

ФИЗИОЛОГИЯ

Лекция № 3

МЕХАНИЗМ МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ





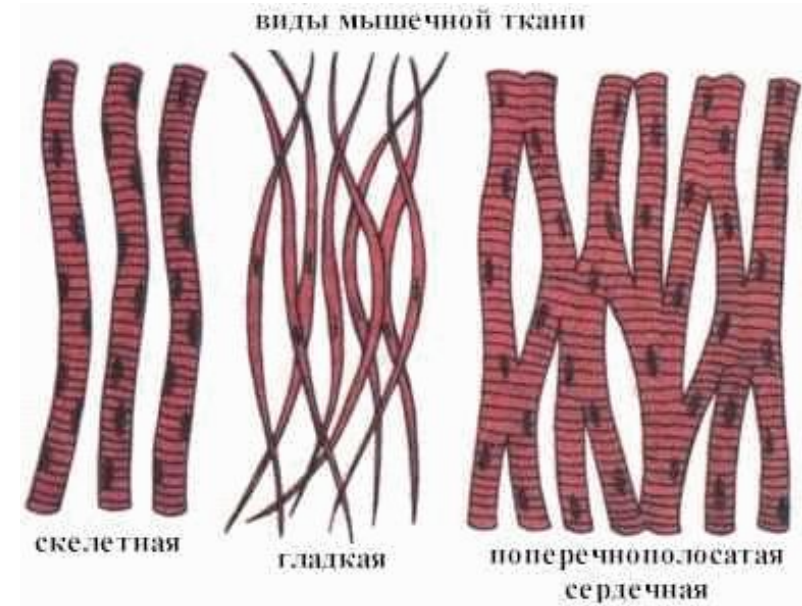
План лекции

1. Мышечные ткани (обзор).
2. Структурно-функциональная характеристика мышечной ткани, ее иннервация
3. Физиологические свойства мышечной ткани.
4. Механизм мышечного сокращения поперечно-полосатых мышц.
5. Явления, сопровождающие мышечное сокращение.

1) **МЫШЕЧНЫЕ ТКАНИ (мышцы)** – группа тканей организма различного происхождения, объединяемых по признаку сократимости. К ним относятся 3 вида мышц:

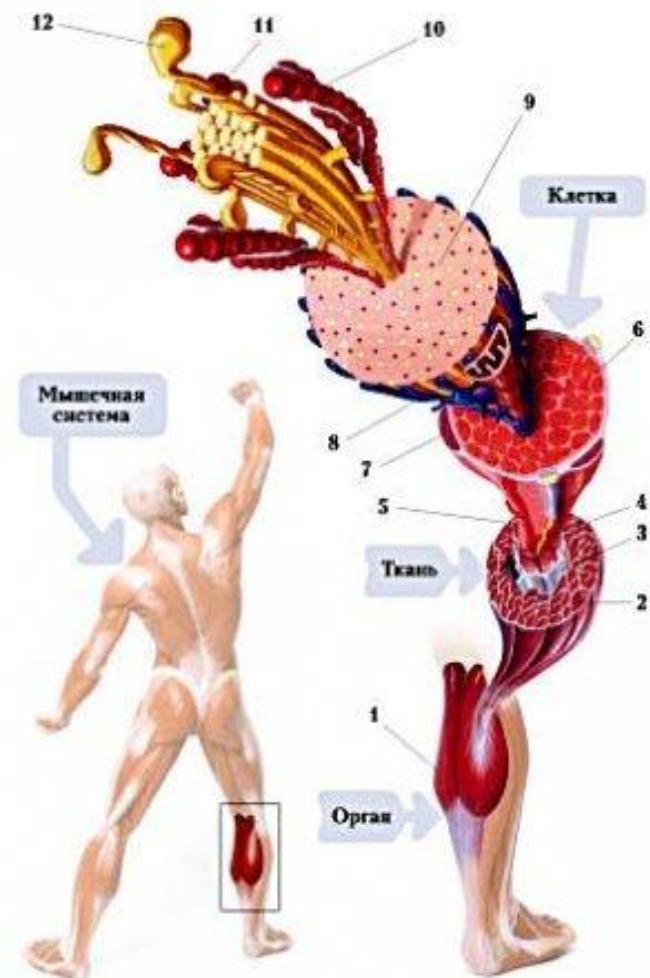
- *поперечно-полосатые мышцы тела* – скелетные мышцы,
- *гладкие мышцы* внутренних органов, сосудов и кожи,
- *поперечно-полосатые мышцы предсердий и желудочков сердца* (сердечная мышца),

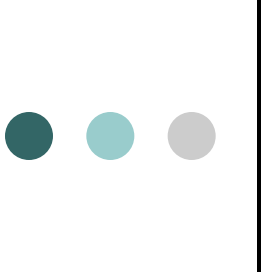
Все они различаются строением и физиологическими свойствами!



2) **Поперечно-полосатые мышцы** являются активной частью опорно-двигательного аппарата, который кроме этих мышц включает кости, связки, сухожилия. В результате сократительной деятельности скелетных мышц выполняются следующие функции в организме:

- а) передвижение организма в пространстве;
- б) перемещение частей тела относительно друг друга;
- в) поддержание позы тела в пространстве;
- г) выработка тепла и участие в терморегуляции;
- д) активация состояния коры через афферентации с рецептивных полей мышц.





