используйте вес своего тела, чтобы создать соответствующее давление на мяч.



Рисунок 9.1б. Проследуйте по линии между двумя плюсневыми костями, чтобы аккуратно распределить ткань между ними.

а затем к медиальной сторонам поперечной арки стопы. Повторите процесс несколько раз.

- Теперь надавите на мяч и рисуйте случайные узоры по всей подошве стопы, останавливаясь в любых «привлекших ваше внимание» местах. Старайтесь выполнять эти движения медленно и методично. В этом исследовании охватите как можно большую часть стопы, помня, что на латеральной стороне стопы меньше мягких тканей, чем на медиальной.

Как только вы закончите с одной ногой, постоите немного, чтобы ощутить разницу между двумя сторонами вашего тела. Чувствуете ли вы себя более заземленным на стопе, которую только что стимулировали? Может быть, у вас лучше ощущается связь пальцев ног с полом и вы лучше их раздвигаете и удлиняете?

- На следующем этапе поместите мяч на стопу сверху. Выберите удобное для себя положение, чтобы вы могли рукой с мячом проработать области между плюсневыми костями, например, вы можете расположиться стоя на коленях с одной ногой впереди. Начните от голеностопного сустава и слегка надавливайте на мяч, ведя его от голеностопного сустава к пальцам стоп между плюсневыми костями (рис. 9.1б). Повторите это два или три раза на каждой ноге.

Теперь ваша стопа должна чувствовать себя более заземленной, открытой и освобожденной, что помогает вам лучше получать обратную связь от поверхности, на которой вы стоите.

2. Синхронизация стоп, цифра 8 и поиск тренажника равновесия

Смещая вас туда, где ваш вес все еще находится над стопой, эта простая комбинация движений поможет вам найти нейтральное или центральное положение стопы. Перенос веса на разные части стопы может показать, какие движения вызывают затруднения, а какие кажутся знакомыми.

Синхронизация стоп

Начните с нейтрального положения таза и расставьте ноги на ширину плеч. Держите ноги прямыми, не блокируя при этом колени, а тазовище выровняйте над ногами. Старайтесь не позволять себе уходить в какое-либо боковое сгибание или сгибание бедра.

- Сместите вес латерально вправо. Ваш правый подтаранный сустав уйдет в эверсию, а левый — в инверсию. Это небольшие движения. Держите пальцы ног и головки плюсневых костей на полу, чтобы способствовать большему движению подтаранного сустава.
- Теперь перенесите вес вперед на обе группы пальцев ног и головки плюсневых костей — все ваше тело при этом смещается вперед, а в голеностопных суставах происходит небольшое тыльное сгибание (рис. 9.2а).
- Сместите свой вес влево. Теперь ваша левая стопа в супинации, а правая — в пронации (рис. 9.2б).



Рисунок 9.2 а и б. Используйте обратную связь от пола, чтобы почувствовать, как перенос веса откликается в области таза.

- Наконец, сместитесь назад, немного перенесите вес на заднюю часть пяток.

Сравните диапазон движения и ощущение опоры при раскачивании вперед и назад — наша длинная передняя часть стопы обеспечивает гораздо больший диапазон для переноса веса тела вперед, чем назад.

Повторите этот круг четыре раза в каждом направлении.

Цифра 8 и тренажник равновесия

- Используя небольшие движения смещения, как указано выше, нарисуйте латеральную цифру 8 (∞). Двигайтесь латерально в одну сторону, затем вперед, затем медиально назад к пятке противоположной стопы и снова наружу латерально.

Повторите движение четыре раза в одном направлении, прежде чем начать делать его в другом направлении.

Это крошечные движения (для меня они размером с мяч для гольфа). По мере прохождения «восьмерки» постарайтесь почувствовать, как происходит смещение веса в области таза, и не забывайте удерживать пальцы ног и головки плюсневых костей на полу.

В конце кругов и «восьмерки» найдите точку равновесия, где ваш вес равномерно распределен под основанием первой и пятой плюсневых костей и центром пятки. Почувствуйте, как ваша правая стопа поддерживает правую сторону вашего тела, а левая стопа — левую сторону. Мы будем называть это распределение веса под стопой тренажером равновесия — вашим нейтральным и центральным положением. Мы будем обращаться к этому «тренажеру» при выполнении следующих упражнений. У вас не должно быть ощущения, будто вы прикладываете усилия, чтобы сохранять нейтральное положение ног, — скорее, наоборот, вы должны ощущать легкость.

3. Упражнение на разгибание пальцев ног — шаг вперед (реквизит — маленький мягкий мяч или клин)

* Избегайте этого упражнения, если вы знаете, что у вас есть суставные или костные ограничения в вашем первом ПФС (см. главу 8).

Способность разогнуть первый ПФС жизненно важна для многих функций стопы. Движения в этом упражнении помогут вам оценить диапазон и качество движений в этом суставе. Кроме того, данное упражнение подготовит базовую биомеханику стопы к последующим упражнениям.

Начните с постановки стоп «в разножку», т. е. поставьте одну стопу перед другой на естественном расстоянии бедер друг от друга.

- Если вы хотите поработать с разгибанием пальцев правой стопы, то начните с положения, при котором правая нога будет



Рисунок 9.3а. Почувствуйте, как блоковидный сустав в первом ПФС натягивает подошвенную поверхность стопы, помогая «механизму лебедки».

вперед. Сделайте шаг вперед левой стопой, оставив правую стопу позади себя и позволяя ей подняться на носок (рис. 9.3а). Старайтесь удерживать головку первой плюсневой кости на полу, чтобы создать разгибание ПФС у основания большого пальца стопы.

Повторите несколько раз, прежде чем сменить стопу.

- Если у вас в первом ПФС доступен некоторый диапазон движения, вы можете усложнить это упражнение, поместив подпорку под подушечку большого пальца ноги (не под плюсневую кость), подробнее можно посмотреть на рис. 9.3б. В качестве подпорки можно использовать либо небольшой мягкий мяч, либо клин, которым можно проскользнуть под палец стопы, тонким концом к первому ПФС. Размещение такой подпорки под пальцем ноги увеличит величину тыльного сгибания, возникающего



Рисунок 9.3б. Добавление подпорки под большой палец ноги создаст больше разгибания пальца ноги в ПФС.

во время движения. Теперь повторите вышеописанное упражнение, еще раз убедившись, что основание головки плюсневой кости остается в контакте с полом.

Повторите по 6 раз на каждой ноге.

4. Билатеральный подъем на носки с прямыми коленями

Подъем на носок на прямой ноге задействует икроножную мышцу заднего отдела, а также длинный и короткий сгибатели пальцев стопы. Упирайтесь пальцами ног в пол, когда поднимаетесь и опускаетесь вниз.

- Найдите «треножник равновесия» своих стоп и почувствуйте равномерное распределение веса между всеми тремя точками.
- Удлините пальцы ног, чтобы убедиться, что они не впиваются в пол и не цепляются за него.
- Вы можете слегка придерживать одной рукой за стену или другую подходящую опору на уровне плеч. Однако не поддавайтесь искушению использовать эту опору в качестве рычага для движения вверх.
- Теперь поднимитесь на головки плюсневых костей и удерживайте положение в течение двух секунд (рис. 9.4а).
- Медленно опускайтесь, удерживая подушечки пальцев ног в контакте с полом.

Повторите данное упражнение 8 раз.



Рисунок 9.4. а) Какова ваша отправная точка? Если ваш вес естественным образом больше приходится на пятки, вы почувствуете больше трудностей при подъеме пяток. Если ваш вес смещен вперед, то при подъеме вы, скорее всего, слегка завалитесь вперед. Держитесь за опору, если вы не можете подняться. б) Если ваша стопа уходит в супинацию, как показано на рисунке, попытайтесь перенести больше веса на первый ПФС и медиальную сторону стопы.

Обратите внимание, что лучше держаться за что-то и добиться полного подъема пятки, чем бороться за сохранение баланса!

Чтобы превратить это упражнение в более полноценную интеграцию всего тела, может быть полезно начать движение, надавливая подушечками пальцев ног в пол и, слегка задействуя мышцы тазового дна и глубокие мышцы живота. Это даст ощущение «внутреннего» подъема и может облегчить вам упражнение. Сравнение выполнения упражнения с интеграцией тазового дна/мышц живота и без нее может помочь вам решить, действительно ли происходит это включение или нет.

Выполнив упражнение «Короткая стопа» (рисунок 9.6 на этой странице), вы сможете почувствовать, как можно интегрировать в упражнения тазовое дно, используя стопы в качестве отправной точки. Хотя о тазовом дне можно было бы написать целую книгу, в рамках

данной главы мы просто заинтересованы в том, как тонкое задействование этих мышц может помочь в упражнениях, требующих равновесия, подъема и контроля пояснично-тазовой области.

5. Билатеральный подъем на носки с согнутыми коленями

Повторите предыдущее упражнение, слегка согнув колени. Сгибание колена приводит к тому, что в данном упражнении больше задействуется камбаловидная мышца, а не двусуставная икроножная мышца. Это упражнение может быть особенно полезным для тех, у кого имеется нестабильная, пронируемого типа стопа, так как оно нацелено на камбаловидную мышцу, которая прикрепляется к медиальной части пяточной кости и, следовательно, может поддерживать ее.



Рисунок 9.5. Можете ли вы медленно подниматься и опускаться со слегка согнутыми коленями, сохраняя при этом контроль?

- Начните с поиска «треножника равновесия» каждой стопы.
- Согните колени, затем поднимитесь на головки плюсневых костей. Старайтесь не выпрямлять ноги при подъеме (рис. 9.5).
- Медленно опустите пятки обратно на пол, сохраняя колени согнутыми.

Повторите 8 раз.

Выполняя это упражнение, помните о своем выравнивании. Удержание бутристости большеберцовой кости на одной линии со вторым пальцем стопы помогает сохранить центрирование голеностопного сустава и предотвратить пронацию или супинацию стопы.

6. Короткая стопа — складывание сводов

Упражнение, известное как «Короткая стопа», первоначально было описано Владимиром Яндой (в Пейдже и др., 2014). Оно получило свое название из-за действия складывания арки стопы в купол, при котором укорачивается ее длина и одновременно увеличивается высота стопы. Ряд экспериментов показал, что упражнение «Короткая стопа» полезно для укрепления внутренних мышц и поднятия полукуполов стопы (Hutchinson, 2018; McKeon и др., 2014).

Как мы видели в главе 7, повышение тонуса внутренних подошвенных мышц может помочь поддерживать арку стопы, увеличивая высоту продольной арки стопы, и ладьевидную кость. Когда арка стопы становится сильнее, она лучше приспособлена к нагрузкам и стрессам, с которыми она сталкивается в повседневной деятельности и во время занятий спортом.

В прошлом большое внимание уделялось тренировке тазового дна и глубоких мышц живота для улучшения стабильности пояснично-тазовой области. Теперь нам нужно заняться тренировкой внутренних подошвенных мышц, чтобы придать аркам стопы ту стабильность, в которой они нуждаются и которой они заслуживают.

Следующее упражнение требует искусного выполнения, побуждая вас изолировать



Рисунок 9.6. Тело можно представить в виде ряда куполов — стопы, тазового дна и диафрагмы.

мышцы поверхностной группы четырех слоев стопы — длинную мышцу, отводящую большой палец стопы, короткий сгибатель пальцев стопы и квадратную мышцу подошвы. Подобные упражнения включают подъем стопами каких-то предметов или скручивание полотенца или ленты, но они, как правило, задействуют длинный сгибатель большого пальца стопы и длинный сгибатель пальцев стопы, которые являются внешними мышцами. Упражнение «Короткая стопа» сфокусировано на более внутренних мышцах и очень точно.

После некоторой практики этого упражнения, когда вы почувствуете, что задействуются внутренние мышцы стопы, вы можете включить эту связь в дальнейшую работу, чтобы сосредоточиться на укреплении медиальной продольной арки стопы. В этом упражнении

мы интегрируем вовлечение внутренних мышц стопы, тазового дна и диафрагмы.

Исходное положение для «Короткой стопы»

Этап 1 — Купол стопы

- Найдите свой «треножник равновесия».
- Аккуратно прижмите подушечки пальцев стоп к полу. Аккуратно подтяните пятку к головкам плюсневых костей, а сами плюсневые кости — к пятке, чувствуя, как мягкие ткани арок стоп слегка приподнимаются (рис. 9.7b). Отпустите и позвольте арке стопы расслабиться. Старайтесь не вцепляться в пол пальцами стоп и не блокировать колени. Если вы изо всех сил пытаетесь почувствовать какую-либо активность в стопах, попробуйте визуализировать подъем купола во время выполнения упражнения.

Повторите данное упражнение 4 раза.

Этап 2 — Купол тазового дна

- Слегка прижимая пальцы стоп к полу и поднимая купол стопы, подтягивайте мышцы тазового дна. Визуализируйте, как поднимается вверх купол слинга мышц, проходящих от лобковой кости к копчику и между двумя седалищными костями. При задействовании этих мышц может ощущаться внутренняя интеграция и, в некоторых случаях, внутренний подъем.

Повторите данное упражнение 4 раза.



Рисунок 9.7. Из расслабленного положения (a) продольная арка стопы будет плавно подниматься, когда вы задействуете внутренние мышцы (b).

Этап 3 — Купол диафрагмы

- На выдохе слегка прижмите пальцы ног к полу и приподнимите куполы стоп и тазового дна. Выпустите весь воздух из легких и почувствуйте, как плавно поднимается вверх купол диафрагмы. Это создаст ощущение, что при выходе воздуха из легких цилиндр вокруг туловища слегка сжимается. В конце выдоха все купола находятся в «верхнем» положении.
- Мягко вдохните, чтобы купола снова расслабились и опустились вниз.

Ключ к успеху в этом упражнении — не переуусердствовать. Поначалу будет сложно добиться синхронизации всех трех шагов, если только вы не привыкли к такой «внутренней» работе. Но даже в этом случае здесь вам может открыться другой подход к ощущению «центра», особенно когда движение начинается от стопы.

Сначала вы можете обучать этому упражнению в отдельности, но по мере того, как становится все легче и легче синхронизировать мышцы стопы с мышцами тазового дна и живота, вы можете использовать его в качестве основы для многих других упражнений, особенно тех, которые требуют баланса или силы. Например, позже в этой главе вы столкнетесь с вызовом удержания равновесия, стоя на одной ноге. Попробуйте интегрировать внутренние мышцы стопы, используя навыки «Короткой стопы» применительно к опорной ноге.

Специалисты по движению могут обнаружить, что любые положения, требующие баланса на одной ноге (например, поза дерева в йоге) можно улучшить за счет интеграции «Короткой стопы». Это будет полезно для любой дисциплины, фокусирующейся на осевом удлинении, равно как и для упражнений, в которых сила генерируется для движения от пола, таких как приседания и выпады. Большой фокус внимания на стопе обязательно принесет свои дивиденды.

Это упражнение также может быть хорошим способом сосредоточиться на выравнивании осанки. Например, если таз или грудная клетка смещаются из-за постурального смещения,

такое нарушение выравнивания может повлиять на интеграцию «куполов». Это может быть хорошим упражнением для ощущения внутренних связей, которые позволяют правильное выравнивание.



Последовательность интеграции

7. Билатеральные подъемы на носки с разогнутыми коленями и мячом между медиальными частями пяточных костей

Следующее упражнение фокусируется на задней большеберцовой мышце и внутренних мышцах стопы, которые чрезвычайно важны для поддержания силы и высоты полукуполов.

- Положите мяч размером с теннисный на пол между пятками (рис. 9.8a).
- Найдите «треножник равновесия» стопы и почувствуйте равномерное распределение веса между тремя его точками.
- Удлините пальцы ног, чтобы они не вцеплялись в пол.
- Вы можете слегка придерживать одной рукой за стену или другую подходящую опору на уровне плеч. Однако не поддавайтесь

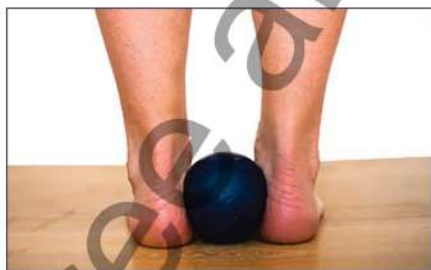


Рисунок 9.8a. Поставьте стопы параллельно, поместите мяч позади медиальных лодыжек и удерживайте его на месте, сжимая две пятки вместе.



