

Лекция № 3

# ФИЗИОЛОГ ИЯ МЫШЦ



# Активное движение

Одно из характерных свойств всех живых систем начиная от простейших и заканчивая самыми сложными организованными организмами



# Биологическое движение

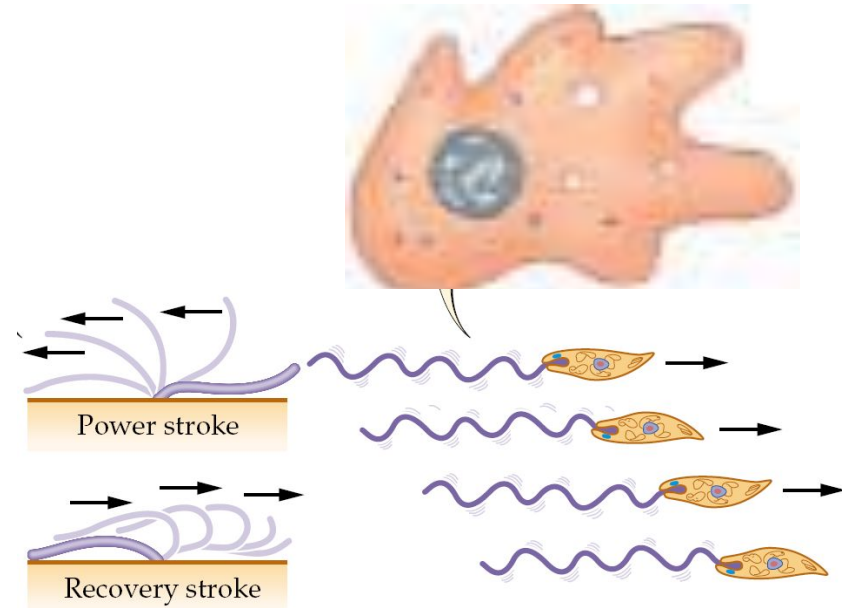
- Сокращение различных мышц
- Движение листьев
- Биение ресничек
- Движение жгутиков
- Деление клеток
- Движение протоплазмы

# Формы движения

- *Амебоидное*

- *Мерцательное*

- *Мышечное*  
(для тел большой  
массы)



Все разнообразные формы проявления двигательной активности имеют общую черту – превращение химической энергии в механическую.

# Мышечное движение наиболее эффективный способ перемещения



• **10,2 метра в секунду**

• **километры**

• **0,2 миллиметра в секунду**

• **сантиметры**



- Мышечными называют все типы клеток, функция которых состоит в сокращении.

У млекопитающих имеются три главных типа клеток, специально приспособленных для сокращения:

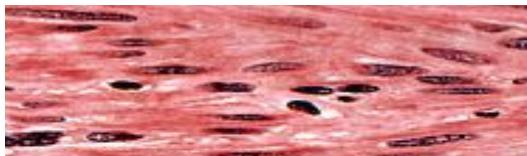
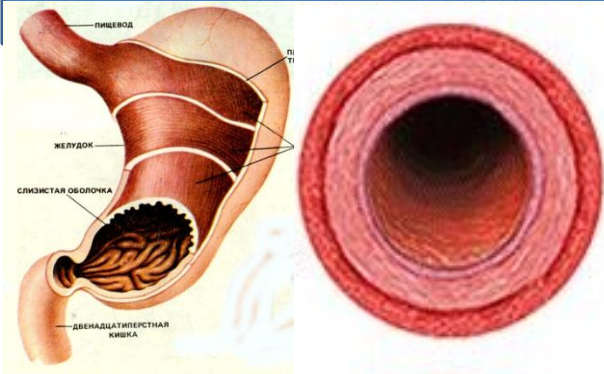
- волокна скелетных мышц
- клетки сердечной мышцы
- гладкомышечные клетки.



# Мышечная ткань

гладкая

ВХОДЯТ В СОСТАВ СТенок  
КИШЕЧНИКА, КРовеносных  
СОСУДОВ, Дыхательных ПУтей,  
Выделительных и Половых  
Органов.



Одноядерные  
веретенообразные клетки

поперечно-полосатая

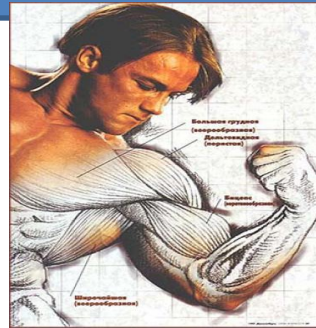
сердечная

я

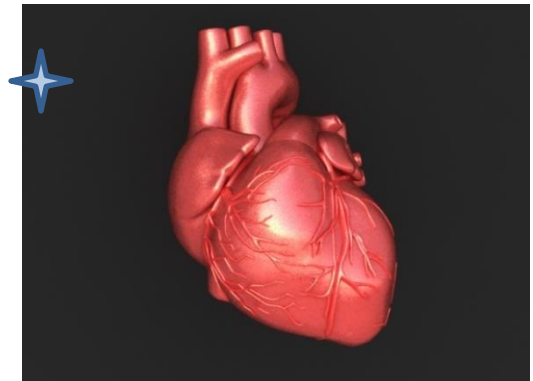
МИОКАРД СЕРДЦА

скелетная

скелетная мускулатура,  
язык, мышцы глотки,  
гортани, пищевода,  
диафрагмы.



