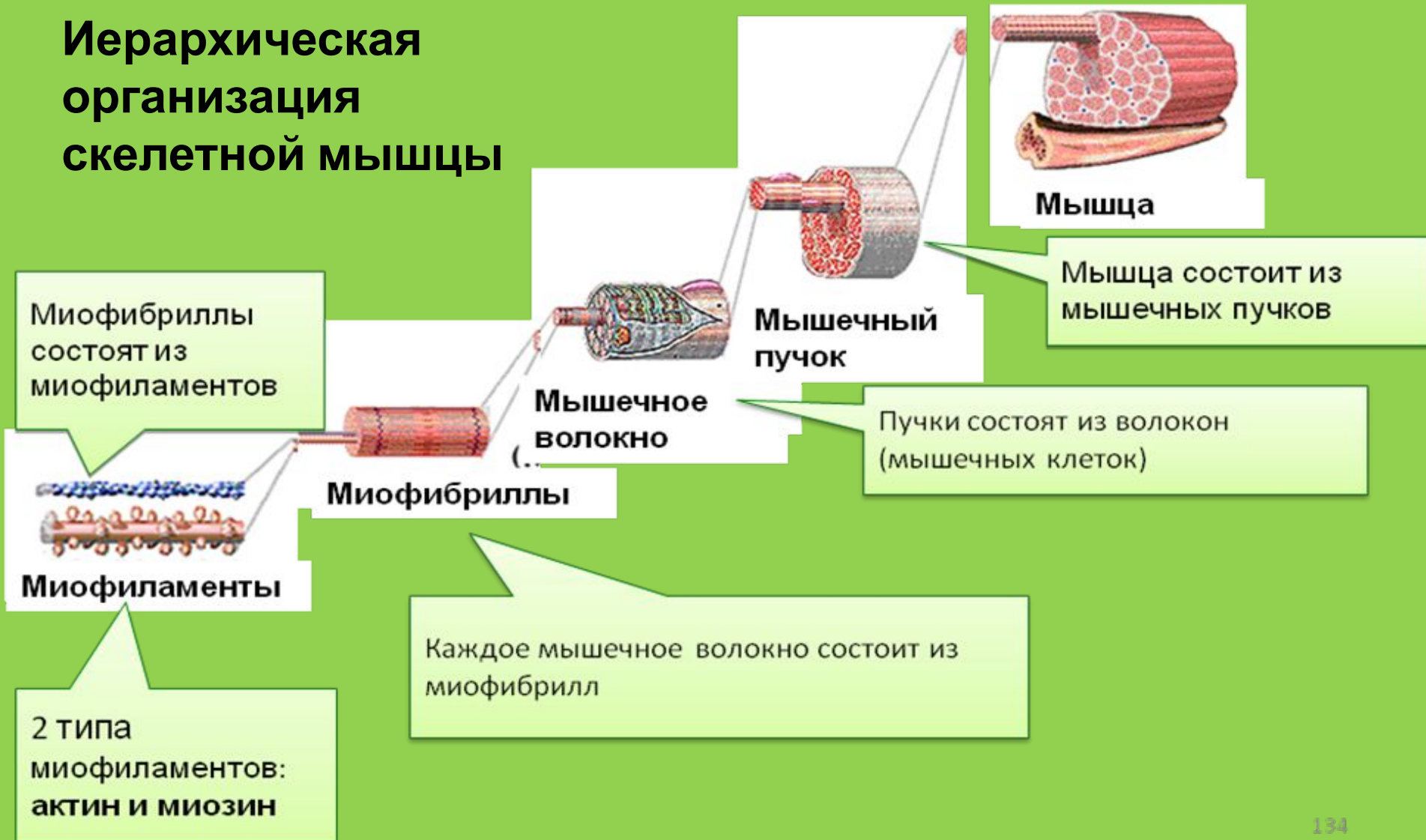


Тема 5

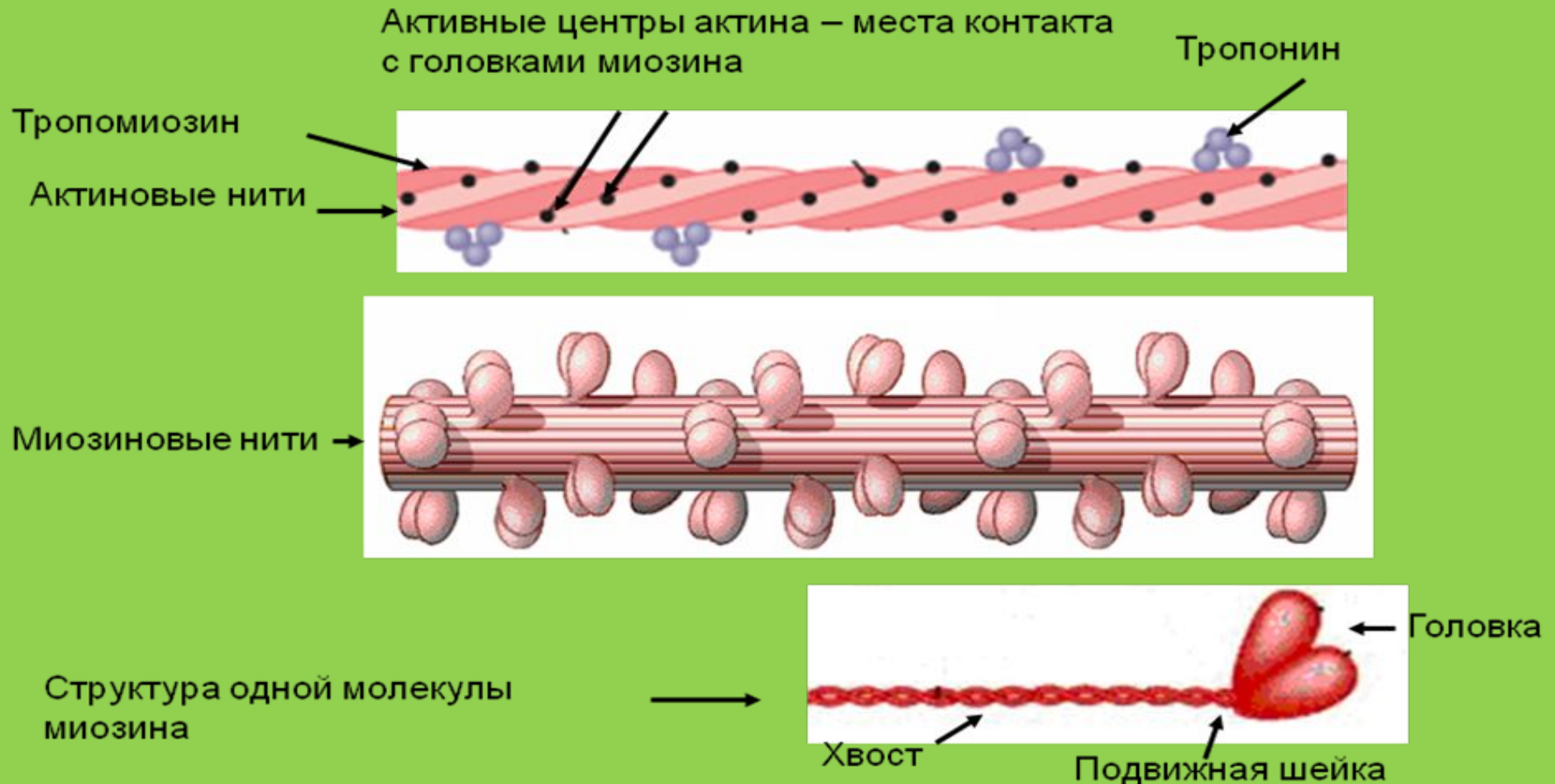
ФИЗИОЛОГИЯ МЫШЦ

1. Морфофункциональная организация скелетных мышц

Иерархическая организация скелетной мышцы



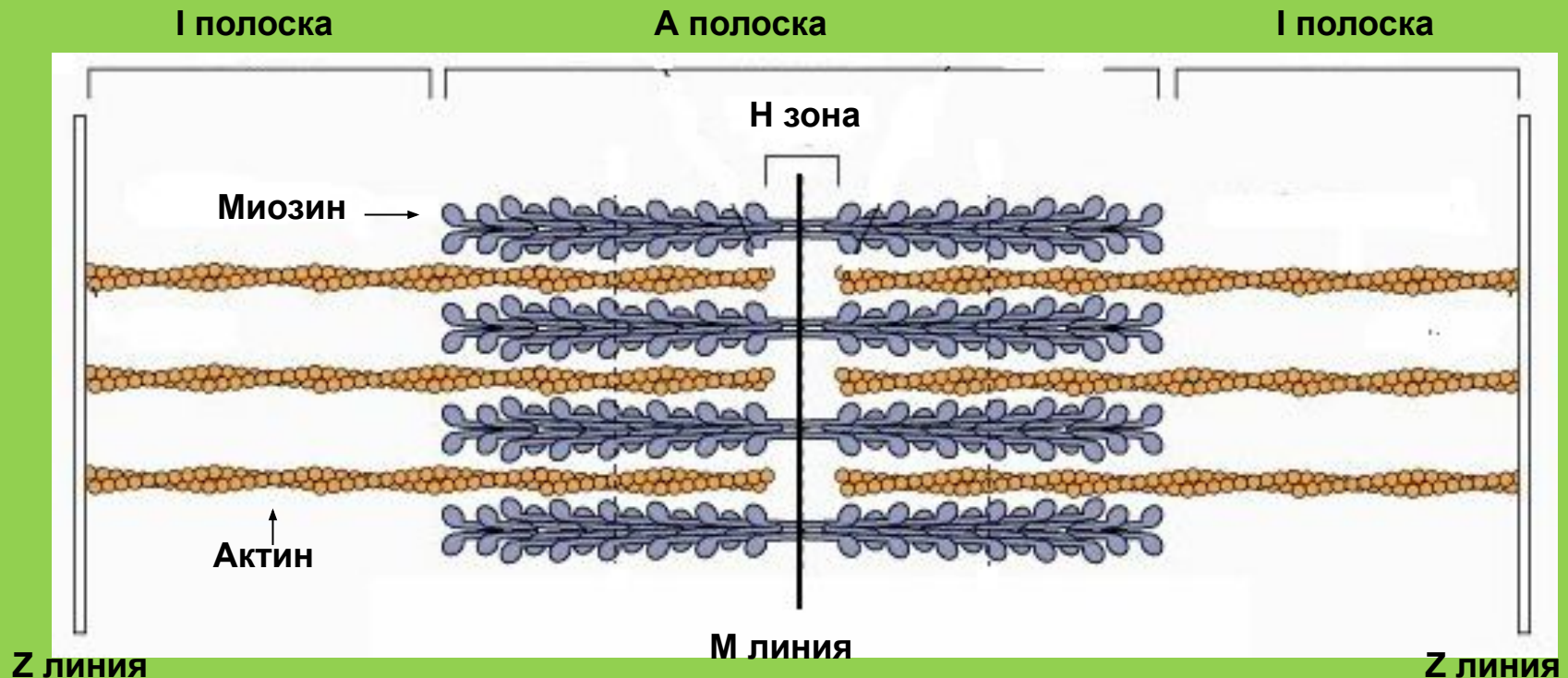
Миофиламенты



С актиновыми филаментами ассоциирован **тропомиозин-тропониновый комплекс**, который в расслабленном состоянии мышцы покрывает активные центры актина, что предотвращает взаимодействие между актином и миозином. Одна из единиц **тропонина** (тропонин С) имеет участок, присоединяющий ионы кальция.