Рисунок 9.8b. Активно погружайте пятки в мяч, чтобы создать «жесткий рычаг».

искусению использовать это в качестве рычага для подъема вверх.

- Поднитесь на головки плюсневых костей. При этом сожмите мяч между пятками, вызывая латеральный наклон пяточной кости и тем самым побуждая стопу к супинации и положению «жесткого рычага» (рис. 9.8b).
- Медленно опуститесь, ослабляя давление на мяч и позволяя пяточной кости вернуться в нейтральное положение. Пальцы ног не должны разгибаться, пока вы ищете свой «треножник равновесия».

Повторите упражнение 12 раз.

8. Опора на одну ногу — перенос веса на одну стопу

Положение стоя на одной ноге — неотъемлемая часть эффективной ходьбы. Способность вашей стопы адаптироваться к переносу веса и увеличению нагрузки при стойке на одной ноге жизненно важна не только для стоп, но и для укрепления мышц бедра и поясницы.

Мы также можем рассмотреть две разные стратегии исследования баланса — динамическую или статическую, — и обе могут быть одинаково полезными. Вначале, когда человек приступает к упражнениям на равновесие на одной ноге, стопа будет чувствовать себя неустойчиво и будет довольно сильно раскачиваться — это нормально и формирует начальные этапы укрепления

и проприоцептивного переобучения. Хотя целью может являться устойчивая стопа, для этого потребуются, чтобы остальное тело стабилизировалось над ней. Являясь источником большого количества проприоцептивной информации и единственным контактом между землей и телом, стопа постоянно реагирует на изменения центра тяжести тела. Тренировка баланса способствует формированию сильной и «умной» стопы, поскольку бросает вызов тонкому контролю внутренних мышц.

Этап 1

- Начните в положении стоя, расставив ноги чуть меньше, чем на ширину ваших бедер; руки могут либо просто свисать по бокам от туловища, либо, для большей обратной связи от таза, располагаться на гребнях подвздошных костей.
- Найдите «треножник равновесия» обеих стоп.
- Чтобы приподнять правую стопу от пола, перенесите вес на левую ногу и бедро. Задействуйте купол «Короткой стопы» под левой стопой для устойчивости и равновесия и медленно «отклеивайте» правую

стопу до кончика большого пальца ноги (сгибая правое бедро и колено). Оставьте кончик пальца ноги в легком соприкосновении с полом (см. рис. 9.9a).

Оцените это положение, прежде чем переходить к следующему этапу. Можно ли сохранить нейтральное положение пояснично-тазовой области? Как ваша левая стопа адаптировалась к дополнительной нагрузке? Была ли у вас пронация стопы и, следовательно, опущение медиальной продольной арки стопы? Если это так, то ваша ладьевидная кость опустится, и вы можете оценить, насколько она опускается и смещается, в соответствии с инструкциями, описанными в главе 8. Если это так, поработайте над укреплением и стабилизацией стопы, прежде чем переходить к следующему этапу.

Этап 2

- Слегка касаясь большим пальцем правой ноги пола, медленно поднимите правое колено, создавая большее сгибание в правом бедре и колене (рис. 9.9d). Если вы можете успешно сохранять равновесие и высоту арки



Рисунок 9.9. а) Пока вы удерживаете это положение, следите за тем, как ваш таз балансирует над опорной ногой. б и в) Вокруг тазобедренного сустава могут возникать многочисленные компенсации, которые вызывают чрезмерное опускание или смещение таза.



Рисунок 9.9d. Подъем стабилизирующего пальца ноги от пола создает дополнительную нагрузку на опорную конечность, поэтому для контроля и устойчивости используйте упражнение «купол стопы» применительно к опорной стопе.

стопы, усложните себе задачу, медленно опуская и поднимая правую ногу, чтобы слегка постучать по полу большим пальцем ноги. Добавление движения свободной ноги приносит в упражнение элемент дополнительной силы и контроля над моторикой.

Если вам трудно контролировать стопу во фронтальной плоскости, а пяточная кость чрезмерно наклонена медиально (пронация стопы), подложите под медиальную часть пяточной кости небольшую подпорку, например, тонкий дверной клин или сложенный небольшой кусочек ткани (рис. 9.9е), — это может помочь поставить стопу в более устойчивое положение. Продолжайте выполнять упражнение и заново оцените устойчивость стопы



Рисунок 9.9е. Дополнительная нагрузка может привести к пронации опорной стопы. Потеря арки стопы может повлиять на выравнивание как колена, так и бедра. Аккуратное размещение подпорки улучшит выравнивание стопы, колена и бедра.

и баланс таза. Помогло ли использование подпорки более успешно задействовать среднюю ягодичную мышцу и улучшить положение таза?

С другой стороны, если ваша пяточная кость чрезмерно наклонена латерально (супинация стопы), может оказаться полезным размещение подпорки латерально под пяточной костью (рис. 9.9ф), поскольку это позволит вам переносить больше веса на подошвенную поверхность стопы и, следовательно, получить больший контакт с полом. Это даст больше обратной связи от большого пальца стопы до медиальной части тазобедренного сустава.



Рисунок 9.9ф. Подложив подпорку, можете ли вы более эффективно переносить вес на медиальную сторону стопы?

9. Подъем на мысок на одной ноге

Бросьте себе новый вызов, поднимаясь на носок на одной ноге. Это отличный способ проработать подошвенные стибатели, внутренние мышцы и потренировать ваш баланс. Это упражнение сложнее, чем кажется, — для начала вы можете за что-то придерживаться.

- Найдите нейтральное положение стоп, действуя «треножник равновесия».
- Удлините пальцы ног, убедившись, что они не цепляются за коврик.
- Слегка придерживайтесь одной рукой, чтобы помочь себе сохранить равновесие. Не поддавайтесь искушению использовать опору для того, чтобы потянуть себя вверх!
- Поднимите правую стопу от пола позади себя (т. е. сгибая колено, но не сгибая бедро).



Рисунок 9.10. В положении жесткого рычага пяточная кость наклоняется латерально.

- Поднимитесь на головки плюсневых костей левой стопы, выводя ее в супинированное положение «жесткого рычага» (рис. 9.10).
- Медленно опускайтесь, сохраняя контроль и удерживая подушечки пальцев ног в контакте с полом.

Повторите упражнение 6 раз.

Это упражнение может быть довольно сложным для тех, у кого неустойчивая стопа и слабые подошвенные стибатели, поэтому при необходимости уменьшайте количество повторений. Те, кто ведет активный образ жизни, особенно бегуны, должны постепенно переходить как минимум к 3 подходам по 15 повторений на каждой стороне, стремясь к равной силе с обеих сторон, как предложено у Michaud (2021).

10. Подъемы на мысок на одной ноге с сопротивлением с латеральной и медиальной сторон (реквизит — эластичная лента)

Вы можете выбирать среди описанных ниже упражнений те, которые соответствуют тому или иному типу стопы. Более слабая стопа с тенденцией к пронации выиграет от укрепления глубокой задней группы (вариант 1), в то время как более супинированная стопа или стопа с нестабильным первым лучом получат больше пользы от укрепления латерального отдела (вариант 2).

Полезно иметь перед собой стул, чтобы слегка за него придерживаться.

Обвяжите свою эластичную ленту вокруг чего-то стабильного и неподвижного. Теперь сделайте на ленте петлю (достаточно большую, чтобы вы могли зашагнуть в нее ногой) и завяжите ее. Это может быть немного неудобно, и с этой точки зрения с длинной лентой будет проще. В моем примере для упрощения задачи я использовал зажим для пакетов, чтобы отрегулировать длину ленты.

Вариант 1

- Зашагните в петлю правой ногой так, чтобы лента была чуть выше голеностопного сустава.



Рисунок 9.11. а) Оберните ленту вокруг ноги и отрегулируйте ленту или свое исходное положение, чтобы увеличить или уменьшить натяжение ленты. б) Начните с легкого сопротивления и оценивайте, как вы поднимаетесь и опускаетесь. Отойдите подальше, чтобы усилить сопротивление.



Рисунок 9.12. Оберните ленту вокруг ноги, чтобы создать натяжение с медиальной стороны.

- Создайте сопротивление, отступив от опоры и натянув ленту, которая будет тянуть вашу ногу в латеральном направлении (рис. 9.11а).
- Балансируйте на правой стопе и поднимитесь на носок, удерживая стопу и голеностопный сустав в стабильном положении, при этом сопротивляясь латеральному натяжению ленты. Это упражнение поможет укрепить заднюю большеберцовую мышцу, длинный сгибатель большого пальца ноги и длинный сгибатель пальцев ноги глубокого заднего отдела. Дополнительный вызов с точки зрения равновесия также побудит вас задействовать внутренние мышцы стопы.
- Полезно, если во время выполнения упражнения специалист помогает клиенту и направляет его пяточную кость.

Повторите упражнение 6–8 раз. Не меняйте ногу до перехода к варианту 2.

Вариант 2

- Теперь повернитесь так, чтобы лента все еще была вокруг вашей правой ноги. Но натяжение создавалось уже с медиальной стороны.
- Сохраняя равновесие, снова поднимитесь на носок, сопротивляясь медиальному натяжению ленты. На этот раз вы бросаете вызов малоберцовым мышцам латерального отдела. Дополнительная нагрузка на длинную малоберцовую мышцу должна помочь ей стабилизировать первый луч и увести его в подошвенное сгибание во время фазы переката пальцев стопы при ходьбе.

Повторите данное упражнение 6–8 раз.

Повторите упражнения с латеральным и медиальным сопротивлением с левой ногой в ленте.

II. Небольшие сгибания коленей (реквизит — клиновидная подпорка)

Довольно часто на занятиях по движению и при выполнении физических упражнений



Рисунок 9.13а. Бугристость большеберцовой кости является полезным и легко обнаруживаемым костным ориентиром. Это небольшой округлый выступ прямо под надколенником, место прикрепления сухожилия четырехглавой мышцы. Выполнение сгибания колена перед зеркалом может быть полезным с точки зрения дополнительной обратной связи.

возникает соблазн разместить что-то между коленями, чтобы исправить положение ног в различных упражнениях. Если мы представим, что колено — это в большей степени «плавающий сустав», который находится в верхней части большеберцовой кости и внизу бедренной кости, это поможет нам понять, почему намного более полезными будут корректировки либо на уровне стопы (как показано ниже), либо в области таза (обычно путем задействования отводящих мышц). Также стоит иметь в виду, что паттерн одной стопы может отличаться от паттерна другой. Например, у человека с ротацией таза одна стопа может быть супинирована, а другая — пронирована, и мы можем сбалансировать ступни с помощью соответствующего использования клиновидных подпорок.



Рисунок 9.13б. Подпорка, расположенная под медиальной частью пяточной кости пронированной стопы, может помочь колену двигаться над центром стопы.

- Начните из положения, при котором ноги расставлены на ширине плеч, и почувствуйте «треножник равновесия» каждой стопы.
- Согните колени, удерживая спину вытянутой и в вертикальном положении. Почувствуйте, как ваши колени двигаются вперед над пальцами ног, а ваши голеностопные суставы выполняют тыльное сгибание. Сделайте так несколько раз, чтобы почувствовать движение в голеностопном суставе и удлинение мягких тканей заднего отдела.
- Повторите сгибание коленей и оцените траекторию движения бугристостей большеберцовых костей, — возможно, вам для этого потребуется зеркало. Проходят ли они нейтрально над второй плюсневой костью, медиально по направлению к большому пальцу стопы (пронация) или латерально по направлению к третьему пальцу стопы (супинация)? Одинакова ли эта траектория для обеих ног?

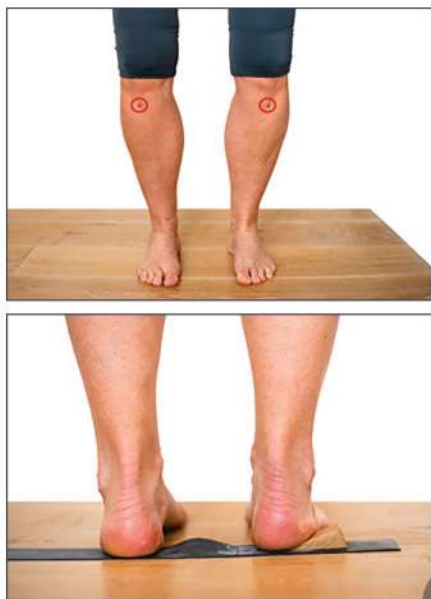


Рисунок 9.13с. Размещение клина латерально у супинированной пяточной кости может помочь разблокировать стопу и улучшить траекторию движения колена.

Повторите данное упражнение 6 раз.

Для многих людей это упражнение будет сложным не из-за положения бутристости большеберцовой кости, а из-за ограниченного диапазона движения голеностопного сустава. Напряжение как в заднем, так и в латеральном отделах каждой ноги может уменьшить диапазон движений в голеностопном суставе при тыльном сгибании. Мы еще вернемся к этому далее в этой главе в упражнениях по мобилизации стопы.

- Если бутристость большеберцовой кости проходит медиальнее, над большим пальцем ноги, поместите опору под медиальную сторону заднего отдела стопы. Это приведет пяточную кость в более нейтральное положение с меньшим медиальным наклоном. Теперь повторите упражнение и следите за положением бутристости большеберцовой кости, когда переходите к тыльному

сгибанию. Изменилось ли оно? Может ли бутристость большеберцовой кости оставаться на одной линии со второй плюсневой костью, а стопа — сохранять более нейтральное положение?

Повторите данное упражнение 6 раз.

- Если бутристость большеберцовой кости проходит латерально к третьему пальцу, поместите подпорку под латеральную сторону заднего отдела стопы, попытайтесь привести пяточную кость из латерально наклоненного в нейтральное положение. Продолжайте двигаться с согнутыми коленями, наблюдая, исправилось ли положение бутристости большеберцовой кости.

Повторите данное упражнение 6 раз.

12. Тренировка большого пальца ноги — мышца, отводящая большой палец стопы (реквизит — короткая линейка)

Укрепление этой мышцы — это марафон, а не спринт. Вам нужно будет регулярно практиковаться, чтобы добиться некоторого контроля. Первоначальная мобилизация с помощью указательного пальца может помочь стимулировать сенсомоторный контроль. Многие клиенты спрашивают, что они могут сделать, чтобы у их стоп не усугублялся бурсит. Наряду с данным упражнением работайте также посредством упражнения «Короткая стопа» (упражнение 9.6). Для получения результатов будьте готовы к тому, что оба эти упражнения необходимо будет выполнять ежедневно.

Прежде чем приступить к данному упражнению, полезно оценить активный и пассивный диапазон движений большого пальца ноги. Обратитесь к описаниям пассивной оценки и конечного ощущения, приведенным в главе 8.

Это упражнение будет вызовом для тех, у кого слабая стопа и уже прочно сформировавшийся бурсит, но тем не менее это упражнение стоит того. При медиальном отклонении большого пальца стопы укрепление мышцы,

отводящей большой палец стопы, поможет предотвратить прогрессирование вальгусной деформации до стадии нарушения стабильности стопы.

Этап 1

- Начните с правой стопы: положите короткую линейку (или кусок дерева) вдоль медиальной стороны стопы или проведите линию на полу или половине.
- Данное измерение даст вам хорошее представление о том, что происходит с головкой вашей первой плюсневой кости. Отклоняется ли ваш большой палец стопы от линейки вправо (рис. 9.14а), указывая на бурсит?



Рисунок 9.14а. Пример смещения большого пальца стопы при бурсите. Это может свидетельствовать о слабости мышцы, отводящей большой палец стопы.



Рисунок 9.14б. Прижмите подушечку большого пальца стопы к полу, чтобы задействовать мышцу, отводящую большой палец стопы.

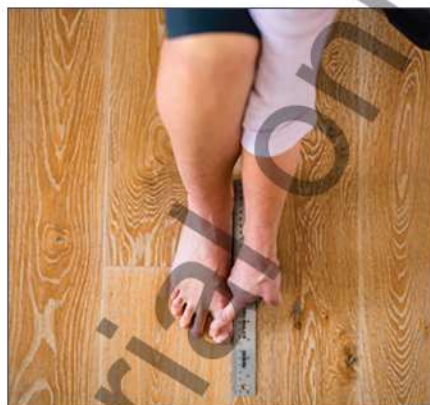


Рисунок 9.14с. Чтобы помочь задействовать мышцу, отводящую большой палец стопы, вы можете помочь рукой, направляя и тренируя большой палец стопы.