Многоядерные мышечные  
волокна и имеют поперечную  
исчерченность



Волокна  
соединяются  
друг с другом

# Отличительные особенности МЫШЦ

## СКЕЛЕТНАЯ

## ГЛАДКАЯ

## СЕРДЕЧНАЯ

СТРУКТУРНАЯ ЕДИНИЦА

ЛОКАЛИЗАЦИЯ

РЕГУЛЯЦИЯ

ПРОИСХОЖДЕНИЕ

Из миотомов

*Мезенхима* – м стенки  
внут органов, сосудов  
*Нейральное* -мышцы —  
радужки - суживающую и  
расширяющую зрачок  
эпидермального  
происхождения -  
миоэпителиальные  
клетки, имеющиеся в  
ряде желёз

Висцеральный листок  
спланхнотомов -  
миокардиальная пластинка

РЕГЕНЕРАЦИЯ

Физиологическая регенерация  
проявляется в форме гипертрофии  
мышечных волокон, что  
выражается в увеличении их  
толщины и даже длины  
увеличение числа ядер в  
мышечных волокнах в условиях  
гипертрофии достигается за счет  
деления клеток миосателлитов  
(под сарколеммой) и  
последующего вхождения в  
миосимпласт дочерних клеток

*Физиологическая*  
Гипертрофия  
клеток (матка при  
беременности),  
Трансформация  
клеток  
соединительной  
ткани в гладкие  
миоциты  
*Репаративная*  
регенерация:  
митоз

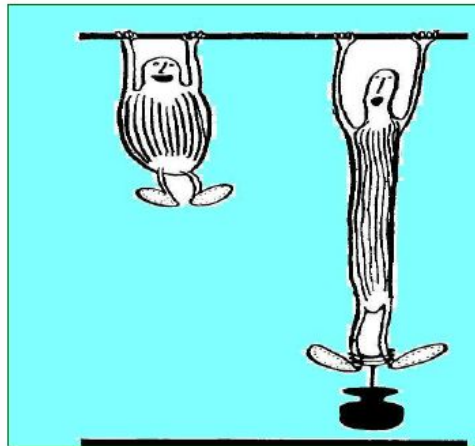
после экспериментального инфаркта  
миокарда левого желудочка сердца в  
клеточный цикл возвращается 60-70%  
предсердных кардиомиоцитов,  
возрастает число полиплоидных клеток,  
но это не компенсирует повреждение  
миокарда. но уровень пролиферации  
клеток соединительной ткани в области  
повреждения оказывается в 20-40 раз  
выше.

(рубец+гипертрофи  
я)

ФУНКЦИИ

# Характеристики ткани

- Происхождение – мезодерма
- Строение – в основном клетки, межклеточного вещества мало
- Функция – сокращение (укорачивание)



# Классификации мышц

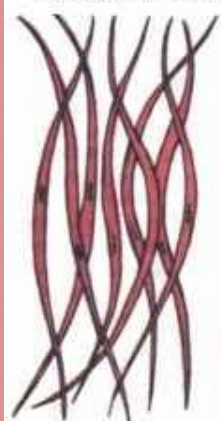
## Гистологическая



## Поперечнополосатые



## Гладкие

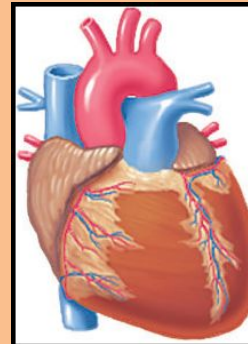


## АНАТОМИЧЕСКАЯ

### СКЕЛЕТНЫЕ



### СЕРДЕЧНАЯ



### ВИСЦЕРАЛЬНЫЕ



## Функциональная

### произвольные



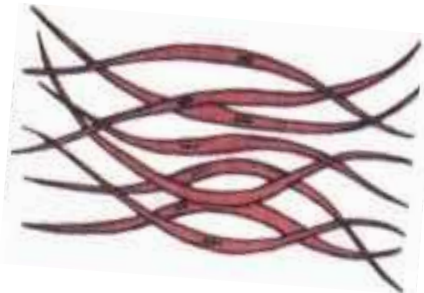
### непроизвольные



# ФУНКЦИИ МЫШЦ

## ГЛАДКИЕ

- Поддержание давления в полых органах
- Регуляция давления в кровеносных сосудах
- Опорожнение полых органов