Миозин обладает **АТФазной активностью**

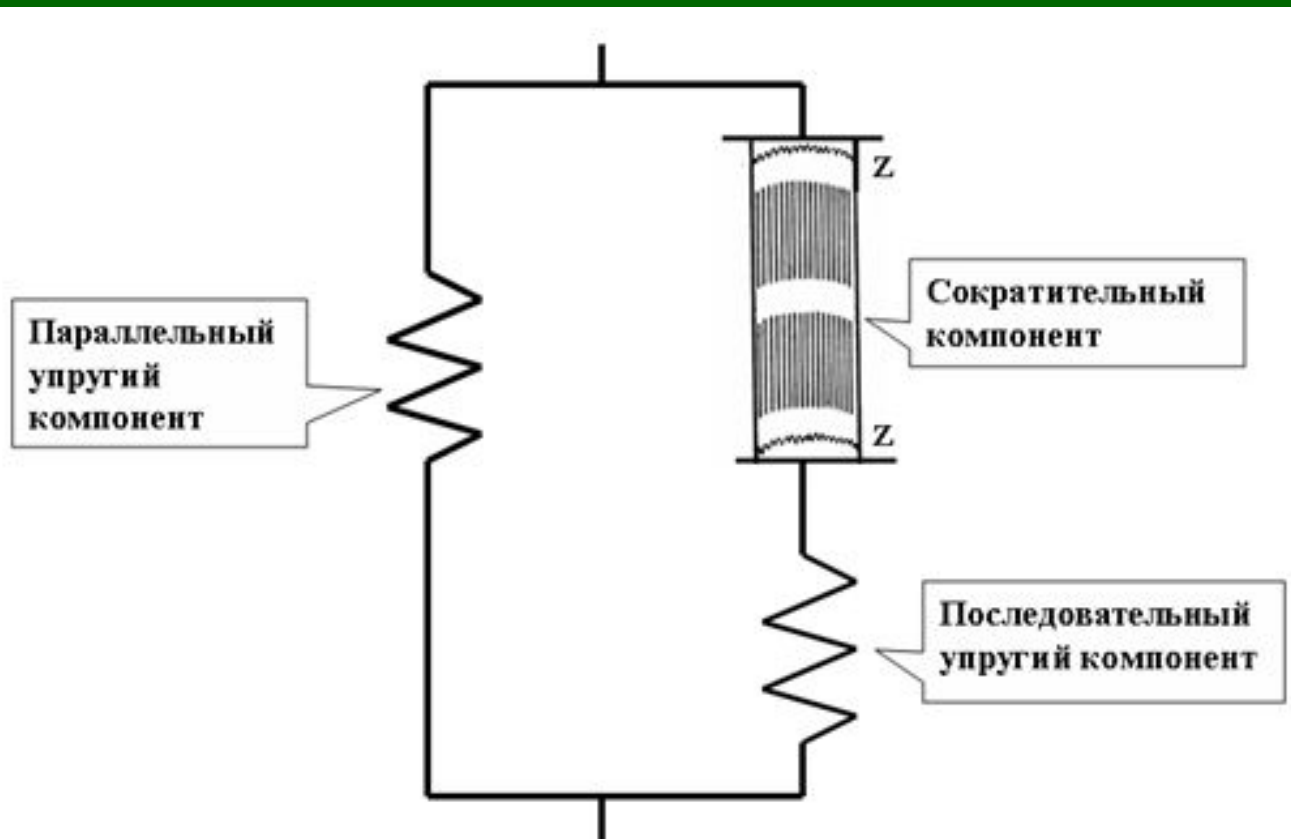
Саркомер - морфо-функциональная сократительная единица мышцы



Саркомер – это повторяющийся участок волокна между 2-мя Z дисками (линиями).

Сократительные компоненты обладают сократимостью, упругостью, вязкостью и другими механическими свойствами; **развивают силу тяги при сокращении**

Упругие компоненты мышцы



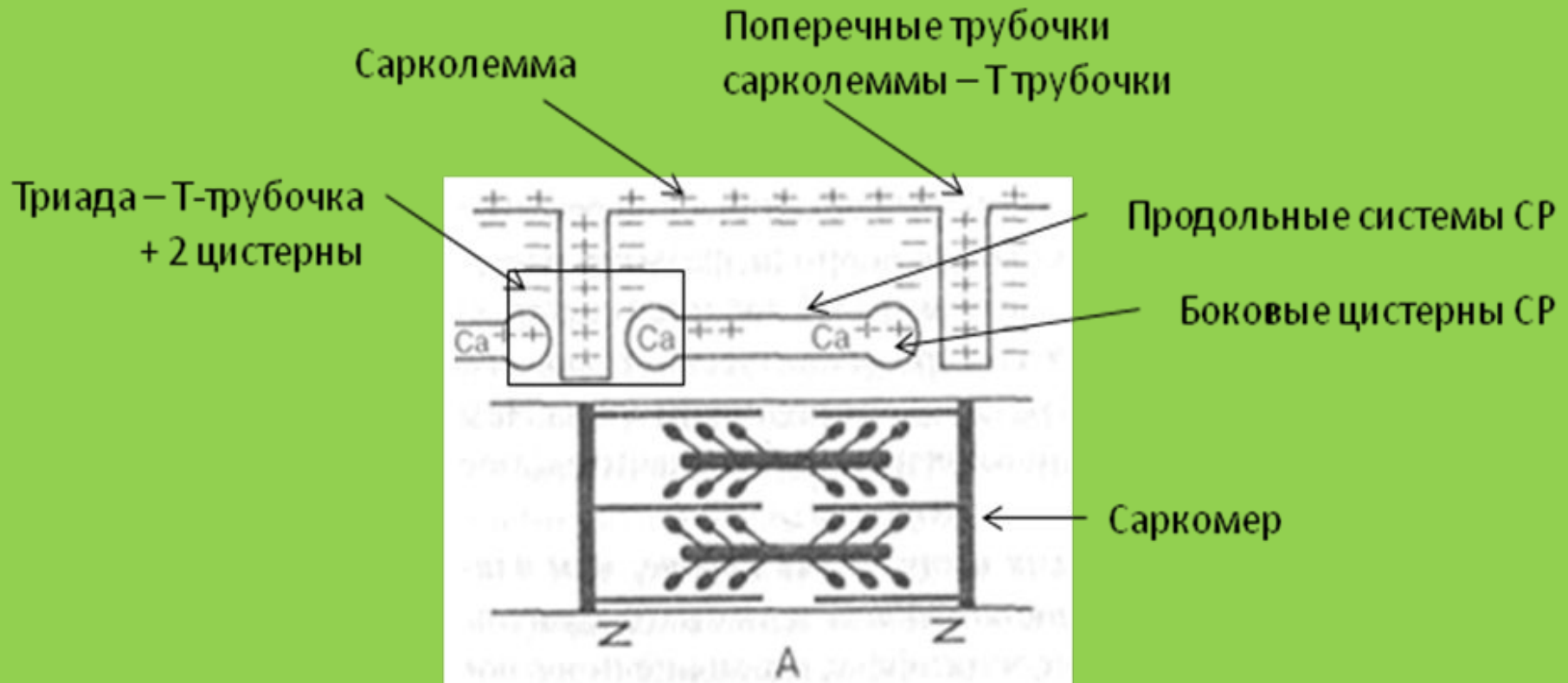
Обладают **нелинейной упругостью** и другими механическими свойствами