Физиологические свойства поперечно-полосатых скелетных мышц

У человека, как и у всех позвоночных, волокна скелетных мышц обладают тремя важнейшими свойствами:

- 1) **возбудимость**, т.е. способностью отвечать на раздражитель изменениями ионной проницаемости и мембранного потенциала – формированием потенциала действия (ПД);
- 2) **проводимость** – способностью к проведению потенциала действия вдоль всего волокна;
- 3) **сократимость** – способностью сокращаться и изменять напряжение (изометрическое и изотоническое) при возбуждении.

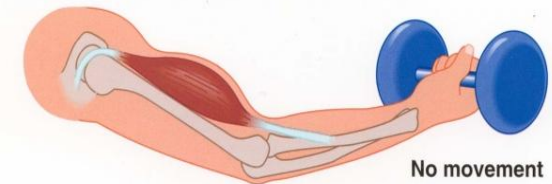
В естественных условиях возбуждение и сокращение мышц вызывается нервными импульсами, поступающими к мышечным волокнам из нервных центров.

Чтобы вызвать возбуждение в эксперименте, применяют электрическую стимуляцию. Непосредственное раздражение самой мышцы называется **прямым раздражением**; раздражение двигательного нерва, ведущее к сокращению иннервированной этим нервом мышцы, - **непрямым раздражением**.

ВИДЫ МЫШЕЧНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

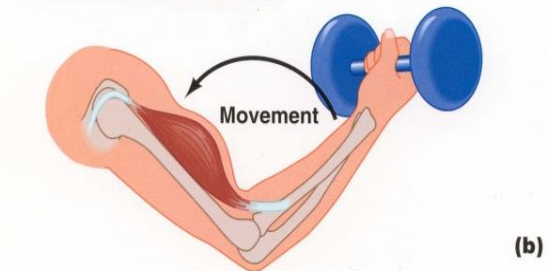
а) **изометрическое сокращение** характеризуется отсутствием эффекта укорочения на фоне развиваемой мышцей силы - сухожилия на концах мышцы закреплены так, что хотя мышца развивает силу, она не может укорачиваться, т.е. не может совершать работу, хотя в физиологическом смысле она конечно работает (изменение напряжения).

Isometric contraction
Muscle contracts
but does not shorten



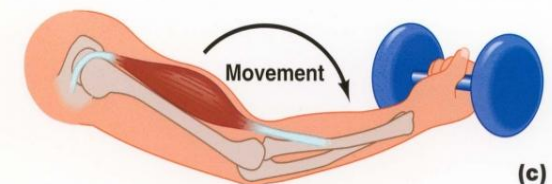
(a)

Concentric contraction



(b)

Eccentric contraction

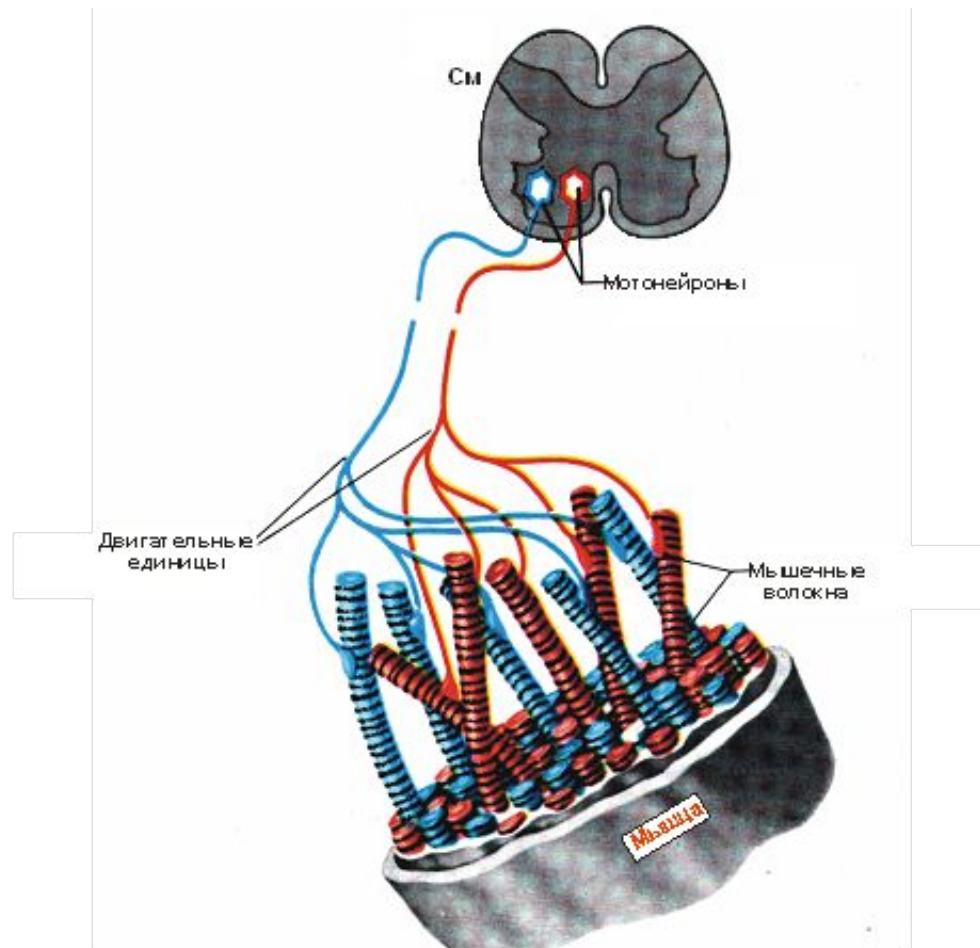


(c)