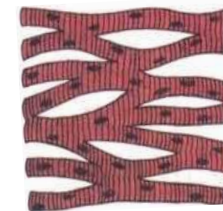
## ПОПЕРЕЧНО-ПОЛОСАТЫЕ

- Двигательная
- Обеспечение дыхания
- Мимическая
- Рецепторная
- терморегуляторная



## СЕРДЕЧНАЯ

- Насосная  
обеспечение крови по сосудам

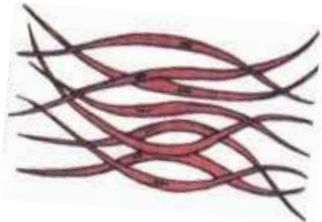


# Физиологические свойства

## МЫШЦ

### ГЛАДКИЕ

- Те же что и скелетные+
- Нестабильный МП, поддерживающий в состоянии постоянного тонуса
- Самопроизвольная автоматическая активность
- сокращение в ответ на растяжение
- Высокая чувствительность к хим веществам



### ПОПЕРЕЧНО-ПОЛОСАТЫЕ

- Возбудимость (ниже чем в нервном волокне)
- Низкая проводимость (10-13 м/с)
- Лабильность
- Сократимость: *изотоническое*-изменение длины, тонус не меняется

*Изометрическое*-изменяется тонус без изменения длины

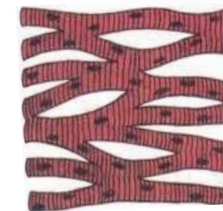
- Эластичность (способность развивать напряжение при растягивании)