Параллельные (ПаУК) - соединительнотканые образования, покрывающие мышечные волокна, их пучки и мышцу в целом.

Последовательные (ПоУК) - сухожилия мышцы, места перехода миофибрилл в соединительную ткань, а также отдельные участки саркомеров.

Благодаря сочетанию ПоУК и СК вся система может сообщать перемещаемому костному звену **скорость, которая превышает скорость сокращения СК мышцы.**

Мембрана мышечного волокна и саркоплазматический ретикулум



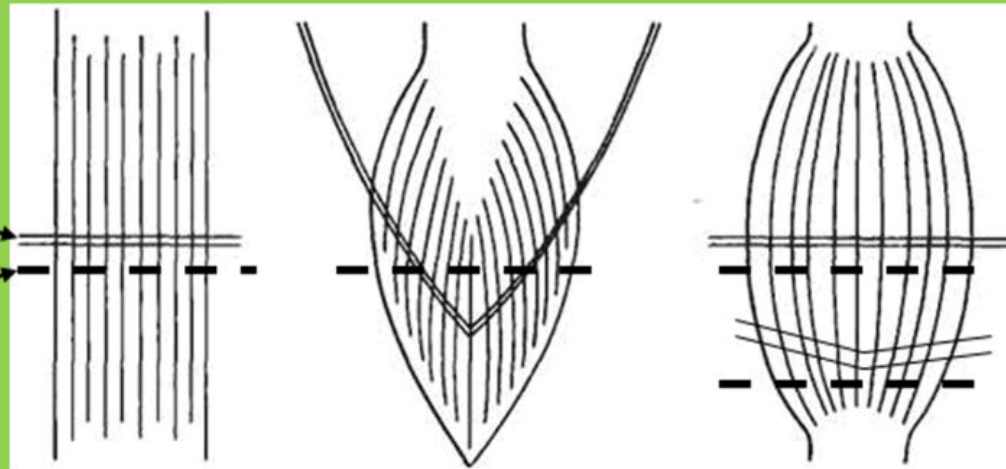
4. Классификация мышц

По направлению мышечных волокон:

- прямые (прямое параллельное направление волокон);
- косые (одноперистая – косые волокна прикрепляются к сухожилию с одной стороны;
- двуперистая – с 2-х сторон; многоперистая – с нескольких сторон);
- поперечные; веретенообразные; круговые и др.
- Направление мышечных волокон изменяет площадь физиологического сечения и силу мышцы.
 - **Атомическое (геометрическое) сечение** – это поперечное сечение мышцы.
 - **Физиологическое сечение** – сумма сечений всех волокон, образующих мышцу.

Физиологическое
поперечное
сечение

Геометрическое
поперечное
сечение



Мышцы с
параллельными
волокнами

Двуперистая
мышца

Веретёнообразная
мышца

- **По количеству головок** (и сухожилий)
- **По количеству суставов**, через которые перекидываются мышцы:
- **По функции:**
 - сгибатели и разгибатели; пронаторы и супинаторы; ротаторы; сжиматели (сфинктеры) и др.
- **По типу группового взаимодействия:**
 - **антагонисты** – мышцы, оказывающие противоположное действие (например, сгибатели и разгибатели);
 - **синергисты** – мышцы, выполняющие однотипные движения (расположены по одну сторону оси сустава).
- **По расположению**

3. Механические и биологические свойства скелетных мышц

Биологические свойства - возбудимость, проводимость и сократимость.

Механические свойства - упругость, вязкость, ползучесть, релаксация, прочность и твёрдость.

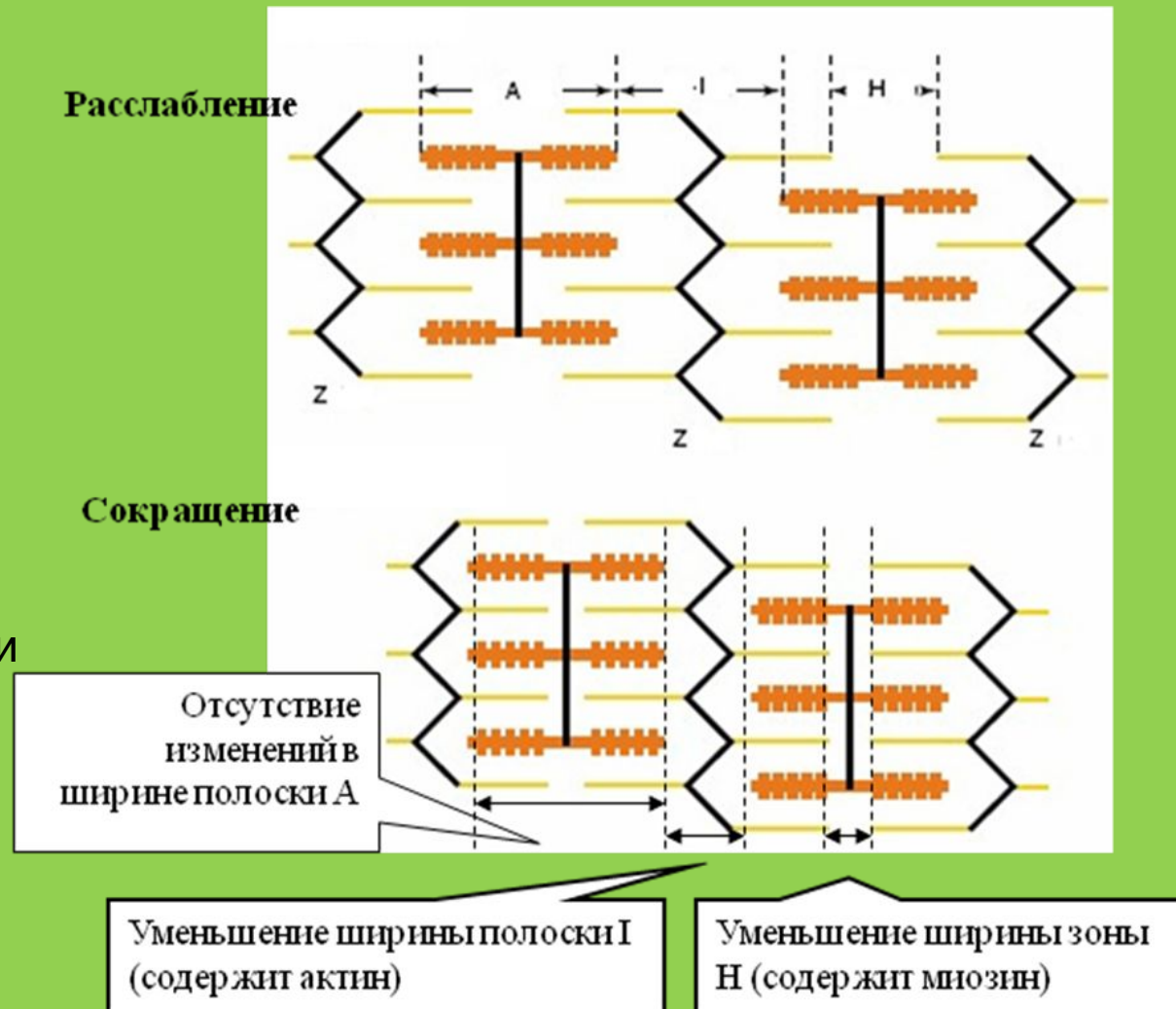
Функции скелетных мышц

- Обеспечение позы тела
- Передвижение тела в пространстве
- Перемещение отдельных частей тела относительно друг друга
- Теплообразование и терморегуляция.