- Используя внутренние мышцы стопы, попытайтесь приподнять подушечку большого пальца стопы и переместить ее медиально по направлению к линейке (рис. 9.14б). Удерживайте его там, пока считаете до 5, и затем отпустите. Здесь стопа может начать совершать множество коварных компенсаций. Удерживайте головку первой плюсневой кости в контакте с полом и не допускайте супинации стопы.

Повторите данное упражнение 6-8 раз.

Если большой палец стопы почти не двигается, оставьте линейку на месте и встаньте на колени так, чтобы правая нога все еще находилась впереди. Указательным пальцем правой руки аккуратно отведите большой палец ноги от второго (рис. 9.14с). Удерживайте его там в течение 5 секунд и позвольте ему вернуться естественным образом в исходное положение.

Этап 2

Если вы уже можете самостоятельно двигать большим пальцем ноги к линейке так, чтобы



Рисунок 9.14d У вас достаточно контроля, чтобы удерживать большой палец на месте и раздвигать другие пальцы?

стопа при этом не уходила в компенсацию, попробуйте добавить следующий этап.

- Как только большой палец оказался в отведении и подушечка пальца слегка прижимается к полу, попытайтесь развести пальцы со второго по пятый латерально (без движения большого пальца), см. рис. 9.14d. У вас должно быть ощущение, как будто ваш большой палец застрял на месте, а другие пальцы двигаются и расходятся в стороны с ощущением расширения передней части стопы.

Повторите данное упражнение 4–8 раз.

Когда, делая это, вы физически удерживаете большой палец ноги на месте, — это уже само по себе является хорошим началом



Рисунок 9.14e Распорки или корректоры для пальцев вставляются между пальцами и могут дать вам ощущение разделения и стабильности.

для последующего более сложного движения пальцев. Вы пытаетесь создать отведение пальцев ног. Насколько ваши пальцы при этом разъединяются и расходятся? Или же они принимают положение «молотка» или «когтя»?

Распорки для пальцев/корректоры пальцев

На рынке доступно множество продуктов, предназначенных для того, чтобы помочь вам привести пальцы ног в более нейтральное положение. Пальцы смещаются по разным причинам и препятствуют правильному функционированию и стабильности стопы. Когтеобразные пальцы, молоткообразные пальцы и бурсит — все это формы смещения пальцев, которые можно улучшить с помощью распорок для пальцев (рис. 9.14e). Если ваши пальцы ног при выполнении упражнений просто склеиваются друг с другом и не двигаются по отдельности, то добиться прогресса вам может помочь работа над расхождением пальцев ног.

■ УПРАЖНЕНИЯ НА МОБИЛИЗАЦИЮ СТОПЫ

Эластичность мягких тканей можно использовать только в том случае, если стопы и голеностопные суставы обладают достаточной силой и мобильностью. Приведенные выше упражнения устраняют многие типичные проблемы, поэтому теперь нам нужно обеспечить достаточный диапазон движений в основных суставах.

Нередко считают, что высокая арка стопы — это хорошо, однако если ваша стопа не может выйти из супинированного положения и расширяться в более открытое положение, ваши мягкие ткани не смогут поглощать силу удара и ваша стопа будет изо всех сил пытаться установить оптимальное взаимодействие с землей. Зажатая, ригидная, закрытая или чрезмерно супинированная стопа может свидетельствовать о сниженной мобильности и адаптивности.

Представьте, что вы прыгаете со ступеньки; когда вы приземляетесь, вы хотите, чтобы ваша стопа эластично раскрылась, а сила удара

передалась в крупные мышцы и фасции ноги, бедра, таза и так далее. Тенсегрити вашего тела зависит от способности ваших стоп запускать

последовательную реакцию тела на удар, и ниже мы изложили предложения по увеличению мобильности и облегчению движений.



Рисунок 9.15a. Те, у кого высокая арка стопы, могут обнаружить прикрепление задней большеберцовой мышцы, а длинный и короткий сгибатели пальцев ноги дадут некоторую информативную обратную связь при надавливании на них.

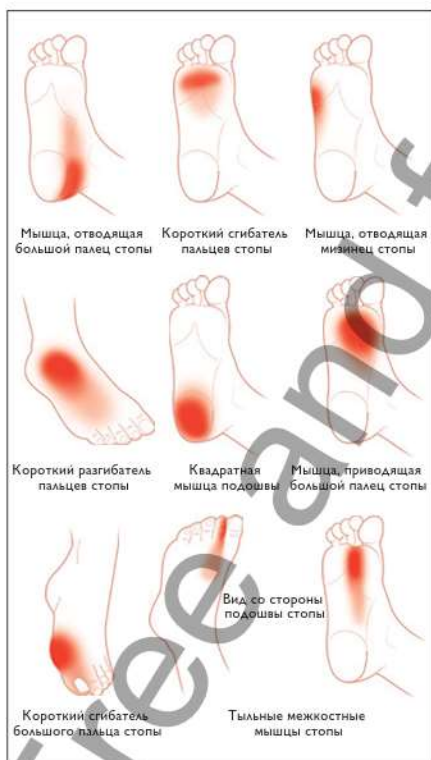


Рисунок 9.15b. Триггерные точки стопы

13. Общее освобождение стопы

Повторите упражнение 9.1. Найдите соответствующие точки на подошве каждой стопы и более детально помассируйте их с помощью мяча.

14. Мобилизация голеностопного сустава — самостоятельная мобилизация стопы

Выполняя круговые движения в этом упражнении, постарайтесь оценить качество движения. Вы чувствуете скованность или легкость движений? Какие ощущения возникают в костях и суставах, мышцах и соединительной ткани, когда вы выполняете круговое движение? Остаются ли кости жесткими и сжатыми или же возникает ощущение, будто они плавают в эластичной сети? Каковы ваши ограничения? Чувствуете ли вы разницу между ограничениями мягких тканей и костными ограничениями?

Расположив правую стопу на левом бедре, разместите пальцы левой руки между пальцами стопы. Начните с мизинца руки, расположив его между пятым и четвертым пальцами стопы, и таким образом поместите по пальцу руки



Рисунок 9.16. Используйте кисть руки, чтобы мобилизовать стопу и голеностопный сустав, одновременно используя пальцы руки в качестве «разделителей» для пальцев ног.

между каждыми двумя пальцами стопы, продвигаясь к большому пальцу ноги (рис. 9.16). Ваш большой палец руки обхватывает сбоку ваш первый ПФС.

- Начните двигать стопу по кругу по часовой стрелке, запуская движение от голеностопного сустава. Пусть голеностопный сустав ведет движение, а рука остается пассивной. Нарисуйте красивый полный круг.

Выполните так 6 круговых движений; затем измените направление, выполняя круги против часовой стрелки.

- Теперь начните запускать движение левой рукой, позволяя голеностопному суставу оставаться пассивным.

Повторить по 6 кругов в каждую сторону каждой ногой.

15. «Выжимание» стопы (эверсия и инверсия) — самостоятельная мобилизация стопы

Это упражнение поможет вам почувствовать противоположные движения передней и задней частей стопы и оценить общую подвижность стопы (или ее отсутствие). Есть ли ощущение, что в одном направлении движение происходит легче, чем в другом? Чувствуете ли вы, будто в одном из этих направлений у вас словно слепое пятно или сенсомоторная амнезия (СМА)?

Начните в положении сидя, скрестив одну ногу поверх другой. В данном примере начните со скрещивания правой ноги поверх левого бедра.

- Мягко поверните пяточную кость от себя (рис. 9.17a) к полу и подтяните среднюю



Рисунок 9.17a, b. Пусть правая стопа остается как можно более пассивной. Ваша правая рука направляет переднюю часть стопы, а левая рука направляет заднюю часть стопы. Слегка меняйте положение правой руки, чтобы каждый поворот действовал на разные участки средней и передней части стопы. Обратите внимание на то, как рука обхватывает пяточную кость.

и переднюю части стопы к себе, затем выполните обратное движение в противоположном направлении, притянув пяточную кость к себе и повернув среднюю часть стопы от себя (рис. 9.17b).

- Поменяйте ноги. Теперь ваша левая рука направляет переднюю и среднюю часть стопы, а правая рука лежит на пяточной кости. Продолжайте так же, как описано выше.

Повторяйте «выжимающее» движение с каждой стопой.

Двигайте стопы так, как будто вы мягко поглаживаете кости под руками, создавая плавность и легкость. Не тяните и не нажимайте слишком сильно, и обратите внимание, что во избежание раздражения нервов вдоль медиальной стороны лучше направлять

* СМА — «это потеря памяти о том, как ощущаются определенные группы мышц и как их контролировать. Поскольку это происходит в центральной нервной системе, мы не осознаем этого, но это влияет на нас до самой глубины души». Ханна (2004), *Соматика*.

пяточную кость ладонью, а не надавливанием большим пальцем руки.

16. Удлинение разгибателей пальцев стопы и высвобождение переднего отдела

Передний отдел голени содержит мышцы, обеспечивающие тыльное сгибание голеностопного сустава, следовательно, они оказывают сопротивление подошвенному сгибанию. Их положение на пути вниз по ноге сохраняется за счет удерживателя (см. главу 6). Ограниченный диапазон движений в голеностопном суставе можно частично отнести к деятельности этой группы мышц и ответственного за нее удерживателя. Это упражнение направлено на удлинение этих мышц

и улучшение их скольжения под манжетой или ремнем удерживателя.

Встаньте «в разножку» у стены (которую можно использовать для поддержания баланса) так, чтобы правая стопа оказалась сзади в подошвенном сгибании с подогнутыми пальцами стопы (рис. 9.18a).

Этап 1

- Сместите свой вес вперед за счет таза и ребер, чтобы вы почувствовали, как будто оставили правую стопу позади. Правая стопа остается на месте, и вы должны почувствовать растяжение в переднем отделе голени. Чтобы полностью ощутить раскрытие передней части правой ноги, удерживайте таз в небольшом заднем наклоне, когда вы переносите вес вперед.



Рисунок 9.18a. Не давите пальцами правой стопы прямо в пол — старайтесь, чтобы правая стопа оставалась достаточно легкой. Правая рука, расположенная позади таза, будет напоминать вам начинать движение за счет смещения таза вперед в заднем наклоне.



Рисунок 9.18b. Добавление небольшого сгибания колена передней ноги увеличивает требования к балансу с левой стороны и дает вам еще одну возможность попрактиковаться в выполнении «Короткой стопы». Сохраняйте задний наклон таза при сгибании колена.



Рисунок 9.18с. Сохраняйте задний наклон таза назад (визуализируйте, как с вашего копчика свешивается грузик), когда удерживаете правую стопу.



Рисунок 9.18д. Если вы не можете дотянуться до стопы сзади, то оберните вокруг голени эластичную ленту или ремень для йоги, чтобы облегчить растяжку.

- Удерживайте переднее положение, считая до четырех, а затем отпустите.

Повторите упражнение 4 раза и затем сделайте шаг назад.

- Выполните этапы 2 и 3, прежде чем сменить сторону и приступить к растяжке левой ноги.

Этап 2

- Оставаясь в вышеуказанной стойке, согните пальцы правой ноги в подошвенное сгибание и с опущением, будто тянете стопу вперед, медленно сгибайте левое колено (рис. 9.18б). Удерживайте спину в вертикальном положении, а таз — в заднем наклоне. Иногда это может усилить растяжку. Придерживайтесь за стену, если это необходимо.

- Перейдите к этапу 3, прежде чем поменять сторону.

Этап 3

- Вернитесь из последнего сгибания колена, поднимите правую стопу от пола и обхватите правой рукой переднюю часть стопы (см. рис. 9.18с). Ощутите пространство между большеберцовой костью и стопой. Если вы будете тянуть рукой стопу, одновременно оказывая стопой сопротивление, это добавит в растяжку эффект постизометрической релаксации*.
- Вы будете растягивать весь передний отдел правой ноги.

* Постизометрическая релаксация происходит после удерживаемого сокращения и часто используется в качестве техники растяжки для областей с высоким тонусом.

- Задержитесь в этом положении, пока не досчитаете до 8, прежде чем перейти к пассивной растяжке.

Теперь поменяйте сторону.

17. Тыльное сгибание голеностопного сустава на коленях и подошвенное сгибание

Встаньте на колени, расположив правую ногу впереди левой. При необходимости для большего комфорта вы можете подложить под колено задней ноги подушечку.

Убедитесь, что ваше правое колено находится прямо над голеностопным суставом, так что большеберцовая кость центрирована относительно таранной кости (рис. 9.19а). Вы можете либо расположить руки на полу по обе стороны от себя, либо на блоках



Рисунок 9.19с Прижимайте правую пятку к полу, когда выводите переднее колено вперед. Если вы чувствуете, что пятка начинает приподниматься, значит, вы зашли слишком далеко.

для йоги — это даст некоторую поддержку и ощущение баланса.

- Сместите свой вес вперед, чтобы тем самым создать тыльное сгибание в голеностопном суставе. Двигайтесь вперед до тех пор, пока пяточная кость не оторвется от пола (рис. 9.19с). Это движение натягивает подошвенную фасцию и ахиллово сухожилие, способствуя силовому замыканию стопы.

Те, у кого гипермобильные ткани, должны тщательно следить за тем, что они не доходят до своего «конечного диапазона» костной чувствительности в коленном и голеностопном суставах. Тем, кто менее подвижен, следует попытаться удерживать пяточную кость на полу.

- Теперь сместите таз назад, выпрямляя правое колено. Ваш голеностопный сустав перейдет в подошвенное сгибание. Удерживая пальцы ног на полу при движении назад, вы активизируете внутренние мышцы и снова создадите силовое замыкание стопы, но на другом уровне тканей, чем во время движения тыльного сгибания, описанного выше.
- Медленно повторите оба движения назад и вперед, обращая внимание на то, как двигается над голеностопным суставом бутригость большеберцовой кости.



Рисунок 9.19а и б а) Начните с положения на коленях 90/90, правая нога впереди левой, руки по обе стороны от вас на полу. б) Используйте блоки для йоги в качестве опоры для рук, чтобы избежать необходимости чрезмерно тянуться вниз и не допустить сдвигания грудной клетки.



Рисунок 9.19d. Прижимайте пальцы ног к полу, когда отводите таз назад, разгибая переднее колено. Если пальцы приподнимаются, значит, вы зашли слишком далеко.



Рисунок 9.19e. Оцените положение бугристости большеберцовой кости, когда вы переходите в тыльное сгибание, — перемещается ли она в нейтральное положение над вторым пальцем стопы?



Рисунок 9.19f. Улучшилось ли ваше выравнивание после установки подпорки под медиальную часть пяточной кости?

В случае пронированного типа стопы при смещении вперед бугристость большеберцовой кости с большей вероятностью будет отклоняться медиально (т. е. к большому пальцу). При супинированном типе стопы бугристость большеберцовой кости перемещается латерально, по направлению к пальцам стопы с третьего по пятый.

Работа с использованием реквизита

Пронированный тип стопы

- Поместите маленькую подпорку (клин или свернутый небольшой кусок ткани) под медиальную сторону пяточной кости. Повторите смещения вперед и назад и посмотрите, сможете ли вы больше направить бугристость большеберцовой кости на второй палец.

Супинированный тип стопы

Если ваш большой палец отрывается от пола, поместите подпорку под латеральную сторону пяточной кости или латеральную сторону средней части стопы, чтобы попытаться создать большее «раскрытие» костей. Повторяйте смещения и наблюдайте, сможет ли стопа более свободно адаптироваться к движению, которое вы создаете в голеностопном суставе.

Мы уже делали это движение в упражнении 9.11, но эта вариация увеличивает диапазон движения большеберцовой кости как кзади, так и кпереди. Вам может быть полезно наблюдать за адаптацией стопы и при тыльном сгибании, и при подошвенном сгибании голеностопного сустава.

18. Удлинение с помощью блока для йоги

Это упражнение актуально как для укрепления, так и для мобилизации стопы и комплекса голеностопного сустава. При слабой стопе и голеностопном суставе сосредоточьтесь как на подъеме, так и на нижней фазе



Рисунок 9.20а и б). В этой растяжке икроножных мышц удерживайте пальцы ног словно вросшими в кирпич.