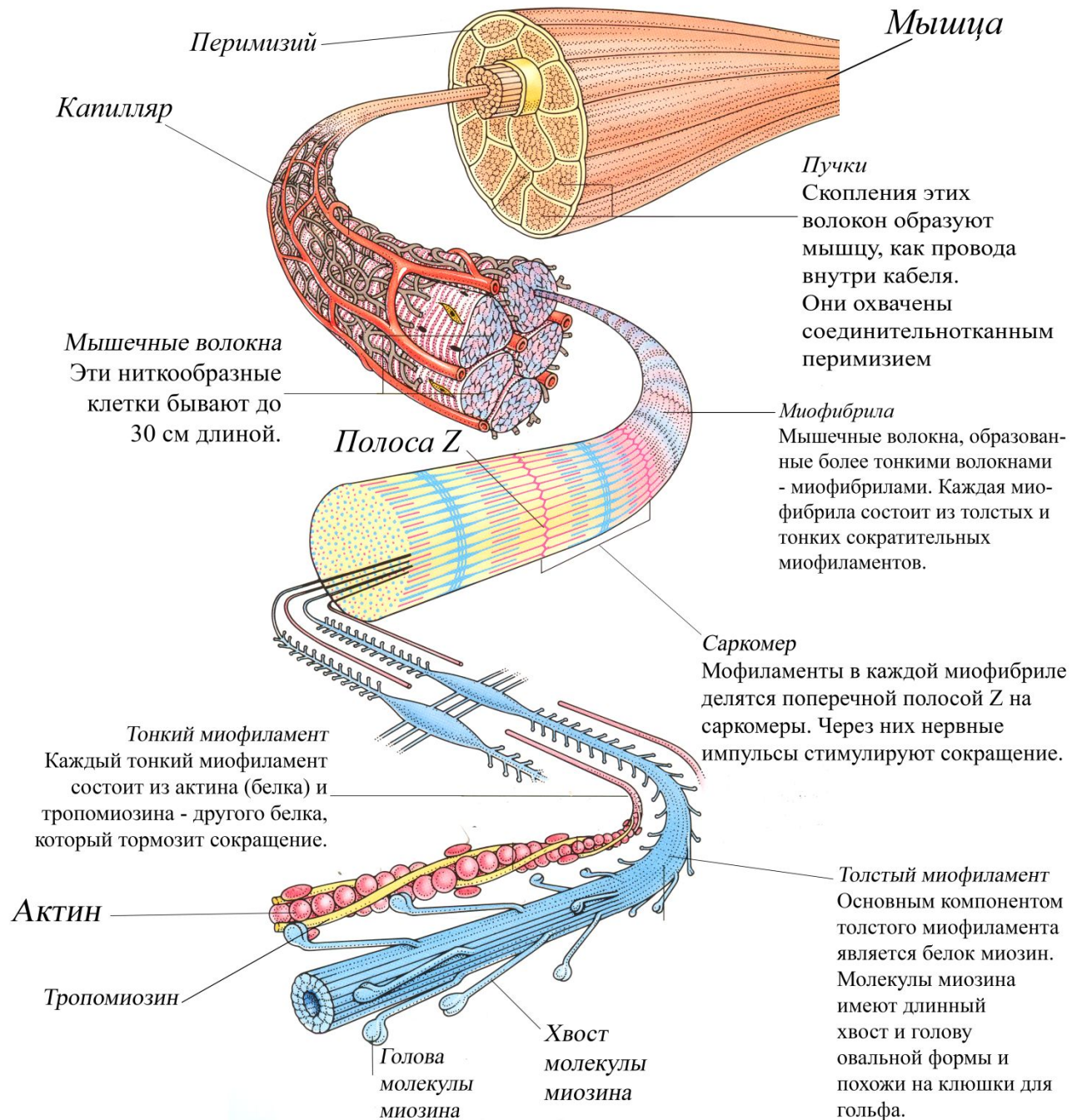
б) **изотоническое сокращение** - истинное укорочение мышцы, когда мышца укорачивается при выполнении физической нагрузки (изменение длины).

в) **ауксотонический (смешанный) тип мышечного сокращения** – возникает в условиях работы мышцы при больших нагрузках, когда наряду с минимальными укорочениями мышца развивает максимальную силу.

Комплекс, включающий один мотонейрон и иннервируемые им мышечные волокна, называют **двигательной** или **нейромоторной** **единицей** (ДЕ или НМЕ).