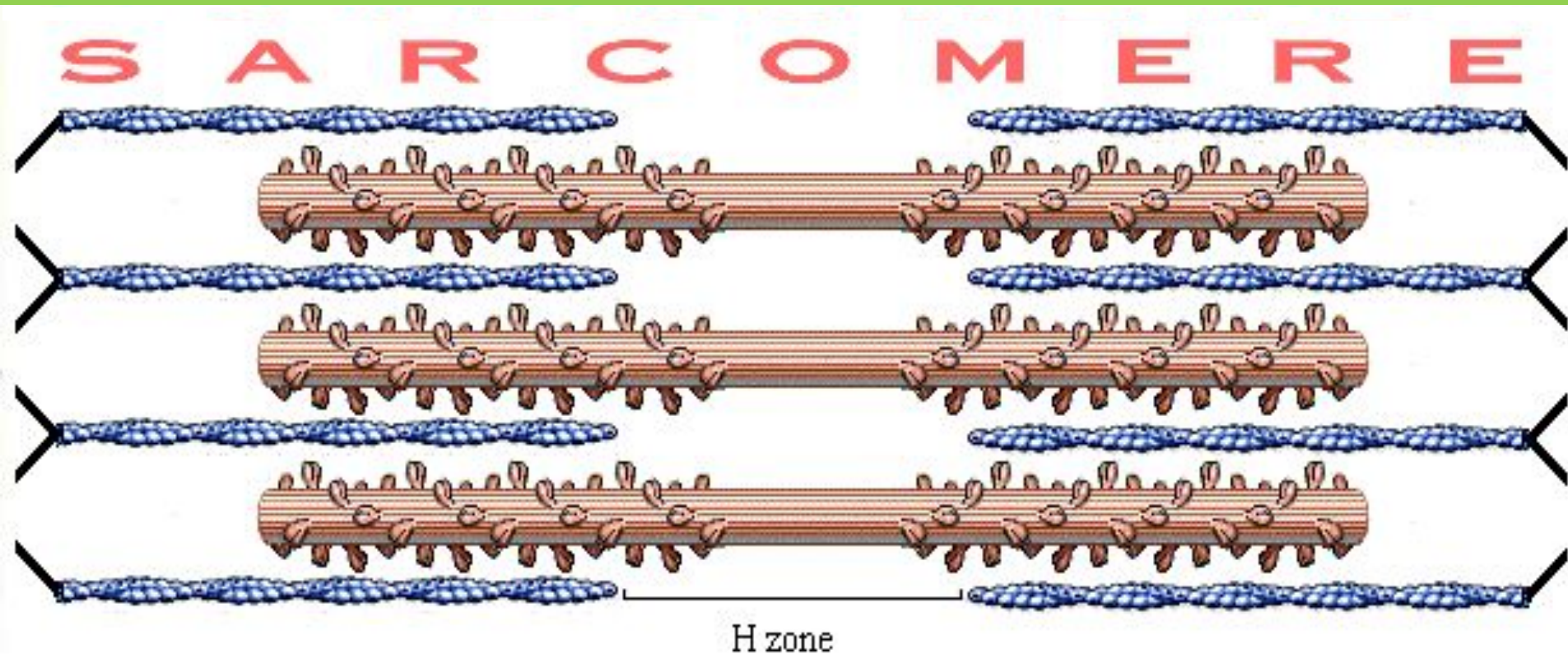
4. Биомеханика и физиология мышечного сокращения

Теория скользящих филаментов

- Во время мышечного сокращения и расслабления длина саркомеров изменяется, но **длина актиновых и миозиновых филаментов остаётся неизменной**.
- Изменения в длине саркомеров является следствием **скольжения актиновых и миозиновых нитей друг относительно друга**. При сокращении происходят процессы **электрохимического и хеомеханического сопряжения**.

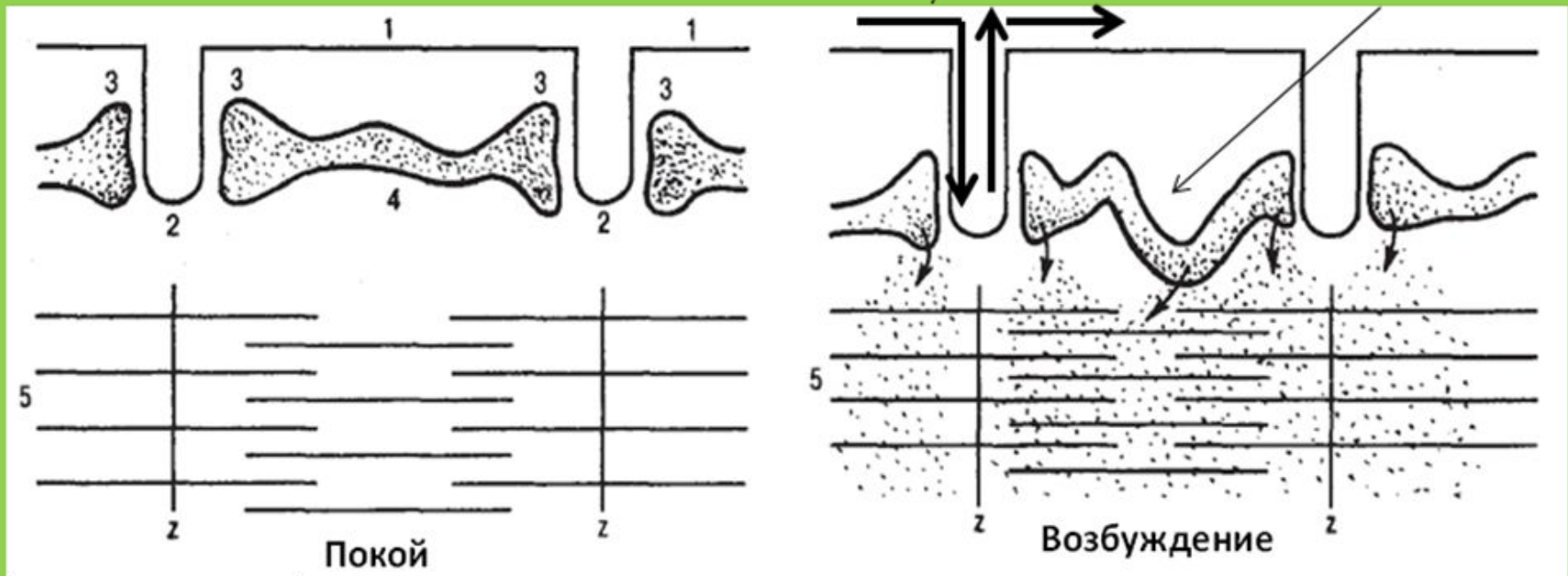


Теория скольжения миофиламентов: анимация



Электрохимическое сопряжение

- В **естественных условиях** генерация ПД мышечной мембраной происходит в результате возбуждения мотонейрона, иннервирующего данную мышцу, и передачи возбуждения в нервно-мышечном синапсе с окончания мотонейрона на мембрану мышечного волокна.
- ПД **распространяется по сарколемме, включая Т-трубочки.**
- Деполяризация мембраны Т-трубочек вызывает **выделение ионов кальция** из СР мышечной клетки и повышению концентрации внутриклеточного кальция.



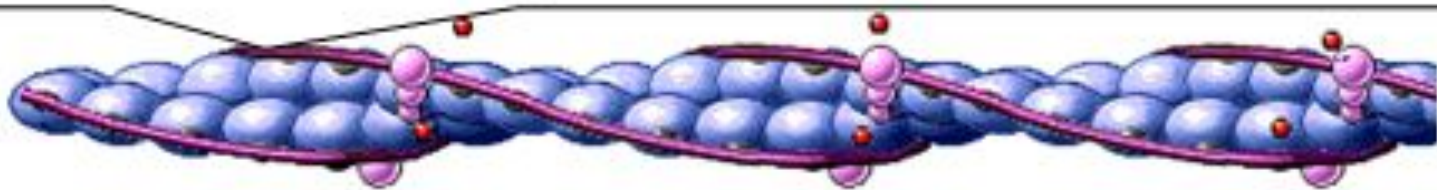
1 – сарколемма, 2 - Т трубочки, 3 – боковые цистерны СР, 4 –
продольные рубочки СР

Хемомеханическое сопряжение

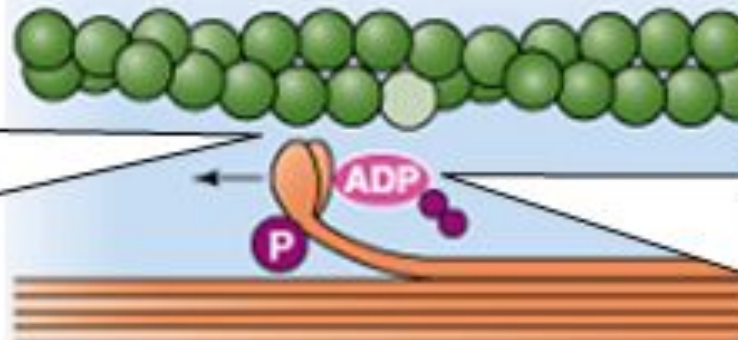
- В результате **увеличения концентрации ионов кальция** в саркоплазме мышечного волокна **происходит активация процесса хемомеханического сопряжения** – циклов формирования и разъединения **поперечных мостиков** между актином и миозином: освобождение активных центров актина в результате связывания кальция с тропонином С; формирование поперечных мостиков между актином и миозином; скольжение миофиламентов; укорочение саркомеров и волокна.
- Поперечные мостики между актиновыми и миозиновыми нитями, формируются, движутся и рассоединяются по принципу, схожему с греблей веслом при плавании на лодке.