Рисунок 9.20с. Упритесь пятками в мяч и снова поднимитесь на носки.

Рисунок 9.20д. Согните колени и сосредоточьтесь на растяжке камбаловидной мышцы.

движения, уделяя особое внимание сжатию мяча. Те, кто нуждается в большей длине, могут потратить немного больше времени на растяжки в нижней части движения.

Кирпичи для йоги могут различаться по размеру. Глубина блока для йоги здесь составляет около 8 см (3 дюймов).

Встаньте на кирпич для йоги и поместите мяч между пятками.

- Сначала придерживайтесь за стену, когда вы еще только оцениваете свой баланс, медленно опуская пятки к полу; удерживайте пальцы ног длинными и заземленными в кирпич. Удерживайте ноги прямыми, чтобы сосредоточиться на растяжении заднего отдела и икроножной мышцы. Задержитесь в этом положении, медленно считая до 5.
- Поднимитесь на носки, сжимая при подъеме мяч (рис. 9.20b). Это повторение подъема на носки, которое мы выполняли ранее. Ослабьте «сжатие» на взврате.
- Снова уведите пятки к полу. Опустив пятки, слегка согните колено, чтобы расслабить икроножную мышцу и сосредоточить растяжение на камбаловидной мышце. Задержитесь в этом положении, сосчитав до 5, и снова поднимитесь.
- Каждый раз, опуская пятки, чередуйте прямые ноги для акцента на икроножную мышцу и слегка согнутые колени для смещения фокуса на камбаловидную мышцу.

Повторите упражнение 8 раз.

19. Коленные часы — мобилизация подтаранного сустава (реквизит — маленький мягкий мяч)

- Встаньте, выставив правую ногу вперед и расположив мяч прямо под подтаранным суставом.
- Глядя вниз, начните рисовать правым коленом круг вокруг правого голеностопного сустава.

Когда колено выдвигается в положение на 3 часа, ваш подтаранный сустав уходит в инверсию.



Рисунок 9.21 Поместите мяч под стопу в месте пересечения таранного и подтаранного суставов (см. главу 6 и оценки в главе 8). Мяч должен действовать как точка переката между осями, чтобы обеспечить свободу для тыльного и подошвенного сгибания, а также инверсии и эверсии.

Теперь переместите колено в положение на 12 часов, и ваш голеностопный сустав перейдет в тыльное сгибание. Приблизительно к 9 часам ваш подтаранный сустав выполнит эверсию, и, наконец, возвращение в положение на 6 часов переместит ваш подтаранный сустав в подошвенное сгибание.

Двигайтесь медленно и методично, чувствуя, как движение массирует подтаранный сустав.

Повторите четыре раза, затем проделайте все то же самое по часовой стрелке. Почувствуйте разницу в стопах, прежде чем двигаться дальше.

Смените сторону, на этот раз выставив вперед левую ногу и расположив мяч прямо под подтаранным суставом.

- Начните рисовать круг, перемещая левое колено латерально в положение на 9 часов (ваша стопа при этом переходит в инверсию), затем на 12 часов и в тыльное сгибание голеностопного сустава, медиально на 3 часа в эверсию и назад на 6 часов и в подошвенное сгибание в голеностопном суставе.

Повторите 4 раза по часовой стрелке и 4 раза против часовой стрелки.

Все вышеперечисленные упражнения разработаны как путешествие для начального уровня работы со стопой. Вы оцените, на что способна ваша стопа и какие у вас могут быть ограничения. Вооружившись этой информацией, вы можете приступить к более полному изучению

тех упражнений, которые принесут пользу вам и вашему типу стопы. Регулярная практика и «приведение в порядок» необходимы для всех стоп и являются отличным способом внести небольшие или глобальные изменения в структуру вашего скелета. Никогда не недооценивайте способность стопы увеличивать или уменьшать ваш общий двигательный потенциал.

Ниже приведены три короткие последовательности. Одна из них предназначена для общего здоровья стопы, и еще по одной — для каждого типа стопы. Номер упражнения, соответствующий указанному в книге, указан в скобках в конце каждого перечисленного ниже упражнения.

Регулярная практика этих 10–15-минутных последовательностей поспособствует лучшему структурному балансу ваших стоп.

Практика для общего здоровья стоп

1. Общее пробуждение стопы (1)
2. Циферблат стоп, цифра 8 и «треножник равновесия» (2)
3. Шаг вперед — разгибание пальцев стопы (3)
4. «Короткая стопа» (купол) (6)
5. Билатеральные подъемы на носки с прямыми коленями и мячом между пятками (7)
6. Опора на одной ноге — перенос веса на одну ногу — с подъемом колена для баланса (8)
7. Удлинение с помощью блока для йоги (18)



Практика для стопы, которая нуждается в общем укреплении

1. Общее пробуждение стопы (1)
2. Синхронизация стоп, цифра 8 и «треножник равновесия» (2)
3. Шаг вперед — разгибание пальцев стопы (3)
4. Билатеральные подъемы на носки с согнутыми коленями (5)

5. «Короткая стопа» (купол) (6)
6. Билатеральные подъемы на носки с прямыми коленями и мячом между пятками (7)
7. Подъемы на носок на одной ноге (9)
8. Подъемы на носок на одной ноге с латеральным сопротивлением от эластичной ленты (10a)
9. Мышца, отводящая большой палец стопы, — тренировка большого пальца ноги (12)
10. Небольшие сгибания коленей и небольшие приседания с подпорками (11)
11. Тыльное и подошвенное сгибание голеностопного сустава, стоя на коленях, с подпорками (17)
12. Удлинение с помощью йога-блока, растяжка с прямыми коленями (18)



Практика для стопы, которая нуждается в освобождении

1. Общее пробуждение стопы и освобождение стопы (1)
2. Синхронизация стоп, цифра 8 и «треножник равновесия» (2)
3. Шаг вперед — разгибание пальцев стопы (3)
4. Разгибатель пальца стопы и высвобождение переднего отдела (16)
5. Коленные часы — массаж подтаранного сустава (2)
6. Мобилизация голеностопного сустава (14)
7. «Выжимание» стопы (15)
8. Двусторонние подъемы на носки с прямыми коленями (4)
9. Подъем на носок на одной ноге с медиальным сопротивлением (10b)
10. Удлинение с помощью блока для йоги (сосредоточиться на растяжке) (18)
11. Тыльное сгибание и подошвенное сгибание голеностопного сустава, стоя на коленях (с подпоркой для пронации стопы) (17)



СОЗДАНЫ ДЛЯ ЖИЗНИ

Хороший день начинается
с идеальной обуви.

Автор неизвестен

■ ВВЕДЕНИЕ

Это правда, что жизнь становится лучше, когда вы носите идеальную обувь. Но что определяет «идеальную обувь»? Правильная посадка? Идеальный фасон и цвет? Правильная высота? Комфорт?

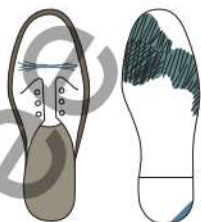


Рисунок 10.1. Типичный, нормальный паттерн износа

Возможно, этот вопрос напрямую связан с нашими эмоциями, и наши ответы будут различаться в зависимости от возраста, происхождения, гендерной идентификации, времени суток, культуры, религии, события, ради которого мы одеваемся, событий, для которых мы надеемся раздеться...

Едва ли найдется много более провокационных предметов одежды, чем наша обувь. Как напоминает нам Кристиан Лабутен, мастер сексуально привлекательной обуви: «Обувь меняет язык вашего тела и отношение. Она возносит вас как физически, так и эмоционально». Но правда и в том, что неправильно подобранный ботинок может сломить нас, и я уверен, что многие из нас сталкивались с физической болью от неудобной обуви, равно как и с эмоциональными страданиями из-за того, что не соответствовали модному тренду.

Обувь выполняет две основные функции: это дань моде, используемая для подачи различных социальных сигналов, и это то, что обеспечивает защиту нашим стопам. К сожалению, эти две функции стали почти взаимоисключающими категориями. Можно сказать, что модная обувь меняет форму наших стоп, так что от нее больше вреда, чем пользы.



VIVOBAREFOOT

Рисунок 10.2. Естественная стопа должна быть широкой в области пальцев, но большинство модных туфель сужаются к пальцам, тем самым меняя форму стопы. Изображение предоставлено Vivobarefoot.

Трудно найти обувь, соответствующую форме стопы, но из-за давления моды довольно легко найти стопу, подстроившуюся под форму обуви (см. рис. 10.2).

Есть стили и бренды обуви, которые подходят нашим стопам, а есть такие, которые жмут, впиваются и деформируют их. В этой заключительной главе мы исследуем анатомию обуви и то, как она может работать в соответствии или вопреки естественному ритму нашей стопы. Я уверен, что для вас не будет сюрпризом узнать, что для большинства производителей обуви идеальная механика больше не является главной целью, поэтому небольшое знание конструктивных особенностей обуви может помочь вам сделать более удачные покупки.

Он заставил Золушку сесть и, надев туфельку на ее маленькую ножку, обнаружил, что она наделась очень легко и подошла ей так, словно была сделана из воска.

Шарль Перро

Редко кому везет так же, как той девушке, которую спасли с кухни внизу, поскольку модная обувь требует некоторого компромисса со стороны наших ног. Чаще всего мы готовы

искривить свои стопы, чтобы влезть в какую-то понравившуюся нам обувь, вместо того чтобы уйти и найти обувь с лучшей посадкой. Хотя мы не склонны принимать радикальные меры по обрезанию телесной плоти, как это сделали сводные сестры Золушки, мы часто виновны в том, что злоупотребляем адаптивностью наших стоп и ставим под угрозу функцию стопы, делая выбор в пользу формы обуви.

Если обувь не подходит, значит ли это, что нам нужно менять стопу?

Глория Стайнем

Именно повторяющееся и регулярное ношение обуви, в основе которой лежит форма, приводит к образованию стопы в форме обуви. Как говорили китайцы, наши стопы могут принимать форму их оболочек. К счастью, число минималистских обувных компаний увеличилось, и они быстро расширяют свой маркетинг и технологии для поддержки производства экологически чистых, возобновляемых и подходящих веганам вариантов. Обувь, выпускаемая такими брендами, как Vivobarefoot, Lems и Merrell, учитывает при проектировании и производстве форму стопы и ее естественные функции.

Минималистская обувь по-прежнему составляет лишь небольшую часть обувного рынка, и этим небольшим брендам приходится конкурировать с мировыми брендами, которые в 2018 году произвели 66,3 млн пар обуви*. Это огромное количество обуви, кожи, клея, пластика и каркасов, а также огромные прибыли и маркетинговые возможности.

Как и вся остальная индустрия моды, торговля обувью изобилует отходами, загрязнением окружающей среды и эксплуатацией; экономика должна являться частью нашего выбора как потребителей. У нас есть право выбирать бренды, которые

* Данные согласно Hoskins, 2020.

нас поддерживают, — те, которые не загрязняют окружающую среду, не используют токсичные клеи и не эксплуатируют своих работников; те, которые платят налоги и поддерживают благосостояние своих рабочих.

Наши доходы подобны нашей обуви; если они слишком малы, они нас раздражают и ущемляют; но если они слишком велики, мы запинаемся и спотыкаемся.

Джон Локк

Однако выбор обуви не так прост. На него могут оказывать влияние экологические и этические соображения, биомеханические факторы, психосексуальные и эмоциональные элементы. Так, например, в своем обзоре Barnish и др., 2017, обнаружили, что многие женщины по-прежнему часто носят высокие каблуки, несмотря на известные значительные биомеханические последствия и повышенную вероятность проблем с опорно-двигательным аппаратом. Исследователи отметили, что определенную роль сыграло как «скрытое, так и явное принуждение» — женщины выбирают ношение каблуков как по своей собственной воле, так и ради поощрения другими. Основным фактором в этой динамике стала повышенная воспринимаемая привлекательность владелицы обуви. Авторы осторожно указали, что никого нельзя принуждать «носить высокие каблуки против их воли».

Однако свобода воли — не такая простая штука, и все мы находимся под давлением множества факторов, влияющих на наш выбор. Исследование взрослых в Великобритании, проведенное в 2016 году, показало, что люди с «более низким ростом и более высоким ИМТ, по наблюдениям, связаны с показателями более низкого социально-экономического статуса». (Turrell и др., 2016). Хотя у мужчин была большая корреляция по росту, а у женщин — по ИМТ, посыл был ясен — если вы хотите

преуспеть в жизни, станьте выше и стройнее. Ношение высоких каблуков может создать иллюзию и того, и другого, и в мире, где рост и внешний вид явно ценятся выше биомеханики, важно, чтобы индивидуальный выбор был неограниченным и свободным от суждений.

■ АНАТОМИЯ ОБУВИ

Большинство туфель имеют такую форму, как будто стопы созданы для обуви.

Мококома Мохоноана

Обувь — это промежуточное звено между стопой и землей, и особенности обуви будут влиять на все происходящие реакции. По оценкам, самая ранняя обувь была разработана около 40 000 лет назад (Trinkaus and Shang, 2008) и, скорее всего, была создана для защиты стопы, а не с учетом модных тенденций. Однако интересно отметить, что исследователи основывали свои предположения на том факте, что примерно в это время произошло уменьшение длины пальцев ног. Является ли эта сниженная прочность фаланг признаком меньшего использования пальцев ног или того, что они были заключены в элегантные жесткие носы ботинок? Кто знает?

Существует множество временных маркеров развития «нарушений несоответствия» — расхождение между изобретенными нами культурными адаптациями и эволюционной анатомией и физиологией, развившимися за миллионы лет.

С изобретения сельского хозяйства 10 000 лет назад, через промышленную революцию 150 лет назад и повсеместное распространение персональных компьютеров и коммуникационных устройств за последние 20 лет каждое изменение влияло на то, как мы используем и обращаемся со своим телом. Нам пришлось приспособить нашу пищеварительную систему к новым видам пищи, нам пришлось



Рисунок 10.3. Общий вид обуви в стиле Gibson/Derby.

адаптировать наш культурный и семейный распорядок, чтобы вписаться в фабричную жизнь, и теперь мы должны приспособить наши тела к вездесущим средствам связи. Изобретение обуви предшествовало всему этому: проблема втискивания ног в обувь уже не нова.

Наше путешествие по анатомии обуви приведет нас от касания пяткой до схода с пальцев стопы, а также к повторению четырех перекатов стопы, на которые мы ссылались в тексте. Хотя мы не можем изучить все стили обуви, основные издержки и выгоды одинаковы для разных типов обуви. Не существует идеального стиля — даже минималистская обувь для каких-то стоп будет иметь свои издержки, — поэтому мы должны помнить о способностях конкретной стопы, которую мы помещаем в ту или иную обувь, и искать наиболее подходящее соответствие. Это соответствие должно быть не только в размере, но и в возможностях.

Ударные силы при касании пяткой необходимо контролировать, и, как мы видели, эти силы будут распространяться во многих направлениях. Обувь будет влиять на управление этими силами. Первоначальный удар может амортизироваться материалом каблука, и то, как каблук отводит удар в стопу, будет зависеть от угла и формы каблука обуви. Острый край ботинка Gibson и то, на каком расстоянии он находится от пяточной кости,

будет заставлять стопу уходить в подошвенное сгибание быстрее, чем это происходит обычно при касании пяткой, и передней большеберцовой мышце придется работать больше, чтобы замедлить стопу при ее опускании (см. рис. 5.2). Каблук с острыми краями может быть причиной болей в передней части голени, и это следует учитывать при клиническом обследовании.

Когда стопа оказывается на земле и на нее переносится вес, пяточная кость должна наклоняться. У большинства туфель есть закругленная чашечка для пяточной кости, и этот «задник» может различаться по размеру. Если задник слишком тугой, он не пускает пяточную кость в эверсию (триптер для пронации); если он слишком свободный, то неконтролируемый наклон пяточной кости может привести к трению кожи о затвердевший материал задника, вызывая раздражение. Повышенный износ вокруг задника также говорит о нестабильности пяточной кости. Хотя задник может быть полезным стабилизатором пяточной кости, здесь возникают трудности с получением нужной поддержки без предотвращения пронации.