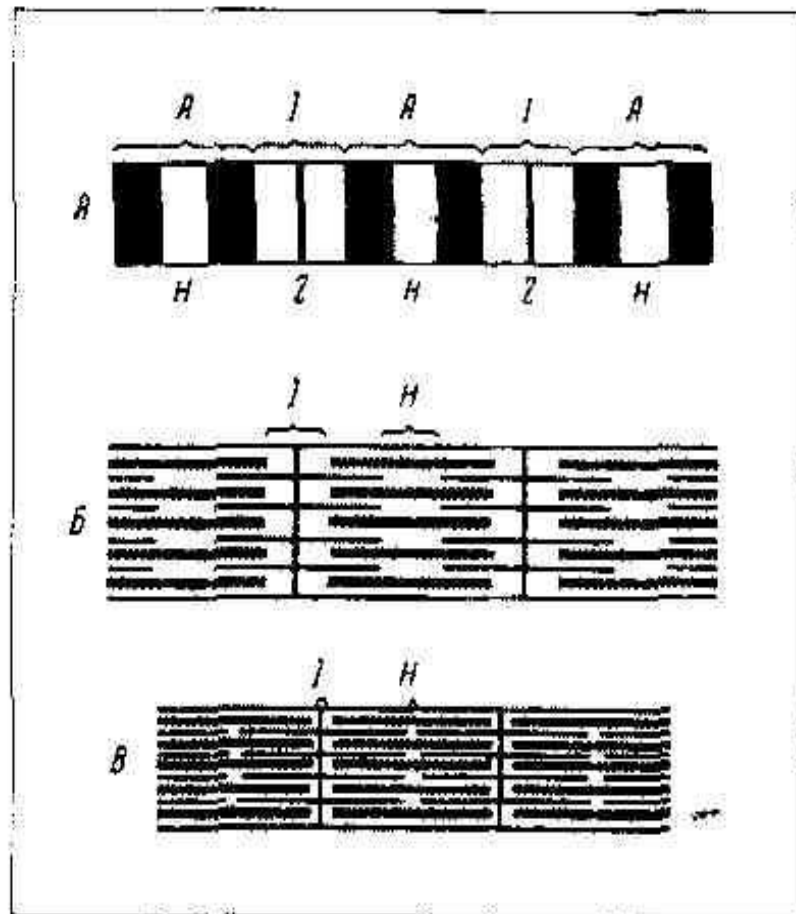


Строение МЫШЦ



СТРУКТУРА И ИННЕРВАЦИЯ ПОПЕРЕЧНО-ПОЛОСАТЫХ СКЕЛЕТНЫХ МЫШЦ

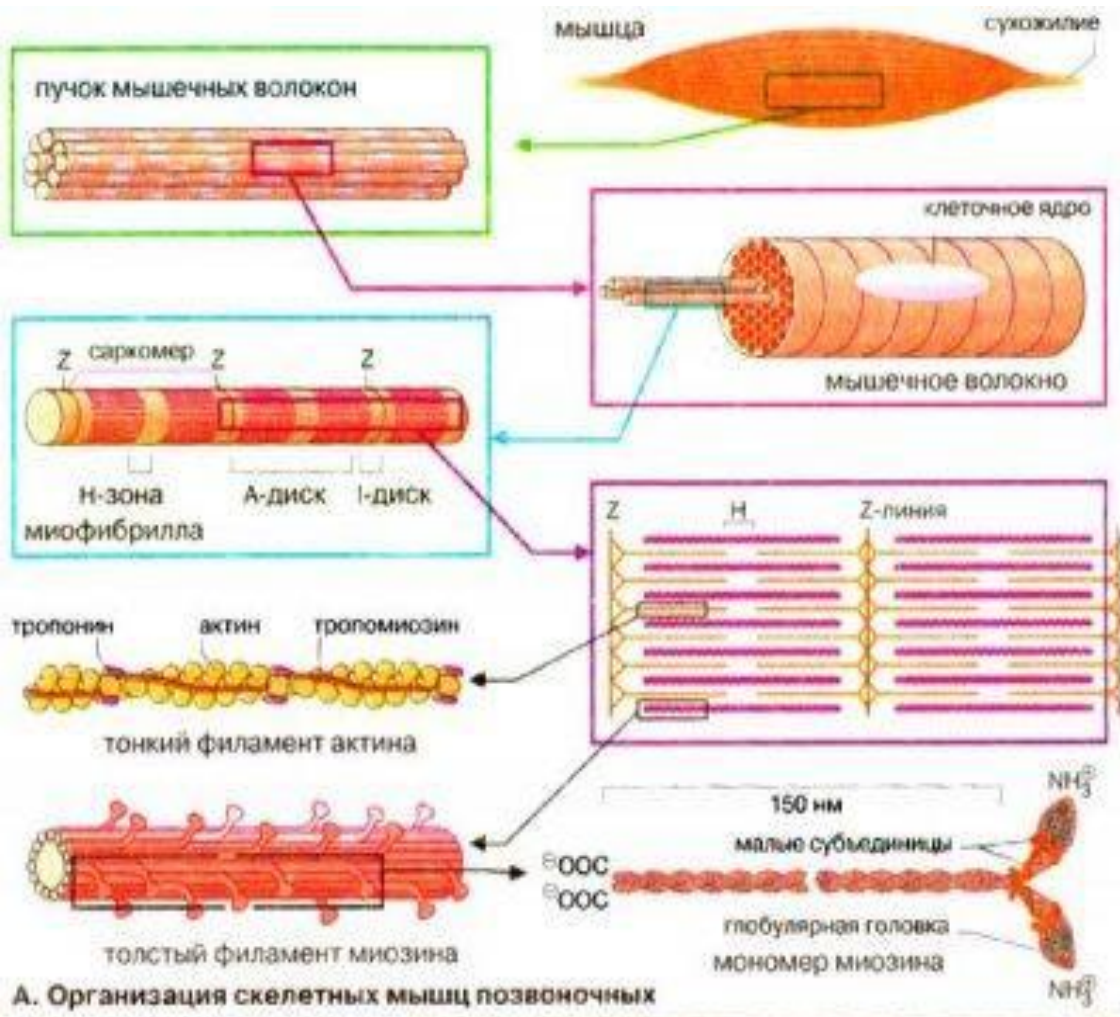
Основной особенностью поперечно-полосатого мышечного волокна является наличие в его саркоплазме массы тонких (диаметром 1 мкм) нитей – **миофибрилл**, расположенных вдоль длинной оси волокна. Миофибриллы состоят из чередующихся светлых (*изотропных* – I-дисков) и темных (*анизотропных* – А дисков) участков, причем в массе соседних миофибрилл у поперечно-полосатых волокон одноименные диски расположены на одном уровне (поперечном сечении). Последнее придает регулярную поперечную исчерченность (полосатость) всему мышечному волокну. Комплекс из одного темного (А) и двух прилежащих светлых (I) дисков, ограниченный тонкими Z-линиями, называется **саркомером**.