Отсутствие взаимодействия между актином и миозином в расслабленном состоянии мышцы

Тропонин-тропомиозиновые комплексы покрывают активные участки актина, способные присоединять миозиновые головки.



Отсутствие взаимодействия между актином и миозином.



Миозиновые головки в высокоэнергетическом состоянии – АДФ (ADP) и фосфат (P) присоединены к головке.

Присоединение Ca^{++} к тропонину С $\rightarrow$ открытие активных участков актина, способных присоединять миозиновые головки

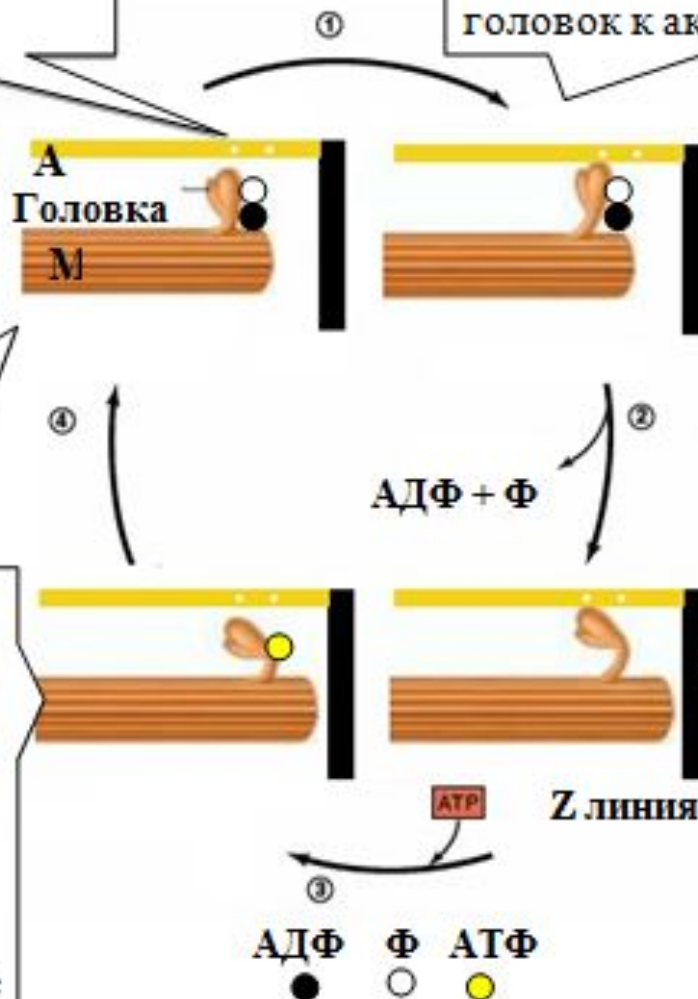
Расслабленная мышца:
головки миозина в
высоко-энергетическом
состоянии.

**1. Фаза формирования
поперечного мостика**
(присоединение миозиновых
головок к актину)

**4. Возвращение
миозиновой
головки в
исходное
состояние**
вследствие
гидролиза АТФ

**3. Разъединение
мостика в
результате потери
сродства миозина к
актину при
присоединении
молекулы АТФ к
миозиновой головке**

**2. Фаза сгибания
поперечного
мостика в сторону
центра саркомера**
 $\rightarrow$ скольжение
миофиламентов
и/или развитие
активного
напряжения



Механизм мышечного расслабления

Активный транспорт Ca^{++} (кальциевый насос) из саркоплазмы в СР



Уменьшение концентрации свободного Ca^{++} в саркоплазме →
Диссоциации Ca^{++} от тропонина С