Некоторая пронация необходима, поскольку она способствует эффективности походки, а стопа должна поглощать ударные силы. Чтобы поглотить часть силы, костям стопы нужно место для распределения, которое необходимо для пронации, что приводит нас к следующим

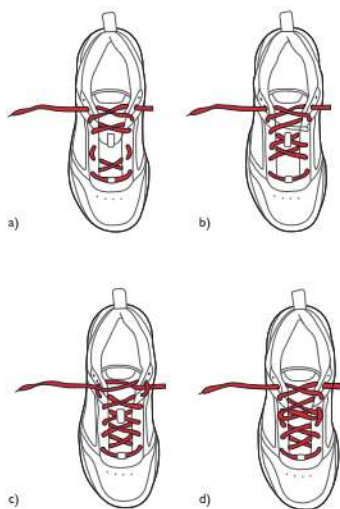


Рисунок 10.4. Для разных типов стопы можно использовать разные схемы шнуровки. а) Супинированная стопа с высоким подъемом выигрывает от зазоров в шнуровке посередине, которые помогают уменьшить давление на тыльную сторону стопы. б) Те, у кого широкая передняя часть стопы, могут создать дополнительное пространство, оставив зазоры в шнуровке в передней части обуви, чтобы обеспечить больше места. в) Узкие пятки могут выскальзывать из горловины обуви и поэтому требуют дополнительной поддержки в области голеностопного сустава. д) Для дополнительной поддержки пронираванной стопы можно усилить шнуровку в средней части. (Адаптировано из инфографики Shoe Locker.)

компромиссным областям — задней части обуви (quarter), берцу (facing) и союзке. Задник и борец ботинка охватывают среднюю часть стопы, и их можно отрегулировать, изменив рисунок шнуровки в соответствии с типом стопы (рис. 10.4). Союзка образует верхнюю часть носажесткой наружной части ботинка и вмещает в себя головки плюсневых костей и пальцы стопы — место, которое больше всего расправляется во время пронации вдоль линии ПФС.

Складка на сильно поношенной обуви (см. рис. 10.1) показывает положение складки сустава ПФС. Линия сгиба должна совпадать с самой широкой частью ботинка и «подушечкой» ботинка, если смотреть сбоку (рис. 10.5).

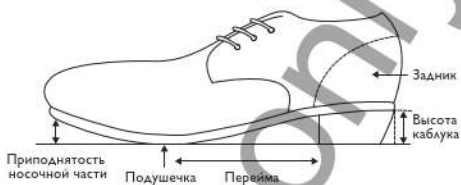


Рисунок 10.5. Особенности стандартной обуви

Подушечка ботинка должна совпадать с положением переката переднего отдела стопы, когда стопа находится внутри обуви. Подушечка стопы и подушечка ботинка должны находиться под гибкой частью союзки, которая может складываться и позволяет разгибание по линии ПФС.

Обычно форма союзки диктуется модой, а тщеславием — ее размер. Есть определенная разница между тем, что «нормально», и тем, что «естественно», и наша естественная стопа шире на уровне пальцев. Но вместо того, чтобы приспосабливаться к полной ширине стопы, стало нормальным, что наши стопы сжаты ограниченными союзками, которые со временем меняют форму и, следовательно, функцию нашей стопы. Без достаточного пространства плюсневые кости не могут расправиться, чтобы натянуть поперечную перемычку, медиальная продольная арка стопы не может удлиниться, а стопа не может скручиваться, чтобы натягивать подошвенные ткани.

Часть работы, выполняемой во время шага, можно передать обуви. Обувь может стать стабилизирующим агентом, а ее материалы можно использовать для демпфирования силы реакции опоры. Это особенно верно в отношении спортивной обуви, где изучение материалов значительно продвинулось вперед в попытках повысить эффективность и защиту. Это приводит к обсуждению обуви новые переменные, связанные с производительностью. Можно подобрать обувь таким образом, чтобы она обеспечивала естественную функцию или повышала производительность человека с точки зрения скорости и эффективности. Важно, чтобы мы не попадали в заблуждение и не полагали, что «все, что естественно», всегда естественным образом лучше.

Тем не менее в случае с носами жесткой наружной части ботинка и союзами их неестественные размеры и углы определенно не улучшают здоровье наших стоп или нашу производительность. Сжатие стопы приводит к тому, что пальцы ног, особенно большой палец, уходят в приведение, а их суставы смещаются. Наша онтогенетическая пластичность позволяет нашему тщеславию втиснуть нас в новейшие туфли, когда мы молоды, но исследования показывают, что истинная цена нашего здоровья и мобильности проявляется лишь в более поздние годы.

Недавнее исследование показало, что скорость ходьбы у 85% пожилых мужчин и 93% пожилых женщин снизилась настолько, что они больше не могут переходить дорогу на скорости, которая считается безопасной (Asher и др., 2012). Хотя это исследование проводилось только в Англии, его результаты согласуются с исследованиями, проведенными в Ирландии, Южной Африке, Испании и США. Трудно не увидеть, как это может быть связано с другими статистическими данными, которые показывают, что 85% населения носят обувь неправильного размера (Tyrrell, in Yates, 2012), что 87% пожилых людей имеют ту или иную форму дисфункции стопы (Franklin и др., 2015), при этом до 74% имеют вальгусную деформацию большого пальца стопы, а один из 40 человек в возрасте старше 50 лет страдает ригидной деформацией большого пальца стопы (Rodríguez-Sanz и др., 2018).

В каждой категории дисфункций состояние женских стоп хуже, чем мужских, и я уверен, что мало кто будет оспаривать тот факт, что женская обувь в меньшей степени учитывает форму стопы, чем мужская. Кроме того, женская обувь, как правило, имеет более высокий каблук, что создает дополнительную нагрузку на головки плюсневых костей, приводит голеностопный сустав в положение подошвенного сгибания и со временем может укорачивать икроножную мышцу и делать жестким ахиллово сухожилие (Franklin и др., 2015).

Каждое смещение и каждое уменьшение диапазона движений будут влиять на функцию костей и мягких тканей. Как мы видели

в главе 5, натяжение коллагеновых тканей во время естественного движения дает много преимуществ, а выравнивание суставов и мягких тканей обеспечивает легкость движения системы. Изменение выравнивания пальцев стопы или искусственное уменьшение диапазона движений в суставах лишает систему инерции и увеличения силы за счет преднатяжения.

Дизайн обуви может по-разному влиять на преднатяжение подошвенных тканей. Наиболее очевидно это можно увидеть на примере приподнятости носочной части обуви, изгиб подошвы вверх спереди от подушечки, который часто используется производителями для компенсации жесткости подошвы. Если материал, из которого изготовлена подошва обуви, трудно согнуть, это будет предотвращать разгибание ПФС. Производители обуви компенсируют это встроенной приподнятостью носочной части, чтобы тем самым преувеличить подушечку обуви.

Воздействие на стопу заключается в уменьшении или устранении разгибания пальцев стопы и, таким образом, уменьшении объема работы, выполняемой тканями сгибателей. Неудивительно, что такая передача обуви части задач, выполняемых стопой, приводит к ослаблению последней, поскольку мышцы больше не используются для замедления и контроля. В своем исследовании Sighting и др. (2020) обнаружили, что приподнятость носочной части обуви снижает рабочую нагрузку и уменьшает жесткость медиальной продольной арки стопы, и они предупреждают, что этот эффект может иметь долгосрочные последствия для здоровья стопы, поскольку со временем приводит к ослаблению внутренних мышц стопы из-за их недостаточного использования.

Тем не менее нам важно быть хорошо осведомленными, чтобы не ошибиться, апеллируя к природе и естественности. Всегда важно критически относиться к исследованиям, поскольку мы можем извлечь из них клинический урок. Sighting и его коллеги показывают, что приподнятость носочной части обуви приводит к тому, что работу подошвенных тканей начинает выполнять сама форма обуви, что не очень хорошо для здоровой стопы. Совсем другое дело, если стопа уже испытывает сложности. В случаях

подошвенной боли в пятке, боли в подошвенной фасции или метатарзалгии приподнятость носочной части обуви может быть клинически показана для временной разгрузки тканей, которые могут испытывать стресс. Это предоставляет им время для заживления, не требуя при этом от клиента нахождения в состоянии покоя.

Всесторонний обзор соответствующей литературы, проведенный Holowka и Lieberman (2018), показал, что популяции, носившие обувь, как правило, имели более слабые стопы и показывали меньшую высоту и жесткость медиальной продольной арки стопы, чем популяции, для которых ношение обуви не являлось привычным делом. В своем исследовании Holowka и Lieberman показали, что ношение минималистичной обуви может значительно увеличить площадь поперечного сечения мышцы, отводящей большой палец стопы, и, в меньшей степени, площадь поперечного сечения мышцы, отводящей мизинец, и короткого сгибателя пальцев стопы. Минималистская обувь позволяет стопе раздвигаться, а пальцам — разгибаться; неудивительно, что если позволять стопе следовать своей естественной функции, соответствующие мышцы будут работать немного усерднее. Эти внутренние мышцы составляют часть «системы ядра стопы», предложенной McKeon и др. (2014), о котором мы упоминали в главе 1, и, как и любое «ядро», мышцы получают пользу от того, что они работают. Для того чтобы тренировать стопы, нам не нужно ходить в спортзал: мы можем тренировать их на каждом шагу, если мы носим правильную обувь!

В рамках своей конструкции минималистская обувь имеет гибкие тонкие подошвы, которые не только позволяют задействовать подошвенные ткани, но и усиливают сенсорную стимуляцию. Стопа может чувствовать поверхность более отчетливо, и за счет жесткости тканей механорецепторы получают соответствующую информацию о давлении, сдвиге и растяжении, которая им недоступна в жесткой, тесной обуви. Но опять же, зато современная обувь может предложить какие-то решения для стопы с патологиями. Поскольку основной функцией обуви является защита

стопы, мы должны рассмотреть стопы с проблемными тканями. Как периферический сосудистый, так и неврологический дефицит могут повышать чувствительность или, что опасно, снижать ее до такой степени, что клиент не подозревает о каком-либо повреждении тканей. Слишком часто при диабете травма стопы приводит к осложнениям, требующим ампутации. Правильно подобранная обувь может снизить травматизм и должна быть частью любого качественного комплексного лечения.

При менее серьезных состояниях, таких как заболевания подошвенной фасции, амортизирующая подошва может временно снизить нагрузку на ткани и ускорить восстановление. На самом деле, при любом заболевании мягких тканей может помочь отдых и восстановление, а также поддержка, которую обеспечивает обувь. Например, уменьшившееся покрытие жировых подушечек можно компенсировать с помощью абсорбирующего каблука, так как жировые подушечки пяток деформируются до 60% в минималистской обуви, и только на 35% — в обычных кроссовках.

■ ПОИСК ПОДХОДЯЩЕГО

У тесной обуви есть одно преимущество: она заставляет вас забыть обо всех других проблемах.

Джош Биллингс

Правильная посадка имеет большое значение, и есть ряд простых советов, которые могут помочь ее найти.

- Во-первых, ходите по магазинам во второй половине дня, так как ваши ноги увеличиваются в объеме на 3% в течение дня. Этот показатель может даже увеличиваться до 8% во время энергичных упражнений (Йейтс, 2012), поэтому подумайте о том, когда именно вы отправляетесь за покупками.

- У большинства из нас одна стопа немного длиннее другой, поэтому покупайте обувь, исходя из той стопы, которая больше. Всегда можно легко добавить вкладыши или подпяточники, чтобы уменьшить пространство в ботинке с более маленькой стопой.
- Убедитесь, что на вас тот же тип носков, на который вы предполагаете носить примеряемую обувь, — не примеряйте обувь на тонкие нейлоновые чулки, если потом вы планируете прийти домой и надеть новую обувь на толстые шерстяные носки.
- Конец ботинка должен находиться на расстоянии 10–12 мм от конца самого длинного пальца ноги, и это может быть второй палец, а не большой.
- Линия ваших ПФС должна располагаться в самой широкой части обуви — эта линия также должна быть гибкой и не иметь швов или деталей дизайна, которые иногда могут изменить союзку при складывании для схода с пальцев.
- Будьте осторожны с покупкой более длинной обуви, чтобы компенсировать более широкую стопу. Несмотря на нормальные человеческие вариации, многие производители не производят обувь с разной шириной, и чтобы найти правильную ширину, может потребоваться покупка большего размера. Это изменяет положение вашей линии ПФС относительно подушечки обуви и линии протектора обуви. Обычно в подошву обуви встраивается жесткий стержень, называемый супинатором, из пластика, стали или дерева (см. рис. 10.3 — его очертания часто можно увидеть на внутренней подошве высокого каблука). Супинатор предназначен для защиты перемычки обуви, но может передавливать линию ПФС, если вы купили обувь длиннее, чем обычно. Важно, чтобы совпадала каждая из «линий сгиба» — подушечка и протектора обуви, и линия ваших ПФС, которая должна проходить за супинатором (рис. 10.6).
- Ширина носка должна соответствовать ширине стопы или быть шире нее. Податливость материала союзки повлияет на важность ширины носка, так как мягкий податливый материал, даже если он плотно

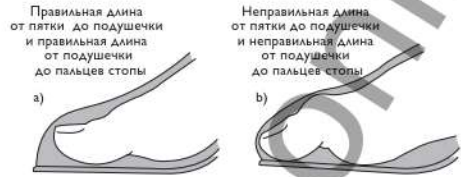


Рисунок 10.6 В правильно подобранной обуви (а) подушечка стопы будет совпадать с подушечкой обуви и линией протектора обуви. Слишком короткая обувь (б) создает несоответствие между линией ПФС стопы и линией сгиба обуви, вызывая сжатие пальцев стопы в области жесткого носка ботинка.

прилегает, по-прежнему позволит вашей стопе адаптироваться. Избегайте сочетания жесткого материала и узкого носка.

- Задник, если он есть, должен соответствовать потребностям вашей стопы. Нужна ли вашей стопе дополнительная поддержка? Задник для вас слишком мягкий или слишком жесткий? Высота задников также различается, поэтому обращайте внимание, не слишком ли он высокий для вашей пяточной кости, поскольку в этом случае он может вызывать раздражение.
- Наклон обуви — это изменение высоты от каблука до линии протектора (см. рис. 10.4). Увеличение наклона создает больше давления на головки плюсневых костей и увеличивает степень их разгибания в положении покоя. Ношение более высокого каблука изменяет углы как в голеностопном суставе, так и в ПФС, что влияет на способность стопы становиться жесткой во время ходьбы. Поскольку голеностопный сустав удерживается обувью в положении подошвенного сгибания, у таранного сустава может увеличиться способность двигаться в направлении тыльного сгибания, когда он переходит из подошвенного сгибания в нейтральное положение, а затем в тыльное сгибание. Тем не менее этот сустав с меньшей вероятностью достигнет конца своего диапазона движения и естественным образом напрягает сухожилия подошвенных сгибателей из-за уже разогнутого положения пальцев стопы. Изменение высоты наклона нарушает естественную механику

внутренних и внешних тканей стопы и может вызвать дополнительную компенсацию в области таза и спины.

Обувь может обеспечить необходимую поддержку для ортопедических стелек, независимо от того, прописаны ли они по рецепту или продаются без рецепта на базе массового производства. Обувь должна быть оснащена ортопедическими стельками, чтобы обеспечить достаточное пространство для адаптации стопы во время ходьбы. Для того чтобы найти подходящую ортопедическую стельку, может потребоваться полноценная профессиональная консультация, но многие люди считают, что стандартные серийные изделия могут обеспечить такое же облегчение, как и более дорогие варианты, изготовленные индивидуально на заказ, что приводит к выбору в пользу более дешевого варианта. Тем не менее следует уделить серьезное внимание последствиям выбора ортопедических стелек, поскольку, подобно жесткой и неподходящей обуви, они часто снижают нагрузку и напряжение на стопу, тем самым вызывая еще большую слабость в стопе и зависимость от изделия в долгосрочной перспективе. Как и многие приведенные выше рекомендации, они могут быть полезной временной мерой для разгрузки тканей и предоставления времени для того, чтобы начали приноситься результаты соответствующие упражнения и программа растяжки.