Миофибриллы, точнее – их саркомеры – являются **сократительным аппаратом** мышцы.

Структура миофибрилл и её изменения при сокращении.

Современные представления о структуре миофибриллярного (сократительного) аппарата основываются на исследованиях структуры мышечного волокна при помощи электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа в сочетании с гистохимическими методами.



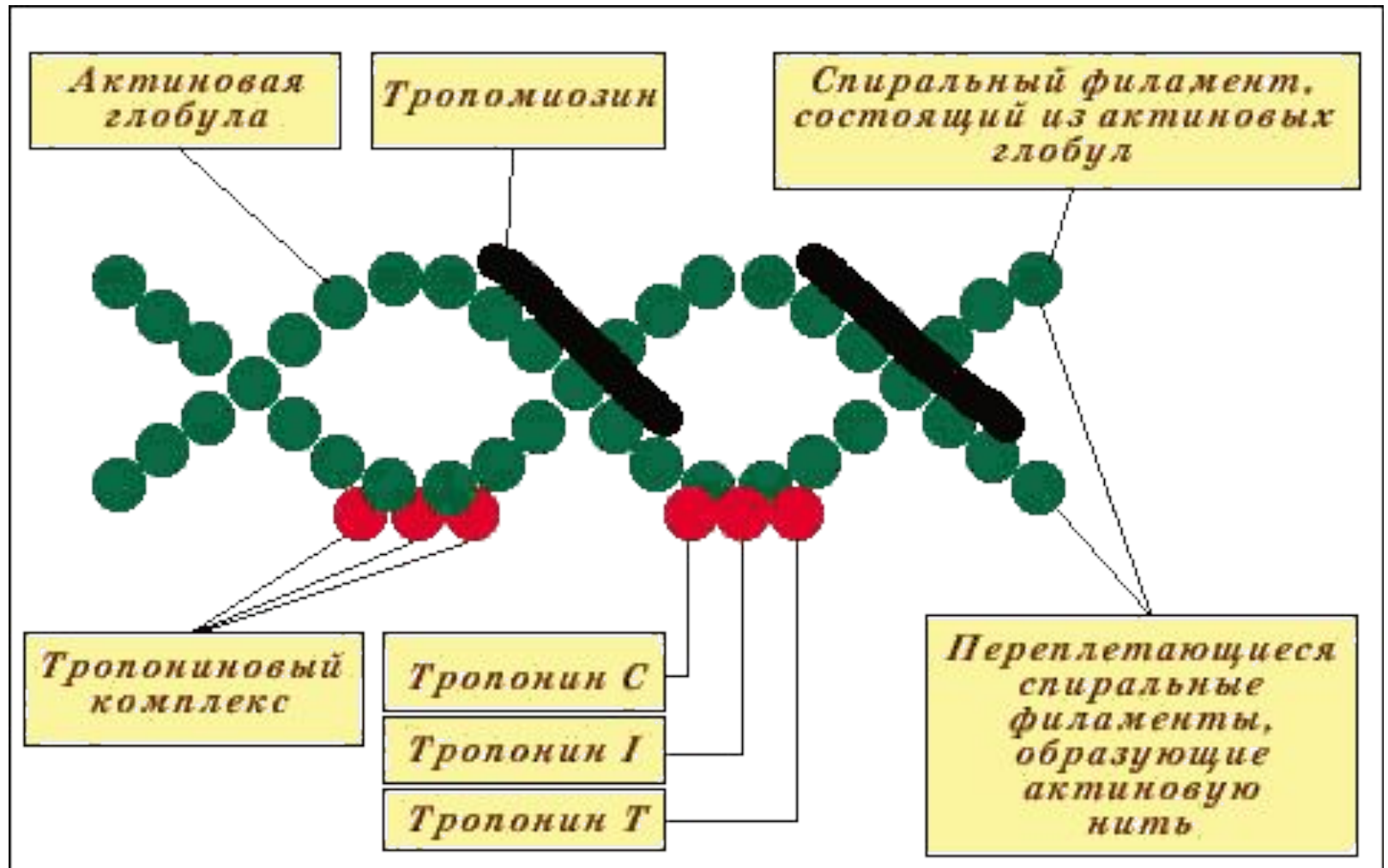
Каждая миофибрилла мышечного волокна диаметром 1 мкм состоит в среднем из 2500 протофибрилл, представляющих собой удлинённые полимеризованные молекулы сократительных белков – **миозина** и **актина**, которые называются протофибриллами. Миозиновые протофибриллы, или как их ещё называют, нити, вдвое толще актиновых (их диаметр около 10 нм).