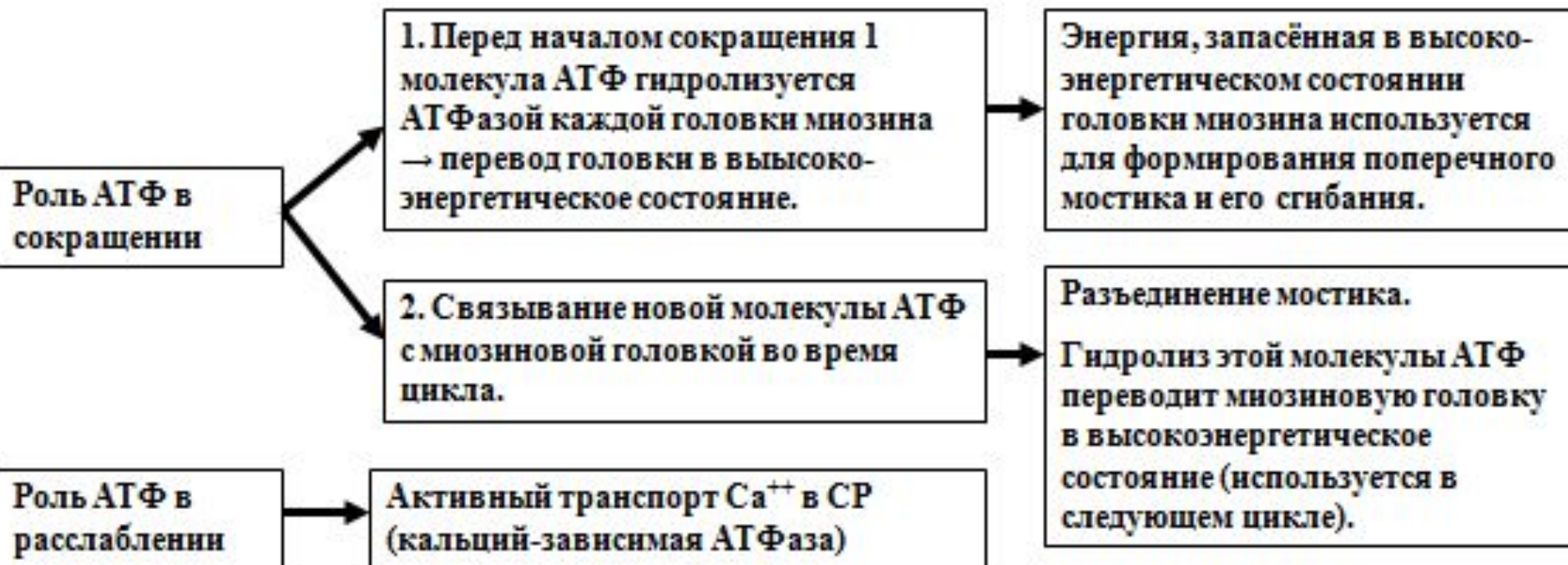


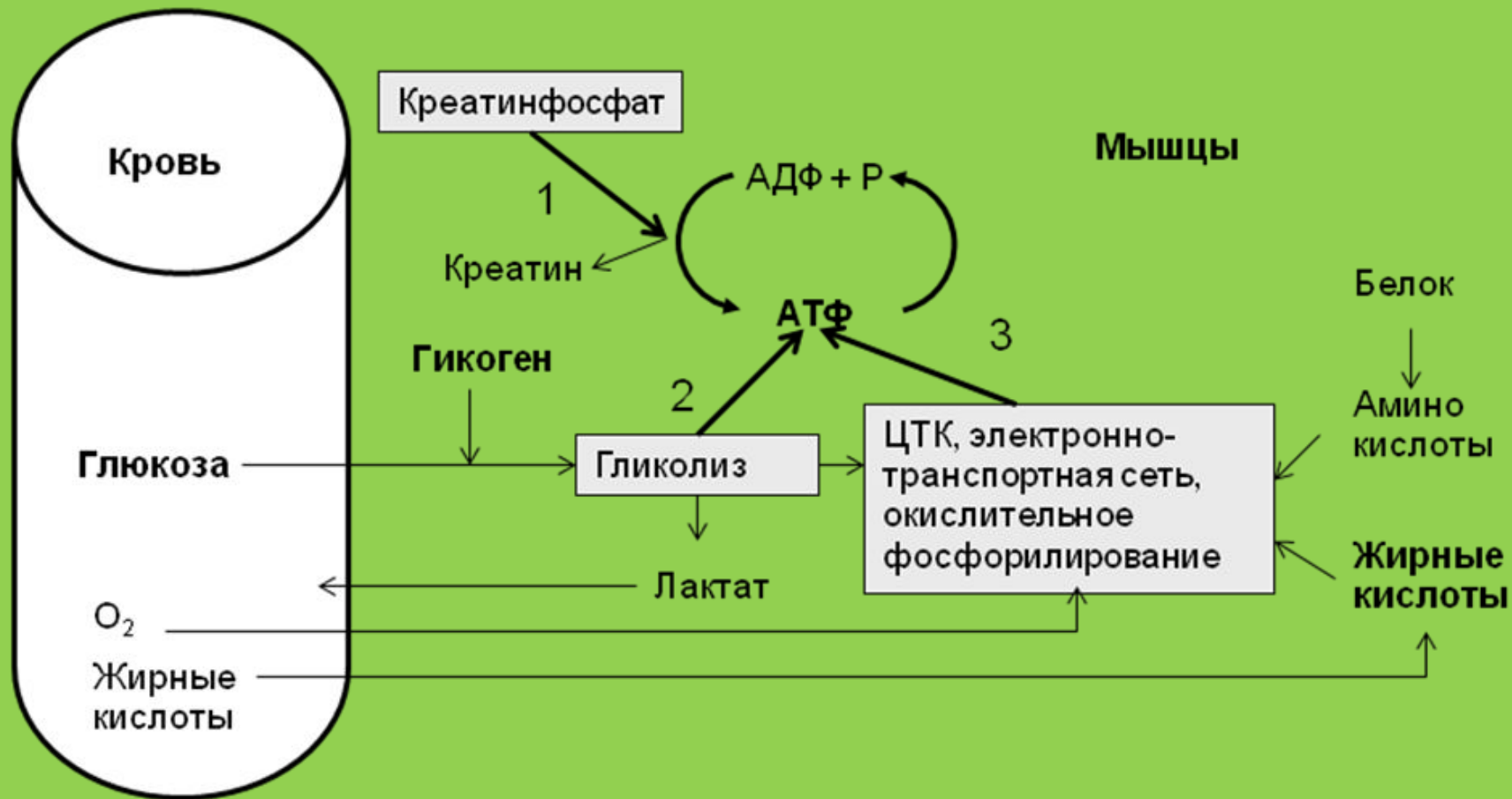
Тропонин-тропомиозиновый комплекс блокирует миозин-
присоединяющие участки актина



Поперечные мостики не могут быть снова сформированы, как
только они отсоединяются от актина → расслабление

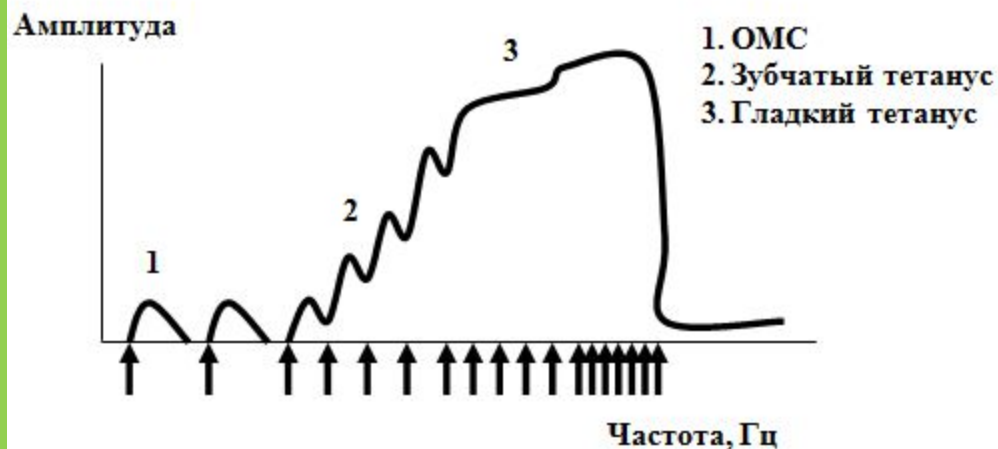
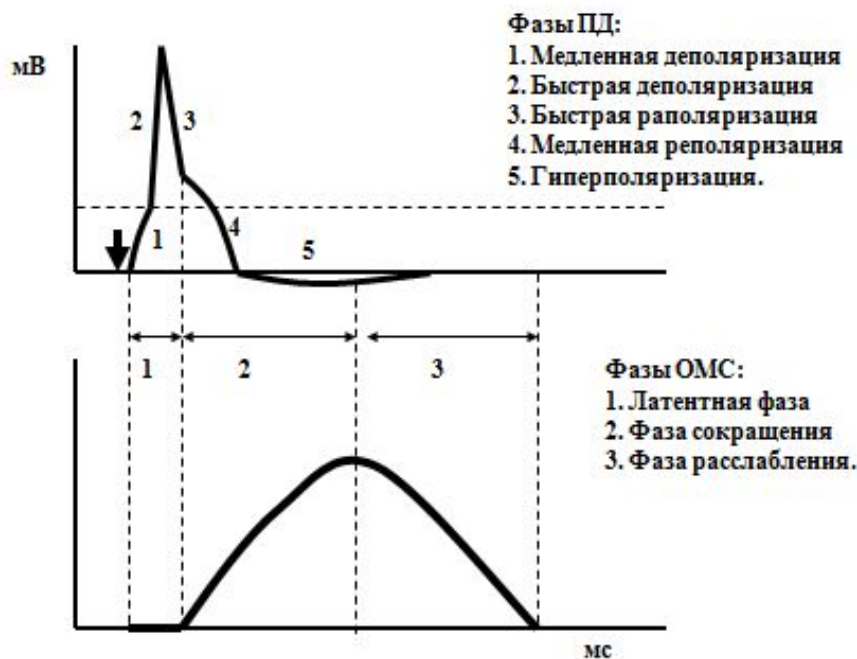
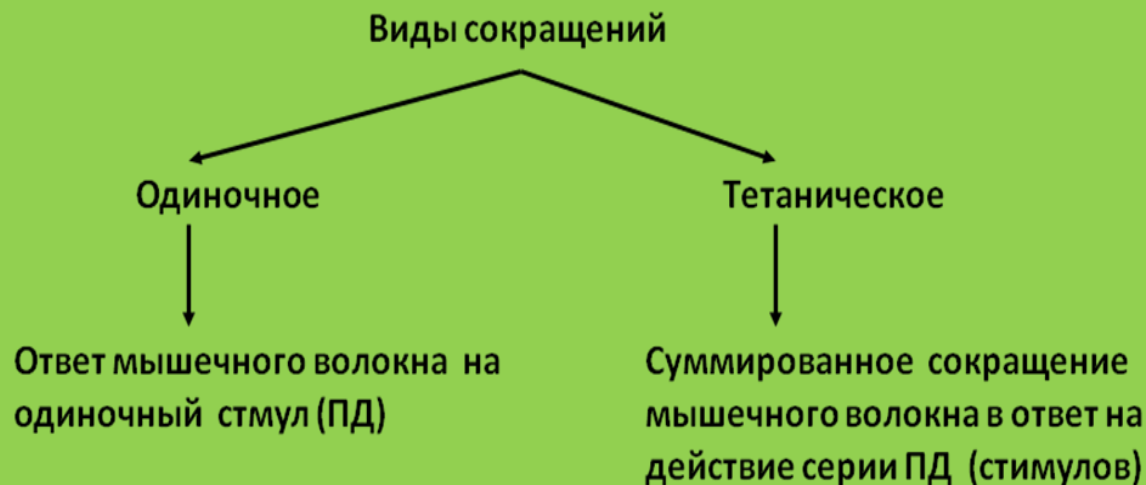
5. Энергетика мышечного сокращения