Форма и угол носка могут влиять на угол схода с пальцев. Как мы видели при обсуждении стопы Мортон в главе 8, смещение суставов может изменить направление прохождения инерции по суставам выше по конечности. Обувь конструируют с разной степенью расширения (рис. 10.7) — расстояниями между средней линией колодки и самыми наружными частями обуви. Линия биссекции измеряется вдоль линии от середины пятки, и производитель может либо увеличить расстояние от этой линии до внутренней или внешней стороны линии протектора, либо сохранить его сбалансированным. У in-flare ботинка, расклешенного внутрь, большая часть будет располагаться внутри от средней линии, у out-flare — снаружи от средней линии. Эти отклонения могут

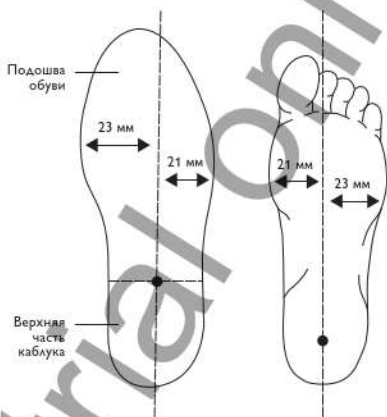


Рисунок 10.7 Самые широкие места от средней линии колодки должны быть шире, чем самые широкие части стопы. Обувь с более широкой медиальной частью называется расклешенной внутрь (in-flare), а обувь с большей шириной с латеральной стороны — расклешенной наружу (out-flare). Если расстояние до медиального и латерального краев равно, обувь считается нейтральной.

соответствовать потребностям супинированной и пронированной стопы соответственно и предотвращать раздражение кожи от контакта с внутренней частью обуви.

■ ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНОЕ СЛОВО

Туфли — как друзья: они могут поддержать вас или сломить.

Автор неизвестен

Общая мораль этой истории заключается в том, что наши стопы и наша обувь могут быть лучшими друзьями, если мы позаботимся о своих стопах и сделаем лучший выбор

** Почему ваши стопы — ваши лучшие друзья? Потому что... погодите-ка... они вас понимают!*

в отношении нашей обуви. Мы можем давать им время от времени тренироваться, бегая босиком по песку, или инвестировать в какую-нибудь минималистскую обувь с гибкой подошвой, сделанную на колодке в форме стопы. Мы всегда должны следить за тем, чтобы наша обувь подходила по назначению, и тем самым способствовать тому, чтобы наши стопы также оставались пригодными для использования в последующие годы нашей жизни. В конце концов, альтернативой этому является более медленная, менее удовлетворительная, а иногда и вовсе болезненная походка, которая лишь уменьшает наше взаимодействие с окружающим миром.

В своем прекрасном исследовании походки нейробиолог профессор Шейн О'Мара (2019) перечисляет множество преимуществ для нашего психического и физического здоровья, которые мы получаем от ходьбы. Многие преимущества простого акта ходьбы варьируются от поддержания мышечной силы и тонуса, преодоления ослабляющих эффектов саркопении до эмоционального и психологического подъема. О'Мара напоминает нам, что прогулки способствуют «открытости, экстраверсии и покладистости» и уменьшают депрессию. Но самые большие преимущества, по его словам, приходят от исследования мира природы и через наше расширение, хотя О'Мара не определяет, что он имеет в виду под расширением; мне нравится представлять себе это положение разгибания непосредственно перед сходом с пальцев. В этом положении мы в буквальном смысле открыты и натянуты вдоль передней части тела.

Сохраняйте подвижность и адаптивность своих стоп, и ваши стопы обязательно ответят вам тем же.

Нам нужно выйти за пределы и расширить себя. А для этого нам нужно уметь разгибаться, особенно разгибать большие пальцы. Правильно выбирая обувь, вы сослужите хорошую службу своей походке и эффективно-му использованию своего диапазона движений, а значит, сможете безопасно переходить дорогу даже в поздние годы своей жизни.

Предоставлю последнее слово доктору Мортону: «В структуре человеческой стопы нет ничего случайного» (Human Locomotion and Form, 1963, стр. 28).

Каждая часть стопы, каждая ткань, каждая связка и сухожилие, проходящие вдоль костных борозд, развились не просто так. Уравновешивая многие, часто противоположные потребности, человеческая стопа замечательна, и это «тотальный биотический комплекс», для понимания которого требуется время и внимание.

К счастью, по мере того как мы уходим от узких границ бинарного мышления, будь то общественный вопрос о концепциях расы и пола или упрощенный подход к мышечным движениям, я надеюсь, мы расширим нашу способность плескаться в той сложности и многомерности, которой требует от нас истинная анатомия.

В этом коротком тексте много пиццы для размышлений, и я надеюсь, что, как есть ценность в написании любой книги, так есть и ценность в ее перечитывании.

ИСТОЧНИКИ ЛИТЕРАТУРЫ

- Abdalbary, S., E. Elshaarawy, and B. Khalid. 2016. "Tensile Properties of the Deep Transverse Metatarsal Ligament in Hallux Valgus." *Medicine* 95 (8): 2843.
- Abitbol, M. 1988. "Effect of Posture and Locomotion on Energy Expenditure." *American Journal of Physical Anthropology* 77 (2): 191–199.
- Adstrum, S., G. Hedley, R. Schleip, C. Stecco, and C. Yucesoy. 2017. "Defining the Fascial System." *Journal of Bodywork and Movement Therapies* 21 (1): 173–177.
- Aiello, L., C. Dean, and J. Cameron. 2002. *An Introduction to Human Evolutionary Anatomy*. 1st edn. London: Academic Press.
- Aiello, L., and J. Wells. 2002. "Energetics and the Evolution of the Genus HOMO." *Annual Review of Anthropology* 31: 323–338.
- Asher, L., M. Aresu, E. Falaschetti, and J. Mindell. 2012. "Most Older Pedestrians are Unable to Cross the Road in Time: A Cross-sectional Study." *Age and Ageing* 41 (5): 690–694.
- Barak, M., D. Lieberman, and J. Hublin. 2011. "A Wolff in Sheep's Clothing: Trabecular Bone Adaptation in Response to Changes in Joint Loading Orientation." *Bone* 49 (6): 1141–1151.
- Barnish, M., H. Morgan, and J. Barnish. 2017. "The 2016 HIGH Heels: Health effects And psychosexual Benefits (HIGH HABITS) study: Systematic Review of Reviews and Additional Primary Studies." *BMC Public Health* 18: 37.
- Batson, E., G. Reilly, J. Currey, and D. Balderson. 2010. "Postexercise and Positional Variation in Mechanical Properties of the Radius in Young Horses." *Equine Veterinary Journal* 32 (2): 95–100.
- Benzie, S. 2020. *Lost Art of Running*. London: Bloomsbury Sport.
- Biel, A., and R. Dorn. 2015. *Trail Guide to the Body*. 5th edn. Boulder: Books of Discovery.
- Bramble, D., and D. Lieberman. 2004. "Endurance Running and the Evolution of Homo." *Nature* 432 (7015): 345–352.
- Brockett, C., and G. Chapman. 2016. "Biomechanics of the Ankle." *Orthopaedics and Trauma* 30 (3): 232–238.
- Carter, D., and G. Beaupré. 2001. *Skeletal Function and Form*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Chen, C., and D. Ingber. 1999. "Tensegrity and Mechanoregulation: From Skeleton to Cytoskeleton." *Osteoarthritis and Cartilage* 7 (1): 81–94.
- Clarke, R., and P. Tobias. 1995. "Sterkfontein Member 2 Foot Bones of the Oldest South African Hominid." *Science* 269 (5223): 521–524.

- Cowgill, L., A. Warrener, H. Pontzer, and C. Ocobock. 2010. "Waddling and Toddling: The Biomechanical Effects of an Immature Gait." *American Journal of Physical Anthropology* 143 (1): 52–61.
- Coyne, J. 2014. *Why Evolution Is True*. New York: Penguin Books.
- Crompton, R., E. Vereecke, and S. Thorpe. 2008. "Locomotion and Posture from the Common Hominoid Ancestor to Fully Modern Hominins, with Special Reference to the Last Common Panin/ Hominin Ancestor." *Journal of Anatomy* 212 (4): 501–543.
- Currey, J. 2013. *Bones*. Princeton: Princeton University Press.
- Dalmau-Pastor, M., B. Fargues-Polo, D. Casanova-Martínez, J. Vega, and P. Golanó. 2014. "Anatomy of the Triceps Surae." *Foot and Ankle Clinics* 19 (4): 603–635.
- Darwin, C. 1872. *The Origin of Species By Means of Natural Selection*. 6th edn. London: John Murray.
- DeSilva, J., E. McNutt, J. Benoit, and B. Zipfel. 2018. "One Small Step: A Review of Plio-Pleistocene Hominin Foot Evolution." *American Journal of Physical Anthropology* 168 (S67): 63–140.
- Duda, G., M. Heller, J. Albinger, O. Schulz, E. Schneider, and L. Claes. 1998. "Influence of Muscle Forces on Femoral Strain Distribution." *Journal of Biomechanics* 31 (9): 841–846.
- Earls, J. 2020. *Born to Walk*. Nutbourne: Lotus Publishing.
- Ellis, T. 1889. *The Human Foot — Its Form and Structure, Functions and Clothing*. 1st edn. London: Churchill.
- Farris, D., and B. Raiteri. 2017a. "Elastic Ankle Muscle-Tendon Interactions are Adjusted to Produce Acceleration During Walking in Humans." *The Journal of Experimental Biology* 220 (22): 4252–4260.
- Farris, D., and B. Raiteri. 2017b. "Modulation of Leg Joint Function to Produce Emulated Acceleration During Walking and Running in Humans." *Royal Society Open Science* 4 (3): 160901.
- Farris, D., J. Birch, and L. Kelly. 2020. "Foot Stiffening During the Push-off Phase of Human Walking is Linked to Active Muscle Contraction, and not the Windlass Mechanism." *Journal of The Royal Society Interface* 17 (168): 20200208.
- Fede, C., C. Pirri, C. Fan, G. Albertin, A. Porzionato, V. Macchi, R. De Caro, and C. Stecco. 2019. "Sensitivity of the Fasciae to Sex Hormone Levels: Modulation of Collagen-I, Collagen-III and Fibrillin Production." *PLOS ONE* 14 (9): e0223195.
- Fleagle, J. 2013. *Primate Adaptation and Evolution*. 3rd edn. Edinburgh: Elsevier.
- Foster, A., D. Raichlen, and H. Pontzer. 2013. "Muscle Force Production During Bent-Knee, Bent-Hip Walking in Humans." *Journal of Human Evolution* 65 (3): 294–302.
- Franklin, S., M. Grey, N. Heneghan, L. Bowen, and F-X. Li. 2015. "Barefoot vs Common Footwear: A Systematic Review of the Kinematic, Kinetic and Muscle Activity Differences During Walking." *Gait & Posture* 42 (3): 230–239.
- Fukunaga, T., K. Kubo, Y. Kawakami, S. Fukushima, H. Kanehisa, and C. Maganaris. 2001. "In Vivo Behaviour of Human Muscle Tendon During Walking." *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences* 268 (1464): 229–233.
- Galway-Witham, J., and C. Stringer. 2018. "How did Homo Sapiens Evolve?" *Science* 360 (6395): 1296–1298.
- Garfin, S., C. Tipton, S. Mubarak, S. Woo, A. Hargens, and W. Akeson. 1981. "Role of Fascia in Maintenance of Muscle Tension and Pressure." *Journal of Applied Physiology* 51 (2): 317–320.
- Gosman, J., Z. Hubbell, C. Shaw, and T. Ryan. 2013. "Development of Cortical Bone Geometry in the Human Femoral and Tibial Diaphysis." *The Anatomical Record* 296 (5): 774–787.
- Grant, R., and Grant, P. 1993. "Evolution of Darwin's finches caused by a rare climatic event. Proceedings of the Royal Society of London." *Series B: Biological Sciences* 251 (1331): 111–117.

- Grant, P., and B. Grant, B. 2008. *How and Why Species Multiply*. 1st edn. Princeton: Princeton University Press.
- Hallinan, J., W. Wang, M. Pathria, E. Smitaman, and B. Huang. 2019. "The Peroneus Longus Muscle and Tendon: a Review of its Anatomy and Pathology." *Skeletal Radiology* 48 (9): 1329–1344.
- Hanna, T. 2004. *Somatics*. Cambridge, Mass.: Da Capo.
- Hicks, J. 1955. "The Foot as a Support." *Cells Tissues Organs* 25 (1): 34–45.
- Hicks, J. 1956. "The Mechanics of the Foot, IV." *Cells Tissues Organs* 27 (3): 180–192.
- Holowka, N., and D. Lieberman. 2018. "Rethinking the Evolution of the Human Foot: Insights from Experimental Research." *The Journal of Experimental Biology* 221 (17): jeb174425.
- Holowka, N., I. Wallace, and D. Lieberman. 2018. "Foot Strength and Stiffness are Related to Footwear Use in a Comparison of Minimally- vs. Conventionally-Shod Populations." *Scientific Reports* 8 (1): 3679.
- Holowka, N., Wynands, B., Drechsel, T., Yegian, A., Tobolsky, V., Okutoyi, P., Mang'eni Ojiambo, R., Haile, D., Sigei, T., Zippenfennig, C., Milani, T. and Lieberman, D. 2019. Foot Callus Thickness Does Not Trade Off Protection for Tactile Sensitivity During Walking. *Nature*, 571(7764): 261–264.
- Hoskins, T. 2020. *Footwork: What Your Shoes Are Doing to the World*. 1st ed. London: Weidenfeld & Nicolson.
- Huijing, P., H. Maas, and G. Baan. 2003. "Compartmental Fasciotomy and Isolating a Muscle from Neighboring Muscles Interfere with Myofascial Force Transmission within the Rat Anterior Crural Compartment." *Journal of Morphology* 256 (3): 306–321.
- Hutchison, M. 2018. "Can Foot Exercises and Barefoot Weight Bearing Improve Foot Function in Participants with Flat Feet?" *Orthopedic Research Online Journal* 3 (4): 000567.
- Ishikawa, M., J. Pakaslahti, and P. Komi. 2007. "Medial Gastrocnemius Muscle Behavior During Human Running and Walking." *Gait & Posture* 25 (3): 380–384.
- Jones, F. 1944. *Structure and Function as Seen in the Foot*. 1st edn. Baltimore: Williams & Wilkins.
- Kapandji, I., L. Honoré, and R. Tubiana. 2019. *The Physiology of the Joints*. 7th edn. Edinburgh: Handspring.
- Kidd, R., P. O'Higgins, and C. Oxnard. 1996. "The OH8 Foot: A Reappraisal of the Functional Morphology of the Hindfoot Utilizing a Multivariate Analysis." *Journal of Human Evolution* 31 (3): 269–291.
- Kim, P., Richey, J., Wissman, L. and Steinberg, J. 2010. The Variability of the Achilles Tendon Insertion: A Cadaveric Examination. *The Journal of Foot and Ankle Surgery*, 49(5): 417–420.
- Kurihara, T., J. Yamauchi, M. Otsuka, N. Tottori, T. Hashimoto, and T. Isaka. 2014. "Maximum Toe Flexor Muscle Strength and Quantitative Analysis of Human Plantar Intrinsic and Extrinsic Muscles by a Magnetic Resonance Imaging Technique." *Journal of Foot and Ankle Research* 7 (1): 26.
- Lai, A., A. Schache, N. Brown, and M. Pandy. 2016. "Human Ankle Plantar Flexor Muscle-Tendon Mechanics and Energetics During Maximum Acceleration Sprinting." *Journal of The Royal Society Interface* 13 (121): 20160391.
- Lewis, O. 1989. *Functional Morphology of the Evolving Hand and Foot*. Oxford: Clarendon VIII.
- Lidstone, D., H. van Werkhoven, A. Needle, P. Rice, and J. McBride. 2018. "Gastrocnemius Fascicle and Achilles Tendon Length at the End of the Eccentric Phase in a Single and Multiple Countermovement Hop." *Journal of Electromyography and Kinesiology* 38: 175–181.
- Lieber, R., and S. Ward. 2011. "Skeletal Muscle Design to Meet Functional Demands." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366 (1570): 1466–1476.
- Lieberman, D. 1997. "Making Behavioral and Phylogenetic Inferences from Hominid Fossils: Considering the Developmental Influence of Mechanical Forces." *Annual Review of Anthropology* 26 (1): 185–210.