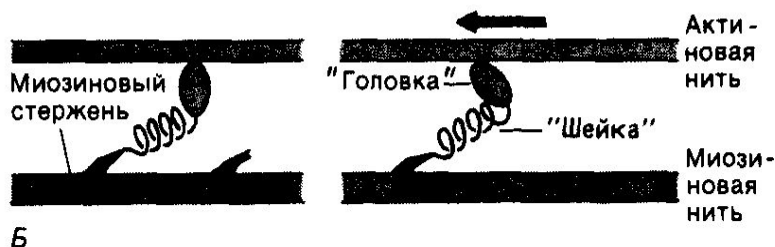
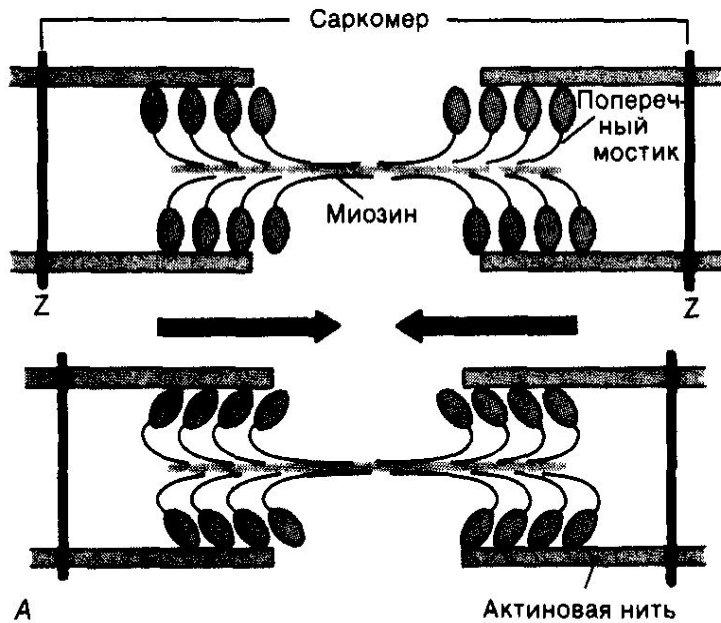
Сократительное мышечное волокно (миом) включает следующие компоненты:

- ▣ *сократительный аппарат* – система миофибрилл;
- ▣ *трофический аппарат* с типичными для мышечного волокна органеллами – митохондриями (или саркосомами), пластинчатым комплексом Гольджи и слабо развитой эндоплазматической сетью;
- ▣ *специфический мембранный аппарат* – соединительнотканная сумка – саркоплазматическая сеть и трубчатый элемент, составляющий Т-систему;
- ▣ *опорный аппарат* – соединительнотканная сумка волокна и поперечные перегородки – Z-линии и H-полоски;
- ▣ *нервный аппарат* – мионевральные синапсы и чувствительные (рецепторные) элементы мышцы – тельца Гольджи, мышечные веретена, тела Паччини.

Строение актиновой нити



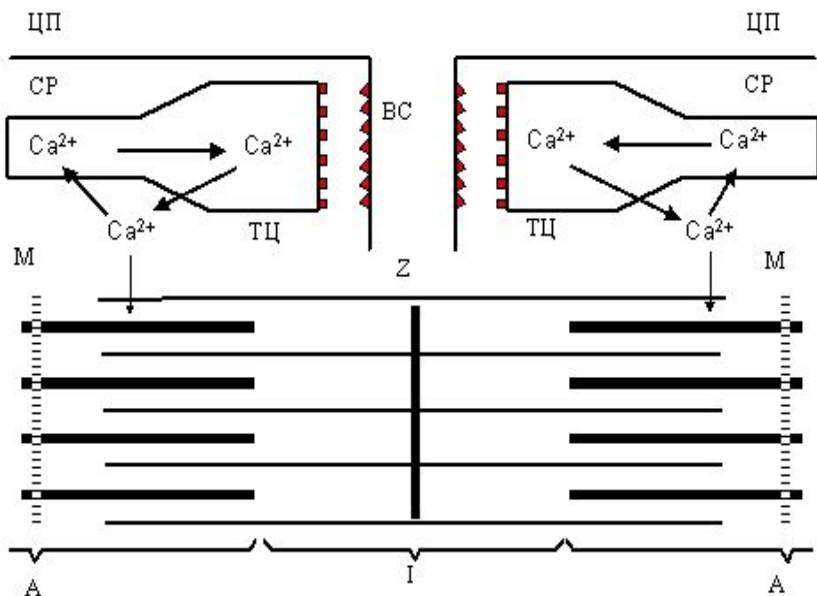
● ● ●
Феномен укорочения общей длины мышечного волокна в процессе сокращения объясняет **теория скользящих нитей** (теория «зубчатого колеса»), разработанная **Хаксли и Хансон** (1954 г.), и дополненная этими же авторами в 1981 г.



Миозиновые нити имеют поперечные выступы длиной около 20 нм, с головками примерно 150 молекул миозина. Они отходят от нити биполярно, во время сокращения каждая головка миозина может связывать миозиновую нить с актиновой. Наклоны этих актиновых центров на миозиновых нитях создают объединенное усилие, происходит «гребок», продвигающий актиновую нить к середине саркомера.