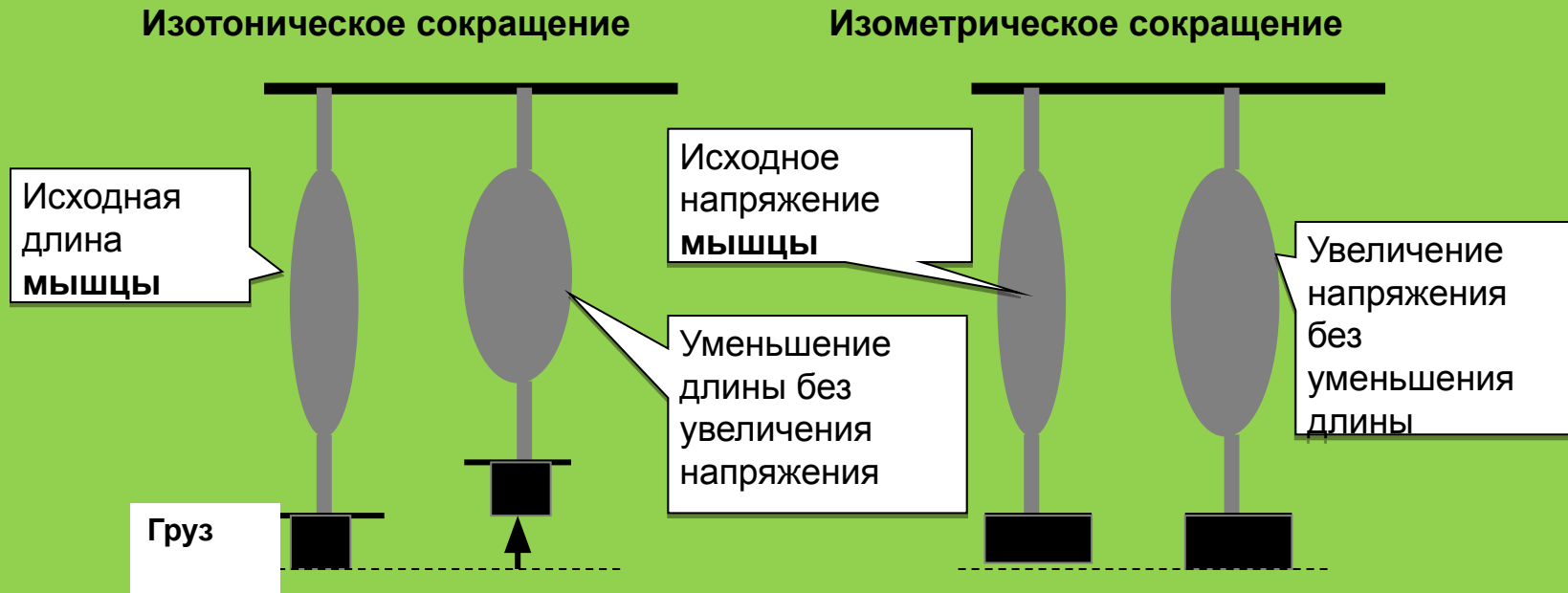


Три основных пути преобразования энергии в организме (3 источника АТФ) на примере скелетной мышцы. 1 - регенерирование АТФ креатинфосфатом, 2 - анаэробный гликолиз, 3 - ЦТК

6. Виды мышечных сокращений



7. Режимы мышечных сокращений



Ауксотонический (смешанный) – при сокращении мышцы происходит и укорочение и увеличение напряжения.

Уступающий – мышца сокращается, но приложенная нагрузка растягивает (удлиняет) её, несмотря на развиваемое.

Тонические и фазные сокращения

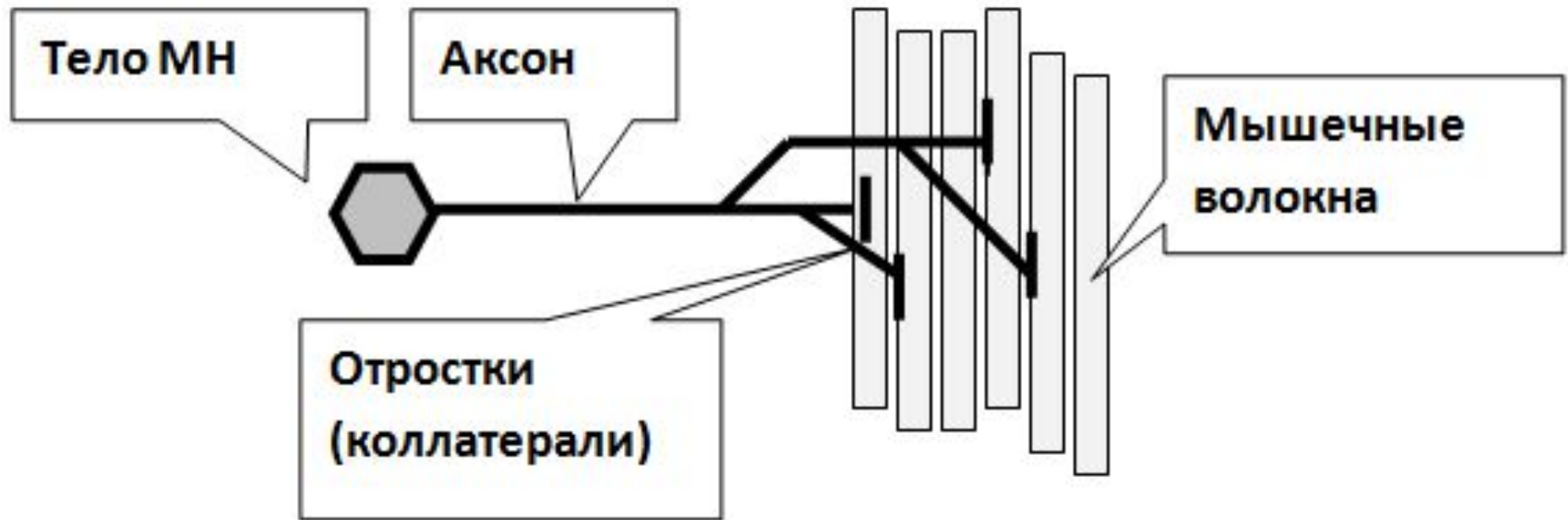
- **Тонические сокращения:**

- длительные, медленные и низкоамплитудные сокращения мышц, зависящие от активности небольшого количества тонических ДЕ;
- участвуют в обеспечении мышечного тонуса, поддержании позы и равновесия тела.

- **Фазные сокращения:**

- кратковременные, быстрые и высокоамплитудные сокращения мышц, зависящие от активности большого количества фазных ДЕ;
- участвуют в перемещении звеньев тела друг относительно друга и движении всего тела в пространстве.

8. Двигательные единицы. Типы двигательных единиц



Принцип рекрутирования (вовлечения) ДЕ в процесс сокращения мышцы

- ДЕ вовлекаются в процесс возбуждения и сокращения в соответствии с их размером. В начале активируются самые маленькие и наиболее возбудимые ДЕ. Увеличение силы стимуляции мышцы приводит к рекрутированию более крупных и менее возбудимых ДЕ и увеличению напряжения/сокращения мышцы.

Сравнительная характеристика 3-х типов мышечных волокон

Характеристики	I тип медленные оксидативные	IIa тип быстрые оксидативно-гликолитические (промежуточные)	IIb тип быстрые гликолитические
Диаметр	Маленький	Средний	Большой
Содержание миоглобина	Высокое	Высокое	Низкое
Цвет	Красные (много миоглобина и митохондрий)	Светло-красный (красный)	Белые (мало миоглобина и митохондрий)
Плотность митохондрий	Высокая	Высокая	Низкая
Оксидативные возможности и плотность капилляров	Высокие	Высокие	Низкие
АТФ-аза миозина	Медленная	Быстрая	Очень быстрая
Гликолитические возможности и содержание гликогена	Низкие	Промежуточные	Высокие
Обмен веществ	Окислительный	Смешанный (окислительно-гликолитический)	Гликолитический
Порог активации	Низкий	Средний	Высокий
Скорость сокращения	Медленная (частота нервных импульсов до 25 Гц)	Средняя (25-50 Гц)	Высокая (частота нервных импульсов 50-100 Гц)
Устойчивость к утомлению	Высокая Снижение силы на 50% через несколько часов	Средняя Снижение силы на 50% через 10 мин	Низкая Снижение силы на 50% через 1,5 мин
Функции (примеры)	Пока, активность на выносливость; медленные и длительные сокращения антигравитационных мышц шеи, спины и конечностей (в основном разгибателей)	Ходьба; длительные фазные движения (в основном сгибатели)	Кратковременные анаэробные нагрузки; кратковременные фазные движения (в основном сгибатели)

9. Сила, механическая работа, мощность и КПД мышц

Сила мышц

- **Общая сила** определяется максимальным грузом, который мышца в состоянии поднять, или максимальным напряжением, которое мышца способна развить.
- **Удельная (или абсолютная) сила** – отношение общей силы к площади физиологического поперечного сечения. Используется для сравнения силы различных мышц.

Работа мышц – это энергия, затрачиваемая на перемещение тела с определенной силой (F) на определенное расстояние (h): **$A = F \cdot h$** (кгм).

- **Виды работы**
 - **Статическая.**
 - **Динамическая**
 - преодолевающая (концентрическую) работа.
 - уступающая (эксцентрическую) работа.

Мощность мышцы равна произведению скорости и силы сокращения.