- Lieberman, D. 2014. *The Story of the Human Body*. 1st edn. Vintage.
- Lutz, F., R. Mastel, M. Runge, F. Stief, A. Schmidt, A. Meurer, and H. Witte. 2016. "Calculation of Muscle Forces During Normal Gait Under Consideration of Femoral Bending Moments." *Medical Engineering & Physics* 38 (9): 1008–1015.
- McDougall, C. 2009. *Born to Run*. New York: Random House.
- McKenzie, J. 1955. "The Foot as a Half-Dome." *British Medical Journal* 1 (4921): 1068–1069.
- McKeon, P., J. Hertel, D. Bramble, and I. Davis. 2014. "The Foot Core System: A New Paradigm for Understanding Intrinsic Foot Muscle Function." *British Journal of Sports Medicine* 49 (5): 290–290.
- Medical Massage Therapy. 2020. Range of Motion. [online] Available at: <<https://www.massagetherapyreference.com/range-of-motion/>> [Accessed 3 December 2020].
- Michaud, T. 2021. *Injury-Free Running: Your Illustrated Guide to Biomechanics, Gait Analysis, and Injury Prevention*. Chichester: Lotus Publishing.
- Mickle, K., C. Nester, G. Crofts, and J. Steele. 2012. "Reliability of Ultrasound to Measure Morphology of the Toe Flexor Muscles." *Journal of Foot and Ankle Research* 5 (S1).
- Miller, E., Whitcome, K., Lieberman, D., Norton, H. and Dyer, R. 2014. "The Effect of Minimal Shoes On Arch Structure and Intrinsic Foot Muscle Strength." *Journal of Sport and Health Science* 3(2): 74–85.
- Morton, D., and D. Fuller. 1952. *Human Locomotion and Body Form*. Baltimore: Williams & Wilkins.
- Morton, D. 1922. "Evolution of the Human Foot." *American Journal of Physical Anthropology* 5 (4): 305–336.
- Morton, D. 1935. *The Human Foot*. New York: Columbia University Press.
- Nash, L., M. Phillips, H. Nicholson, R. Barnett, and M. Zhang. 2004. "Skin Ligaments: Regional Distribution and Variation in Morphology." *Clinical Anatomy* 17 (4): 287–293.
- Navarrete, A., C. van Schaik, and K. Isler. 2011. "Energetics and the Evolution of Human Brain size." *Nature* 480 (7375): 91–93.
- Nigg, B. 2010. *Biomechanics of Sport Shoes*. Calgary, Alta: University of Calgary.
- Olewnik, L. 2019. "A proposal for a new classification for the tendon of insertion of tibialis posterior." *Clinical Anatomy* 32 (4): 557–565.
- Olewnik, L., M. Podgórski, M. Polgij, and M. Topol. 2019. "A Cadaveric and Sonographic Study of the Morphology of the Tibialis Anterior Tendon — a Proposal for a New Classification." *Journal of Foot and Ankle Research* 12 (9).
- Olson, M., T. Lockhart, and A. Lieberman. 2019. "Motor Learning Deficits in Parkinson's Disease (PD) and Their Effect on Training Response in Gait and Balance: A Narrative Review." *Frontiers in Neurology* 10: 62.
- O'Mara, S. 2019. *In Praise of Walking*. London: Bodley Head.
- Pablos, A. 2015. "The Foot in the Homo Fossil Record." *Mitteilungen der Gesellschaft für Urgeschichte* 24 (11): 11–28.
- Page, P., C. Frank, and R. Lardner. 2014. *Assessment and Treatment of Muscle Imbalance*. Champaign, IL: Human Kinetics.
- Perry, J., and J. Burnfield. 2010. *Gait Analysis*. Canada: Trafford.
- Physiopedia. 2020. Navicular Drop Test. [online] Available at: <https://www.physio-pedia.com/Navicular_Drop_Test> [Accessed 2 December 2020].
- Pontzer, H. 2017. "Economy and Endurance in Human Evolution." *Current Biology* 27 (12): R613–R621.
- Pretterklieber, B. 2018. "Morphological Characteristics and Variations of the Human Quadratus Plantae

- Muscle." *Annals of Anatomy: Anatomischer Anzeiger* 216: 9–22.
- Rajakulasingam, R., J. Murphy, H. Panchal, S. James, and R. Botchu. 2019. "Master Knot of Henry Revisited: a Radiologist's Perspective on MRI." *Clinical Radiology* 74 (12): 972.e1–972.e8.
- Reach, J., K. Amrami, J. Felmlee, D. Stanley, J. Alcorn, and N. Turner. 2007. "The Compartments of the Foot: A 3-Tesla Magnetic Resonance Imaging Study with Clinical Correlates for Needle Pressure Testing." *Foot & Ankle International* 28 (5): 584–594.
- Rios Nascimento, S., R. Watanabe Costa, C. Ruiz, and N. Wafae. 2012. "Analysis on the Incidence of the Fibularis Quartus Muscle Using Magnetic Resonance Imaging." *Anatomy Research International* 2012: 485149.
- Robbins, S., E. Waked, and J. McClaran. 1995. "Proprioception and Stability: Foot Position Awareness as a Function of Age and Footwear." *Age and Ageing* 24 (1): 67–72.
- Roberts, T., and E. Azizi. 2011. "Flexible Mechanisms: The Diverse Roles of Biological Springs in Vertebrate Movement." *Journal of Experimental Biology* 214 (3): 353–361.
- Rodríguez-Sanz, D., N. Tovaruela-Carrión, D. López-López, P. Palomo-López, C. Romero-Morales, E. Navarro-Flores, and C. Calvo-Lobo. 2018.
- "Foot Disorders in the Elderly: A Mini-Review." *Disease-a-Month* 64 (3): 64–91.
- Rolian, C., D. Lieberman, J. Hamill, J. Scott, and W. Werbel. 2009. "Walking, Running and the Evolution of Short Toes in Humans." *Journal of Experimental Biology* 212 (5): 713–721.
- Rubenson, J., N. Pires, H. Loi, G. Pinniger, and D. Shannon. 2012. "On the Ascent: The Soleus Operating Length is Conserved to the Ascending Limb of the Force-Length Curve Across Gait Mechanics in Humans." *Journal of Experimental Biology* 215 (20): 3539–3551.
- Ruff, C., B. Holt, and E. Trinkaus. 2006. "Who's Afraid of the Big Bad Wolff?: 'Wolff's law' and Bone Functional Adaptation." *American Journal of Physical Anthropology* 129 (4): 484–498.
- Sawicki, G., C. Lewis, and D. Ferris. 2009. "It Pays to Have a Spring in Your Step." *Exercise and Sport Sciences Reviews* 37 (3): 130–138.
- Shubin, N. 2014. *Your Inner Fish*. New York: Vintage Books.
- Shubin, N. 2021. *Some Assembly Required*. London: Oneworld Publications.
- Shubin, N., E. Daeschler, and F. Jenkins. 2014. "Pelvic Girdle and Fin of *Tiktaalik Roseae*." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111 (3): 893–899.
- Sichting, F., N. Holowka, F. Ebrecht, and D. Lieberman. 2020. "Evolutionary Anatomy of the Plantar Aponeurosis in Primates, Including Humans." *Journal of Anatomy* 237 (1): 85–104.
- Silder, A., B. Whittington, B. Heiderscheit, and D. Thelen. 2007. "Identification of Passive Elastic Joint Moment-Angle Relationships in the Lower Extremity." *Journal of Biomechanics* 40 (12): 2628–2635.
- Singh, A., J. Zwirner, J. Templer, F. Kieser, D. Klima, S. and Hammer, N. 2021. On the Morphological Relations of the Achilles Tendon and Plantar Fascia via the Calcaneus: a Cadaveric Study. *Scientific Reports*, 11(1).
- Snow, S., B. Bohn, W. DiCarlo, E. and Chang, V. 1995. *Anatomy of the Achilles Tendon and Plantar Fascia in Relation to the Calcaneus in Various Age Groups*. *Foot & Ankle International*, 16(7): 418–421.
- Solórzano, S. 2020. *Everything Moves*. 1st edn. Edinburgh: Handspring.
- Sorrentino, R., K. Carlson, E. Bortolini, C. Minghetti, F. Feletti, L. Fiorenza, S. Frost, T. Jashashvili, W. Parr, C. Shaw, A. Su, K. Turley, S. Wroe, T. Ryan,
- M. Belcastro, and S. Benazzi. 2020. "Morphometric Analysis of the Hominin Talus: Evolutionary and Functional Implications." *Journal of Human Evolution* 142: 102747.

- Stainsby, G. 1997. "Pathological Anatomy and Dynamic Effect of the Displaced Plantar Plate and the Importance of the Integrity of the Plantar Plate- Deep Transverse Metatarsal Ligament Tie-Bar." *Annals of The Royal College of Surgeons of England* 79 (1): 58–68.
- Standing, S. 2008. *Gray's Anatomy*. Edinburgh: Elsevier Health Sciences UK.
- Stecco, C. 2015. *Functional Atlas of the Human Fascial System*. 1st edn. Edinburgh: Elsevier.
- Stecco, C., V. Macchi, A. Porzionato, A. Morra, A. Parenti, A. Stecco, V. Delmas, and R. De Caro. 2010. "The Ankle Retinacula: Morphological Evidence of the Proprioceptive Role of the Fascial System." *Cells Tissues Organs* 192 (3): 200–210.
- Taleb, N. 2013. *Anti-Fragile*. London: Allen Lane.
- Tamer, P., and S. Simpson. 2017. "Evolutionary Medicine: Why do Humans get Bunions?" *Evolution, Medicine, and Public Health* 2017 (1): 48–49.
- Thompson, D. 1968. *On Growth and Form*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Thorpe, S., R. Holder, and R. Crompton. 2007. "Origin of Human Bipedalism as an Adaptation for Locomotion on Flexible Branches." *Science* 316 (5829): 1328–1331.
- Trinkaus, E., and H. Shang. 2008. "Anatomical Evidence for the Antiquity of Human Footwear: Tianyuan and Sunghir." *Journal of Archaeological Science* 35 (7): 1928–1933.
- Tyrrrell, J., S. Jones, R. Beaumont, C. Astley, R. Lovell, H. Yaghootkar, M. Tuke, K. Ruth, R. Freathy, J. Hirschhorn, A. Wood, A. Murray, M. Weedon, and T. Frayling. 2016. "Height, Body Mass Index, and Socioeconomic Status: Mendelian Randomisation Study in UK Biobank." *British Medical Journal* 352: i582.
- van der Wal, J. 2009. "The Architecture of the Connective Tissue in the Musculoskeletal System — An Often Overlooked Functional Parameter as to Proprioception in the Locomotor Apparatus." *International Journal of Therapeutic Massage & Bodywork* 2 (4): 9–23.
- van Wingerden, J., A. Vleeming, C. Snijders, and R. Stoeckart. 1993. "A Functional-Anatomical Approach to the Spine-Pelvis Mechanism: Interaction Between The Biceps Femoris Muscle and the Sacrotuberous Ligament." *European Spine Journal* 2 (3): 140–144.
- Venkadesan, M., A. Yawar, C. Eng, M. Dias, D. Singh, S. Tommasini, A. Haims, M. Bandi, and S. Mandre. 2020. "Stiffness of the Human Foot and Evolution of the Transverse Arch." *Nature* 579 (7797): 97–100.
- Viseux, F. 2020. "The Sensory Role of the Sole of the Foot: Review and Update on Clinical Perspectives." *Neurophysiologie Clinique* 50 (1): 55–68.
- Webber, J., and D. Raichlen. 2016. "The role of Plantigrady and Heel-Strike in the Mechanics and Energetics of Human Walking with Implications for the Evolution of the Human Foot." *The Journal of Experimental Biology* 219 (23): 3729–3737.
- Whittington, B., A. Silder, B. Heiderscheit, and D. Thelen. 2008. "The Contribution of Passive-Elastic Mechanisms to Lower Extremity Joint Kinetics During Human Walking." *Gait & Posture* 27 (4): 628–634.
- Wilson, A., and G. Lichtwark. 2011. "The Anatomical Arrangement of Muscle and Tendon Enhances Limb Versatility and Locomotor Performance." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 366 (1570): 1540–1553.
- Wood Jones, F. 1944. *Structure and Function as Seen in the Foot*. 1st edn. Baltimore: Williams and Wilkins.
- Yamauchi, J., and K. Koyama. 2019. "Force- Generating Capacity of the Toe Flexor Muscles and Dynamic Function of the Foot Arch in Upright Standing." *Journal of Anatomy* 234 (4): 515–522.
- Yates, B., and L. Merriman. 2009. *Merriman's Assessment of the Lower Limb*. Edinburgh: Churchill Livingstone.
- Yates, B. 2012. *Merriman's Assessment of the Lower Limb*. Edinburgh: Churchill Livingstone.
- Yi, T., G. Lee, I. Seo, W. Huh, T. Yoon, and B. Kim. 2011. "Clinical Characteristics of the Causes of Plantar



Heel Pain." *Annals of Rehabilitation Medicine* 35 (4): 507–513.

Young, N., T. Capellini, N. Roach, and Z. Alemseged. 2015. "Fossil Hominin Shoulders Support an African Ape-Like Last Common Ancestor of Humans and Chimpanzees." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (38): 11829–11834.

Zelik, K., V. La Scaleia, Y. Ivanenko, and F. Lacquaniti. 2014. "Coordination of Intrinsic and Extrinsic Foot Muscles During Walking." *European Journal of Applied Physiology* 115 (4): 691–701.

Zügel, M., C. Maganaris, J. Wilke, K. Jurkat-Rott, W. Klingler, S. Wearing, T. Findley, M. Barbe, J. Steinacker, A. Vleeming, W. Bloch, R. Schleip, and P. Hodges. 2018. "Fascial Tissue Research in Sports Medicine: From Molecules to Tissue Adaptation, Injury and Diagnostics: Consensus Statement." *British Journal of Sports Medicine* 52 (23): 1497.

Zwirner, J., Zhang, M., Ondruschka, B., Akita, K. and Hammer, N. 2020. An Ossifying Bridge — on the Structural Continuity Between the Achilles Tendon and the Plantar Fascia. *Scientific Reports*, 10(1).

АВТОР ГЛАВЫ 9



Люси Уинтл занимается движением человека более 20 лет. Изначально она обучилась на инструктора по пилатесу в Body Control Pilates и владеет и управляет пользующейся спросом студией в Кентербери, Кент, Великобритания, где проводит занятия как на мате, так и на оборудовании.

Желание углубить свое понимание функциональной анатомии привело ее к изучению структурной интеграции, и в этот период она познакомилась с Джеймсом Эрлзом. Теперь она твердо убеждена, что необходимо уделять больше внимания тому, чтобы дать скелетной структуре ту прочную основу, которой она заслуживает и в которой она так часто нуждается; это помогает клиентам улучшать их спортивные результаты, способствует реабилитации и замедлению возрастных постральных тенденций. Сильные и слабые

стороны стопы, общие проблемы с балансом и выравнивание осанки — все это ключевые компоненты ее обучения. Постоянные клиенты называют ее отчасти педагогом, отчасти — инструктором, и неизменно — образцом для подражания и рассказывают о тех долговременных изменениях, которые ее занятия приносят в их тела.