В конечной фазе сокращения миозиновые нити достигают линии Z, занимая весь саркомер, а актиновые нити располагаются между ними. При этом наблюдается уменьшение длины диска I, а к концу сокращения – исчезновение дисков I и утолщение линии Z.

ЭТАПЫ ГЕНЕРАЦИИ СОКРАЩЕНИЯ.



Возбуждение по системе Т-трубочек быстро проникает во внутрь волокна, переходит к продольной системе и вызывает высвобождение ионов Ca^{2+} , которые хранятся в терминальных цистернах, во внутриклеточную жидкость около миофибрилл, что ведет к сокращению

1. Стимуляция мышечного волокна: возбуждение мышц обычно происходит при поступлении ПД от иннервирующих мотонейронов через посредство нервно-мышечных синапсов.
2. В результате на мембране мышечного волокна формируется ПД, который распространяется вглубь мышечного волокна к миофибриллам.
3. Происходит процесс **электромеханического сопряжения** - преобразование электрического потенциала действия в механическое «скольжение» протофибрилл по отношению друг к другу. Этот процесс происходит в несколько этапов с обязательным посредством ионов **кальция!**



РОЛЬ ЭНЕРГИИ АТФ В МЕХАНИЗМЕ МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ:

1. работа натрий-калиевого насоса, обеспечивающего поддержание постоянства градиента концентрации ионов натрия и калия по обе стороны мембраны;
2. процесс скольжения актиновых и миозиновых нитей, ведущего к укорочению миофибрилл;
3. работа кальциевого насоса, необходимого для расслабления волокна.

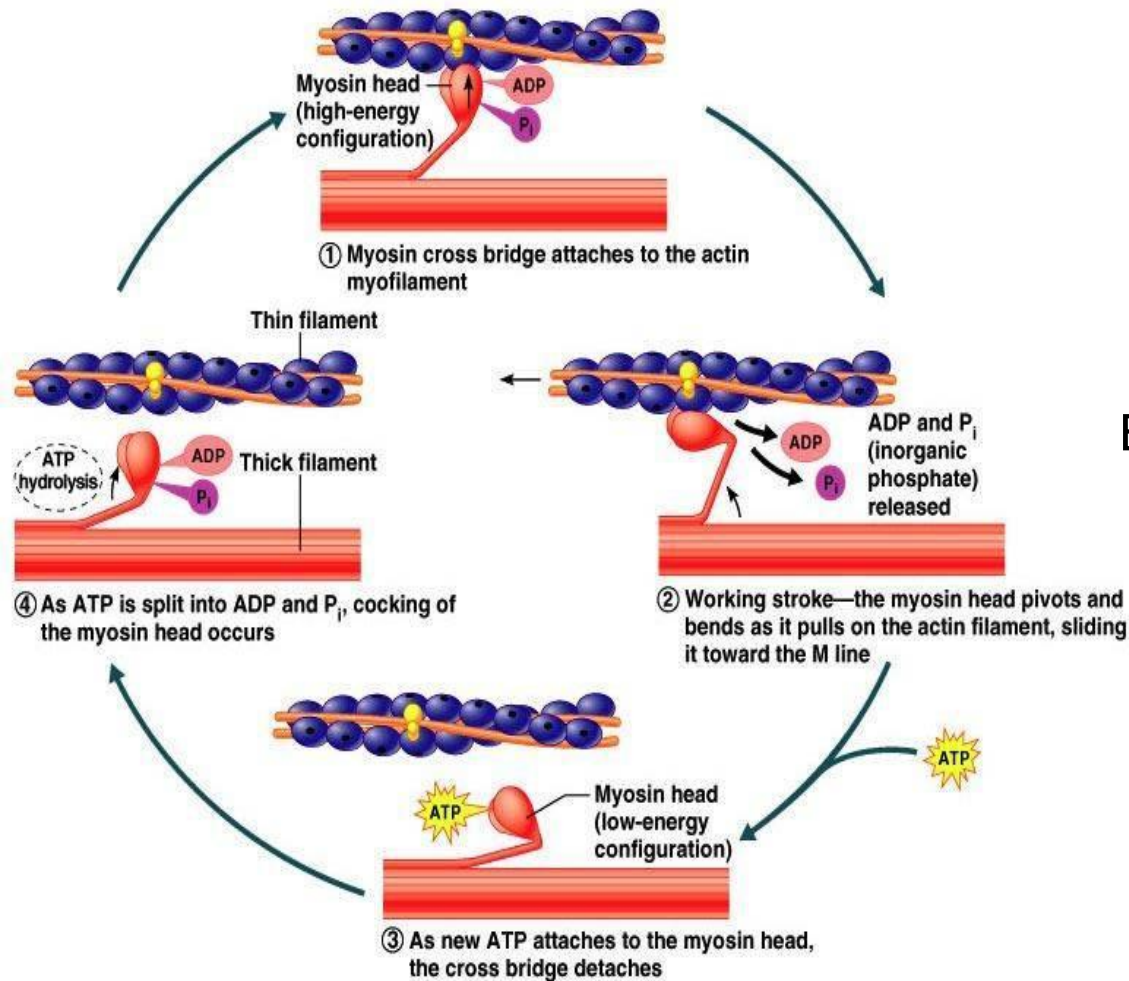
В соответствии с этим фермент АТФаза локализован в трех различных структурах мышечного волокна:

- *клеточной мембране,*
- *миозиновых нитях,*
- *мембранах саркоплазматического ретикулума.*

Потребление АТФ при сокращении

При физиологическом ионном составе среды (в присутствии ионов Mg^{2+}) АТФ расщепляется с освобождением АДФ и фосфата только в случае прикрепления головки миозина к активирующему белку – актину.