Коэффициент полезного действия мышцы (КПД)

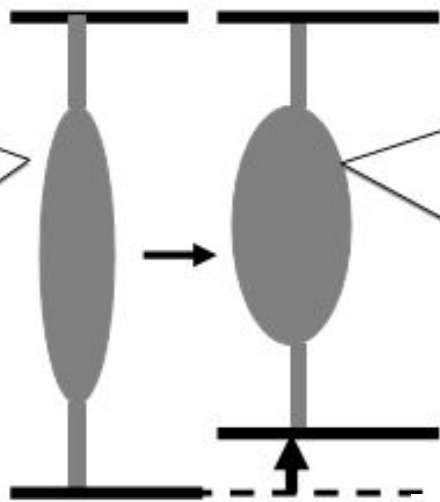
- **КПД** – это отношение полезной мощности к затраченной мощности (энергия, затраченная мышцей за единицу времени).
- КПД мышц = 25-33%.

Теплообразование в мышце

- **Компоненты**
 - Тепло активации.
 - Тепло сокращения.
 - Тепло расслабления.

10. Активное и пассивное напряжение мышцы

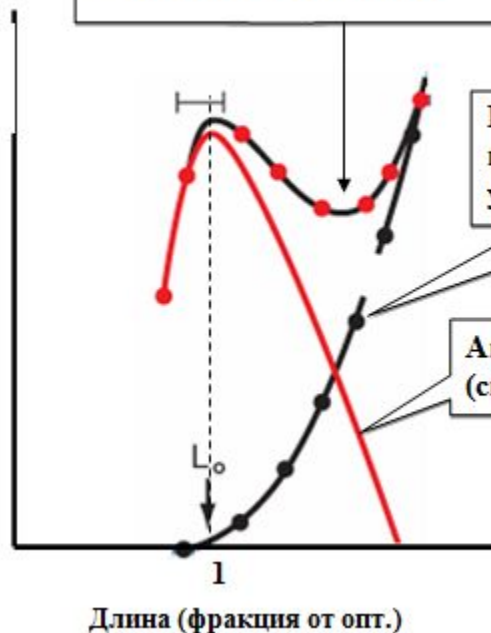
В расслабленной мышце возникает упругая деформация и пассивное напряжение за счёт упругих компонентов.



При сокращении в мышце возникает активное напряжение и развивается сила тяги за счёт сократительных компонентов.

Напряжение
(сила тяги),
кг/см³

Общее напряжение (суммарная сила тяги)
= Активное + Пассивное



11. Факторы, определяющие величину силы тяги мышц. Зависимость «сила-длина»

- **Механические факторы**
 - Внешняя нагрузка: отягощение, инерция и пр.
- **Анатомические факторы**
 - **Строение мышцы**, определяющее площадь физиологического поперечного сечения.
 - **Расположение мышцы относительно оси сустава и костного звена** - определяет величину плеча силы, величину момента силы тяги и направление тяги мышцы.

Морфо-функциональные факторы, определяющие силу сокращения мышцы

Факторы, определяющие силу сокращения каждого волокна

**Частота генерации ПД
(суперпозиция сокращений –
тетанус) и сила раздражения**

**Начальная длина волокна
(взаимосвязь длины и силы)**

Диаметр волокон

Утомление

Факторы, определяющие количество активных мышечных волокон

**Размер ДЕ (количество
волокон)**

**Рекрутирование новых
ДЕ в процесс
сокращения**

- **Мышечная сила** увеличивается при увеличении частоты и силы стимуляции мышц (суммация сокращений), при рекрутировании новых ДЕ в процесс сокращения, увеличении диаметра волокон и количества волокон в мышце. Оптимальная длина мышцы перед сокращением также увеличивает силу сокращения.

Характер нервных импульсов изменяет силу сокращения мышц тремя способами:

- увеличением числа активных ДЕ - рекрутирование ДЕ (сначала происходит вовлечение медленных и более возбудимых ДЕ, затем - высокопороговых быстрых ДЕ);
- увеличением частоты нервных импульсов, что приводит к суперпозиции сокращений – тетанусу.
- увеличением синхронизации ДЕ → увеличение силы сокращения целой мышцы за счет одновременной тяги всех активных мышечных волокон.

Утомление

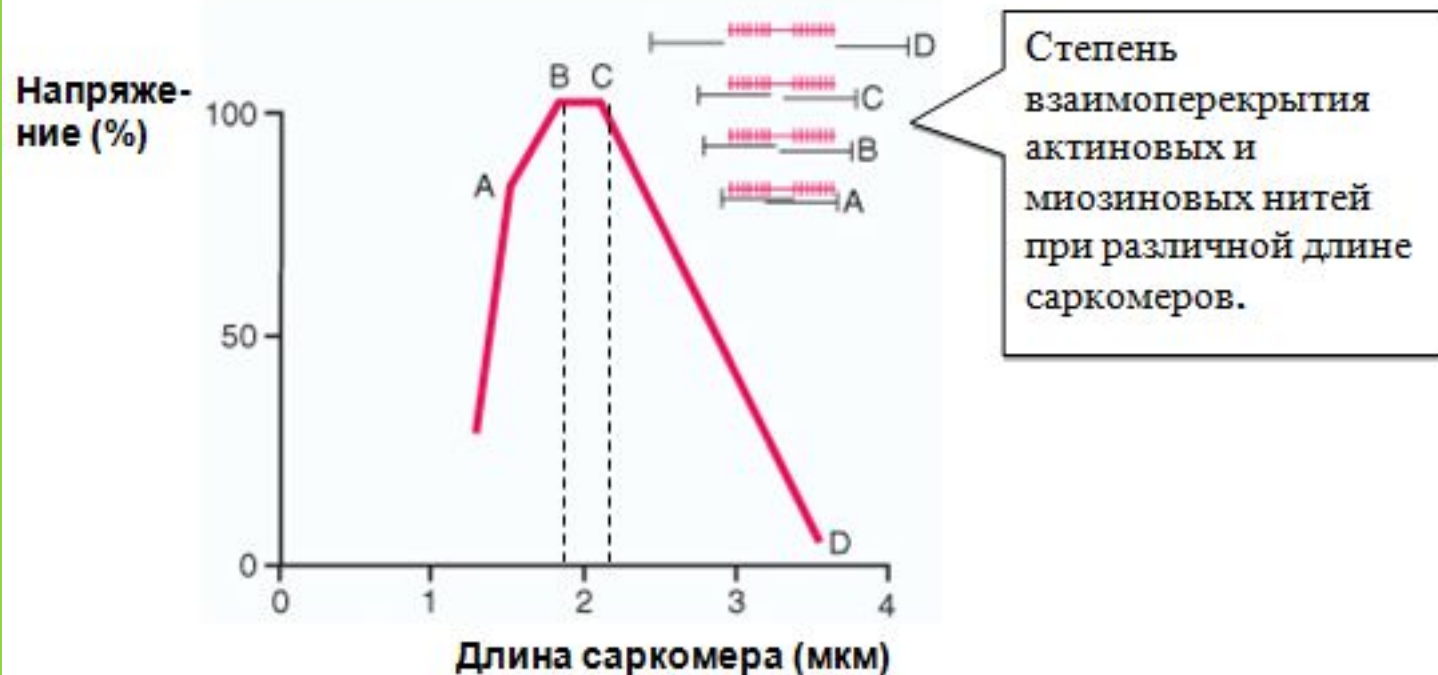
- **Утомление** – это вызванное работой временное снижение работоспособности, проходящее после отдыха.
- Выражается в уменьшении силы сокращений, увеличении латентного периода сокращения и периода расслабления.
- Статический режим работы более утомителен, чем динамический.

Причины утомления

- **Периферические (мышечные):** накопление метаболитов; снижение энергетических запасов и возможности ресинтезировать АТФ; неадекватное кровоснабжение и др.
- **Синаптические:** истощение запасов нейромедиатора в нервно-мышечном синапсе.
- **Центральные:** торможение, ухудшение синтеза нейромедиаторов, угнетение синаптической передачи и др. процессы в двигательных центрах.

Взаимосвязь между исходной длиной мышцы и ее активным напряжением (силой тяги): кривая «сила-длина»

- **Максимальное активное напряжение** мышцы развивается, когда исходная длина саркомеров близка к натуральной длине (умеренное физиологическое растяжение мышцы) – около 2,5 мкм (участок В-С).
- При исходной длине саркомеров больше (участок А-В) или меньше (участок С-Д) натуральной мышца развивает меньшее активное напряжение.



12. Факторы, влияющие на скорость сокращения мышцы

- **Длина мышечного волокна:** чем длиннее волокно, тем выше скорость его сокращения.
 - Увеличение физиологического поперечника мышцы приводит к увеличению силы без изменения скорости укорочения. Увеличение длины мышцы приводит к увеличению скорости сокращения без изменения силы.
- **Тип волокна** (быстрое или медленное).
- **Нагрузка на мышцу:** зависимость скорости от нагрузки. Чем больше нагрузка на мышцу, тем меньше скорость её сокращения.



13. Зависимость «сила-скорость» сокращения