Совсем недавно Люси создала собственный бренд, который побуждает клиентов более широко смотреть на собственное благополучие и прямо «здесь и сейчас» добавлять в свою жизнь активности, способствующие поддержанию активного образа жизни в последующие годы. Концепция ее бренда объединяет шесть основных элементов будущего здоровья: пилатес, работу с сердечно-сосудистой системой, мышечную массу, здоровье костей, тренировку баланса и общее самочувствие.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

«Защемленная мозоль» 222
«Поднос официанта» 97, 100–106
«Приобретенное плоскостопие» 169, 213
«Цепная реакция» 121
«Цикл растяжения-отдачи» 140

А

Австралопитеки 21, 24, 51–58, 109
Адаптивная стопа 78, 179, 202, 226
Амортизация 18–22, 26, 30, 35, 68, 80, 90, 106, 107, 110, 120, 143, 145, 156, 163, 167, 180, 181, 196, 197, 202–204, 208, 213, 215
Анатомическая площадь поперечного сечения (АППС) 141, 142
Анатомия лошади 20
Анизотропия 71
Апоневроз 119, 131, 165, 183–196
Афферентные нервы 181
Ахиллово сухожилие 96, 98, 102, 107, 161–166, 186, 189, 210, 215, 247, 257

Б

Бедренная кость 21, 47, 55, 59, 66–70, 76, 78, 85–88, 94, 121, 151, 158, 161, 164, 205, 239
Билатеральный подъем на носки 230, 231
Большеберцовая кость 21, 47, 59, 60, 69–71, 76–106, 115, 120, 130, 152, 154, 158, 161, 167, 169, 171, 175, 209, 215, 216, 232, 239, 240, 246–248
Бугристая большеберцовая кость 86, 90, 215, 239, 240, 247, 248

В

Внутренние органы 134, 149
Волокна миозина 132, 133, 139, 150
Выпуклости 52, 91

Г

Гаверсовы системы 73, 75
Ген Sonic Hedgehog 48
Гены Hox 37, 48, 49, 62
Гены гомеобокса 48
Геометрическая морфометрия 42, 43, 52, 53
Геометрическое замыкание 57, 107, 108, 111, 112, 158, 199, 206
Гиалуроновая кислота 138
Гладкие мышцы 134
Глубокий задний отдел 167, 223
Голенистый сустав 20, 22, 26, 283, 33, 67, 76, 79, 82–106, 116, 120, 126–131, 140, 144–148, 156–175, 182, 187, 188, 203–207, 210, 214–216, 227, 228, 232, 237–251, 257, 259

Гоминины 53
Губчатая кость 66

Д

Движение костей 25, 32, 206
Двуглавая мышца плеча 142
Демпфирование 155, 256
Денисовский человек 53
Деформация 41, 63, 66, 75–78, 90, 102, 115, 118, 135–140, 145, 151, 155, 162, 183, 196, 202, 204, 221, 241, 257
Длинные сгибатели пальцев стопы 84, 107, 113, 148, 167–176, 189, 191–194, 224, 232
Длинный сгибатель большого пальца стопы 83, 84, 90, 103, 107, 113, 148, 153, 167–176, 184, 195, 206, 213, 224, 232
Длинный сгибатель пальцев стопы 84, 107, 113, 148, 167–176, 189, 191–194, 224, 232

Ж

Жесткий рычаг 20, 23, 26, 29, 35, 57, 67, 76–82, 93, 94, 108, 111, 121, 122, 130, 138, 156, 164, 176, 179, 186, 188, 189, 192, 202, 205–208, 223, 224, 234, 237

З

Задний отдел стопы 94, 107, 110, 111, 240
Закон Вольфа 22, 66
Затухание 145
Защемление 222

И

Икроножная мышца 106, 107, 142, 158–164, 172, 175, 206, 216, 222, 230, 231, 250, 257
Инерция 16, 20, 24–35, 94, 103, 105, 121–145, 150, 156, 158, 175–181, 197, 204, 257, 260

К

Камбаловидная мышца 86, 90, 91, 106, 107, 131, 142, 144, 161–175, 206, 215, 223, 231, 250
Капюшон разгибателя 178, 194
Касание пяткой 22–26, 31, 56, 106, 107, 109, 174
Квадратная мышца подошвы 170, 184, 191–193, 232
Кисти рук 121, 177–179, 197
Клиновидные кости 82, 109–120, 166, 168, 173, 196
Коленные часы 251
Коллаген 30–34, 73, 74, 123, 131–140, 145, 149, 150, 162, 164, 181, 202, 206, 257

Компартмент-синдром 148, 170, 182, 184
Компартменты 124, 147–149, 160, 170, 182–184, 208
Контуры 12, 32, 120, 121
Концентрическое действие 127
Кортикальная кость 65, 69, 85, 87
Кости предплюсны 45, 47, 79, 80, 82, 95, 106, 112, 114
Коэффициент энцефализации 60
Крестцово-подвздошные суставы (КПС) 93
Кубовидная кость 47, 59, 79, 81, 82, 95, 101, 109, 111–114, 120, 165–168, 196

Л

Ладьевидная кость 47, 95–118, 167–170, 175, 210–213, 224, 232, 235
Латеральное растяжение 105, 166
Латеральный отдел 157, 159, 165–167, 183, 184, 237, 238, 240
Лестница бытия 37
Лодыжка 20, 59, 83–107, 111, 121, 122, 159, 160, 165–169, 173, 206, 215, 217, 224
Локомоция 23, 36, 42, 66, 69, 77, 78, 90, 115, 177, 180
Люси 7, 52, 53, 56, 226

М

Малоберцовая кость 47, 60, 70, 82–96, 103–108, 111–113, 121, 130, 154, 157, 160, 161, 165–175, 206, 210, 215, 216, 224
Малоберцовая мышца 70, 86, 90, 91, 103–113, 119, 120, 148, 153–176, 186, 198, 207, 222, 224, 238
Малоберцовый нерв 166, 171
Маневр Хабшера 219
Метаболизм 17, 18, 41, 56, 132
Метафизика 80
Механизм лебедки 57, 58, 169, 186, 187, 192, 199, 219, 220, 230
Механорецепторы 23, 25, 33, 34, 67, 73–77, 132, 138, 149, 150, 159, 160, 166, 179–182, 187, 195, 203, 227, 258
Миофасциальная система 19, 33
Модель африканского происхождения 54
Мышца, отводящая большой палец стопы 184, 186, 190, 193, 240, 243
Мышца, отводящая мизинец стопы 184, 185, 190, 193, 243
Мягкие ткани 17–34, 52, 57, 58, 63, 65, 75–80, 87–95, 100–102, 107–113, 120–158, 176–182, 185, 189, 192, 202–208, 212, 214, 221, 224, 228, 233, 239, 242, 243, 257, 258

Н

Надколенник 86, 87, 239
 Напряжение 23, 30, 33, 34, 63–65, 74–78, 85, 126, 129, 134–139, 145, 148, 159, 165, 168, 204, 240, 260
 Наружные мышцы 113, 151, 157, 173, 176
 Неандерталец 43, 51
 Небольшие сгибания коленей 238, 245, 251
 Нижний удерживатель разгибателей 104, 159, 160, 165, 166, 173

О

Обувь 9, 15, 16, 23, 24, 65, 115, 117, 128, 155, 179–185, 200, 203, 220, 227, 227, 252–261
 Опора на одну ногу 234
 Опора таранной кости 83, 96, 97, 100, 104–107, 110, 209, 210
 Останки 36, 52, 53, 57, 66, 76
 Остеобласты 33, 72–77
 Остеоциты 72–77, 138
 Отводящие мышцы 24, 88, 125, 126, 153, 184–195, 232, 239–243, 251, 258
 Отделы голени 106, 158, 245

П

Палеоантропология 36, 44, 48, 50, 52
 Пальпация 89, 92, 111, 214
 Паттерны походки 187
 Передний отдел стопы 23, 60, 79, 80, 97, 106–108, 126, 129, 157, 159, 172, 175, 194, 206, 215, 256
 Передняя большеберцовая мышца 70, 86, 90, 112, 113, 126, 131, 148, 152, 153, 157–165, 171–173, 186, 255
 Перекаты 20, 26–29, 32, 44, 77, 82, 83, 93, 100, 103, 105, 118, 119, 126–129, 156, 157, 172–175, 188, 192, 197, 200, 206, 215, 217, 220–223, 238, 250, 255, 256
 Перемещение тела в сагиттальной плоскости 28
 Переходные виды 45, 46, 50–53
 Перистые мышцы 140–142, 163
 Перцептивное постоянство 177, 178
 Плоскостопие 16, 28, 169, 213
 Плюсневые кости 45–52, 60, 68, 79–82, 101, 111–121, 155, 159, 165–176, 180–185, 194–199, 207, 215–234, 237–241, 256, 257, 259
 Подошвенная мышца 148, 156, 157, 161, 164, 165, 170, 184–186, 197, 198, 232
 Подошвенная фасция 34, 185–191, 196, 199, 206, 207, 219, 220, 224, 247, 258
 Подошвенное сгибание 83–93, 103, 119, 120, 126–131, 144, 145, 156–176, 207, 215–222, 238, 245–251, 255, 257, 259
 Подошвенный апоневроз 119, 165, 183–192, 196
 Подтаранный сустав 59, 60, 83, 89, 97–99, 102, 103, 157, 158, 165, 171, 173, 176, 208–217, 223, 228, 250, 251
 Подъем на носок на одной ноге 251
 Показания пластины давления 26
 Полидактилия 48, 49
 Поперечная арка стопы 109–112, 122, 228
 Поперечный сустав предплюсны 80–82, 111–114, 152, 186, 194, 216
 Постизометрическая релаксация 246

Потливая кожа 180

Подошма 15–36, 44, 56, 82, 93, 103, 106, 124–129, 157, 167, 171–174, 187–191, 199, 202, 208, 209, 220, 255, 261
 Предплюсневые суставы 80–82, 100, 111, 114, 115, 118, 152
 Приводящие мышцы 70, 153, 163, 184, 194–196, 243
 Приматы 20, 27, 41, 44, 60, 90, 106, 109–117, 177, 178, 185–188, 191, 207, 220
 Продвижение вперед и выходная сила 223
 Пронация 23, 26, 35, 78, 79, 82, 89, 92, 94, 97, 100–103, 107–111, 120, 121, 156–159, 163–165, 175, 183, 186, 195, 196, 202, 204, 207–213, 217, 222, 224, 228, 235–239, 251, 255, 256
 Пружинная связка 96, 100, 102, 107, 140, 169, 210, 213
 Пяточная кость 18–24, 44–47, 51–56, 80–83, 94–111, 118, 121, 125, 151, 156, 159, 161–176, 180, 185–194, 199, 202, 206, 209, 210, 216, 217, 223, 224, 231, 234–248, 255, 259

Р

Разгибание пальцев стопы 26, 56, 57, 117, 119, 131, 166, 170, 179, 186, 189–195, 205–208, 217–223, 251, 257
 Разгибатели пальцев 173, 197
 Размер мозга 56, 58, 60
 Реальное и относительное движение 113

С

Самостоятельная мобилизация стопы 243, 244
 Сенсорно-моторная амнезия (СМА) 244
 Сесамовидные кости 45, 119, 120, 195, 207, 221
 Сила реакции опоры 24, 25, 30–35, 58, 94, 96, 101–108, 121–127, 138, 150, 164, 202, 256
 Скелетные мышцы 134
 Следы в Лазтоли 56
 Сложные системы 17, 23, 124, 125
 Сложный сустав 80, 81, 93, 152, 218
 Слои мышц 206
 Согнутые конечности 17–19
 Соединительная ткань 147, 148, 159, 162, 173, 180, 243
 Стержень жесткости 135–138, 155
 Супинатор 107, 122, 255, 259
 Супинация 26, 35, 57, 79, 82, 89, 92, 97, 100, 103, 107, 111, 120, 121, 129, 145, 156–159, 163–169, 173, 176, 179, 186, 187, 199, 204–211, 215, 216, 219–224, 228, 231–236, 239, 241
 Сустав Лисфранка 80, 81, 152
 Сустав Шопара 80, 81
 Сход с пальцем 20, 25–29, 33, 34, 56, 82, 94, 107–111, 115–117, 120–122, 128, 131, 140, 157, 170, 187, 189, 191, 199, 205, 206, 220, 222, 223, 255, 259, 260, 261

Т

Таранная кость 25, 28, 31, 45, 47, 52, 53, 60, 77–110, 121, 122, 156, 159, 164, 168, 169, 175, 206, 209–216, 223, 224, 247

Теносегрити 63, 75–78, 243
 Теория скольжения волокон 133
 Тест Джэка 219
 Тест Сильверскинда 216
 Тиктаалик 45, 46, 48, 50, 53
 Торсия большеберцовой кости 59, 89, 92, 97, 100
 Трабекулярная кость 65, 72
 Треножник равновесия 228–239, 251
 Триггерные точки стопы 243
 Тыльное сгибание 83–95, 99, 126–132, 142–148, 153–176, 204–208, 214–216, 220, 222, 228, 230, 239, 240, 245–251, 259
 Тыльное сгибание голеностопного сустава 88, 99, 130, 146, 162, 168–171, 175, 204–207, 214, 215, 245, 247, 250

У

Узд. Генри 170
 Упражнение «Короткая стопа» 231, 232, 240, 251
 Упругая энергия 138, 206, 207

Ф

Фаза опоры 21, 25, 26, 29, 85, 101, 102, 125–131, 138, 140, 145, 172, 174, 175, 206, 222, 223
 Фаланги 45, 47, 55, 68, 79–82, 101, 114–122, 167–173, 178, 189–199, 217–222, 254
 Фасциальная ткань 124, 138, 140–150, 160, 163, 180, 195, 208
 Фасциальные отделы 146, 147, 159, 165, 182
 Фасциотомия 148, 170
 Фасция голени 148, 158–160
 Физиологическая площадь поперечного сечения (ФППС) 142, 162, 163, 168
 Физиотерапия кистей рук 179

Ц

Цифра 8 228, 229, 251

Ч

Человек прямоходящий 51, 60
 Червеобразные мышцы 170, 173, 184, 192–194
 Четвероногие 18–20, 30, 44

Ш

Шимпанзе 17–21, 24, 38–44, 47–59, 87–93, 99, 100, 106, 109–118, 162, 188
 Шнуровка 256

Э

Эволюция 8–11, 14–18, 23, 34–62, 75, 99, 114, 115, 150, 167, 177, 202, 205, 207, 224, 254
 Эластичность 73, 131–143, 150, 162, 242
 Электромиография (ЭМГ) 126–129, 144, 172–174, 188
 Эмбрион 48, 49
 Эпоха среднегопозднего Миоцена 41
 Эфферентные нервы 181

Я

Ядро стопы 179, 200

Перед вами полноцветное, актуальное и глубокое погружение в структуру и функцию стопы, написанное для физиотерапевтов и специалистов по движению, стремящихся углубить свое понимание целостной анатомии.

ЧИТАТЕЛИ УЗНАЮТ О ВЛИЯНИИ ФОРМЫ СТОПЫ НА ЖИЗНЬ И ДВИЖЕНИЕ ЧЕЛОВЕКА, ВЗАИМОЗАВИСИМОСТИ ЕЕ ФОРМЫ И ФУНКЦИИ, А ТАКЖЕ О КЛЕТОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ СТРОЕНИЕ НАШЕГО ТЕЛА.

Что наиболее важно, Джеймс Эрлз демонстрирует, как стопа во время движения связана и взаимодействует с остальным телом. В результате мы имеем всесторонний, целостный подход к оценке стопы, что позволяет устранять присутствующие у пациентов нарушения и решать функциональные и структурные проблемы.

ДАННОЕ РУКОВОДСТВО ЯВЛЯЕТСЯ КЛЮЧЕВЫМ РЕСУРСОМ ДЛЯ ВСЕХ СПЕЦИАЛИСТОВ ПО РАБОТЕ С ТЕЛОМ, ФИЗИОТЕРАПЕВТОВ И СПОРТИВНЫХ ВРАЧЕЙ.

В КНИГЕ ВЫ НАЙДЕТЕ:

- Полноцветные иллюстрации для легкого ознакомления и всестороннего понимания материала
- Способы оценки костей, связок, внешних и внутренних мышц стопы
- Информацию о влиянии функционирования стопы на другие анатомические структуры тела
- Методики, позволяющие оценить структурные и функциональные проблемы стопы
- Корректирующие упражнения с пошаговыми алгоритмами проработки каждой зоны
- Руководство по выбору обуви и подбору лучшей пары для разного типа стопы



Джеймс Эрлз – писатель, лектор и терапевт по работе с телом, специализирующийся на функциональных движениях и структурной интеграции. Он является директором Born to Move (образовательной платформы), обучающей реальной анатомии двигательных и мануальных терапевтов), а также популярным докладчиком на конференциях и семинарах по всему миру. Эрлз – автор книги «Рожденный ходить» и соавтор (вместе с Томасом Майерсом) книги «Фасциальный релиз для структурного баланса». Он также регулярно пишет для профессиональных журналов и изданий.



«МЕДПРОФ: атласы, книги для врачей» — издательство, команда которого более 25 лет выпускает профессиональные книги для врачей, студентов-медиков и всех, кому нужны актуальные медицинские знания мирового уровня. Мы гарантируем идеальное полиграфическое исполнение каждой книги и высокий уровень профессиональной подготовки наших редакторов, которые позаботятся о том, чтобы научная информация была наглядной и легкой для усвоения. Наши издания доставят вам эстетическое удовольствие, обозначат статус и помогут в практике.