В каждом цикле прикрепления-отсоединения поперечного мостика АТФ расщепляется только один раз (1 молекула АТФ на 1 поперечный мостик). Это означает, что чем больше поперечных мостиков находится в активном состоянии, тем выше скорость расщепления АТФ и сила, развиваемая мышцей!

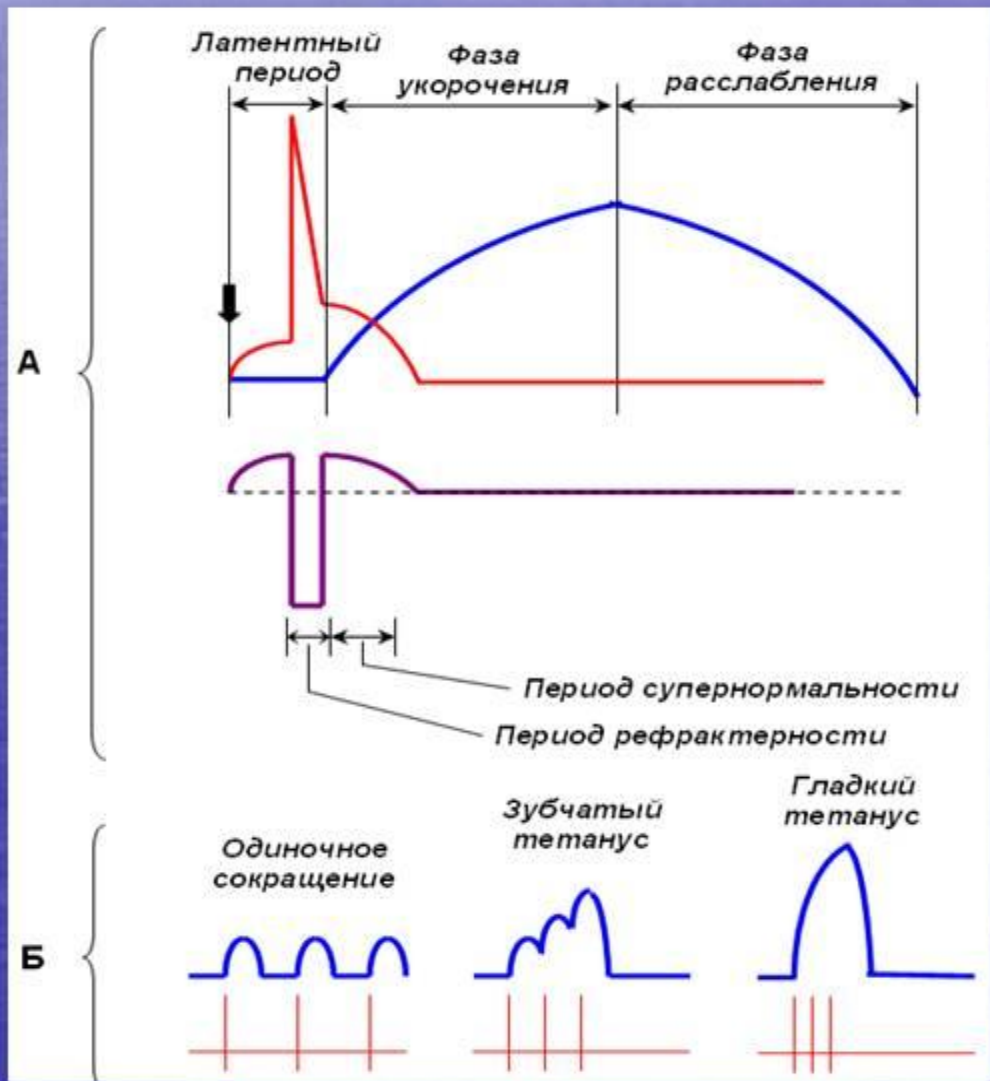


Ресинтез АТФ осуществляется двумя основными путями:

1. ферментативный перенос фосфатной группы от креатинфосфата на АДФ (в течение тысячных долей секунды, т.к. запасы КФ значительно больше в клетке, чем АТФ);
2. гликолитические и окислительные процессы в покое и активной мышце (медленный ресинтез АТФ через окисление молочной и пировиноградной кислот).

Нарушение ресинтеза АТФ ядами ведет к полному исчезновению АТФ и креатинфосфата, вследствие чего кальциевый насос перестает работать. Концентрация Ca^{2+} в области миофибрилл значительно возрастает и мышца приходит в состояние длительного необратимого укорочения. Это состояние называется **контрактурой!**

А – фазы и периоды мышечного сокращения, Б – режимы мышечного сокращения, возникающие при разной частоте стимуляции мышцы.
Изменение длины мышцы показано синим цветом, потенциал действия в мышце - красным,
возбудимость мышцы - фиолетовым.





Спасибо за внимание!