### СЕРДЕЧНАЯ

- Автоматия

*Атипические* мышечные волокна в сердечной мышце



# Скелетная мышца

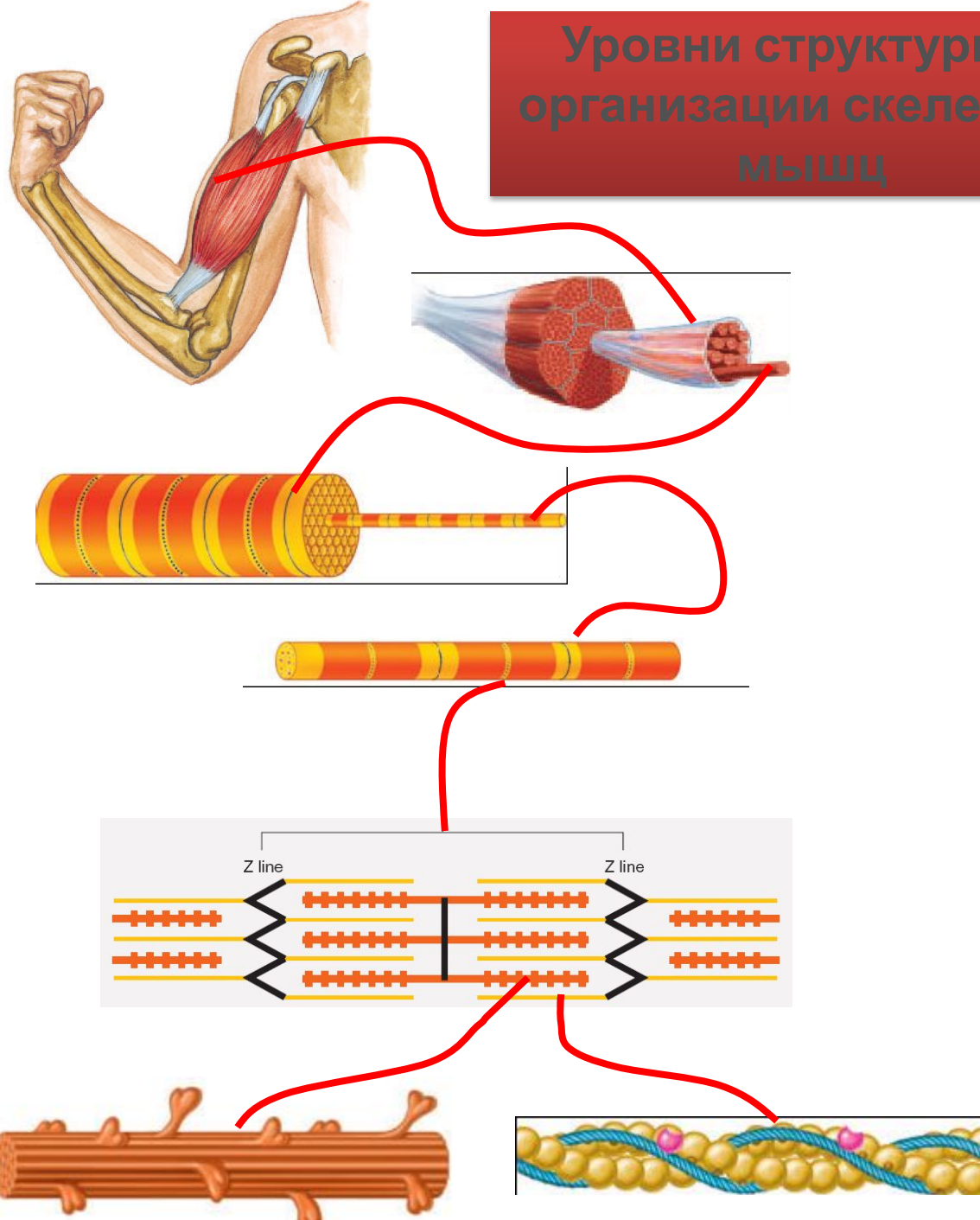


# Благодаря работе скелетных мышц происходит:

- Передвижение организма в пространстве (локомоция)
- Перемещение частей тела друг относительно друга
- Поддержание позы
- Выработка тепла, поддержание постоянной температуры тела



# Уровни структурной организации скелетных мышц



**Мышца**

x1

**Пучок мышечных волокон**

x5

**Мышечное волокно**

X 500

**Миофибрилла**

X 10000

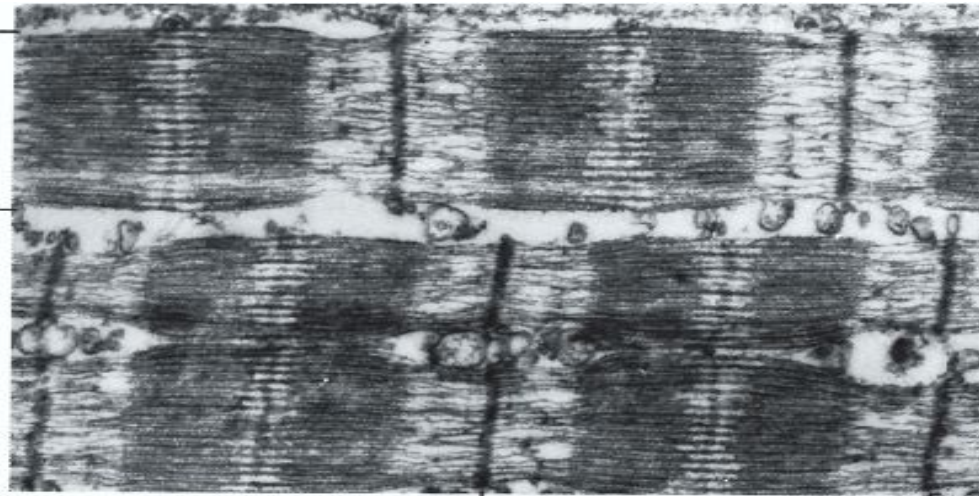
**Саркомер**

X 50000

**Миофиламенты**

X 1000000

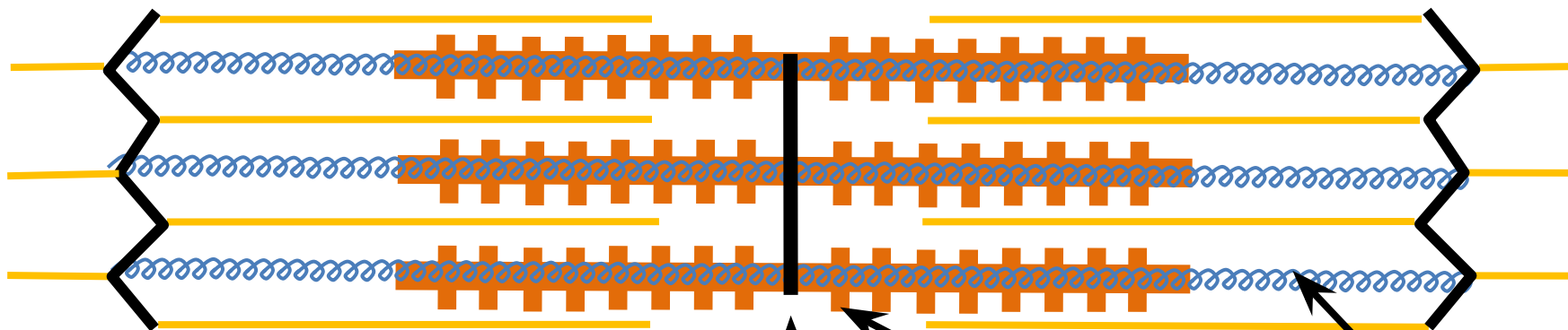
миофибрилла



саркомер

Z - линия

Z - линия



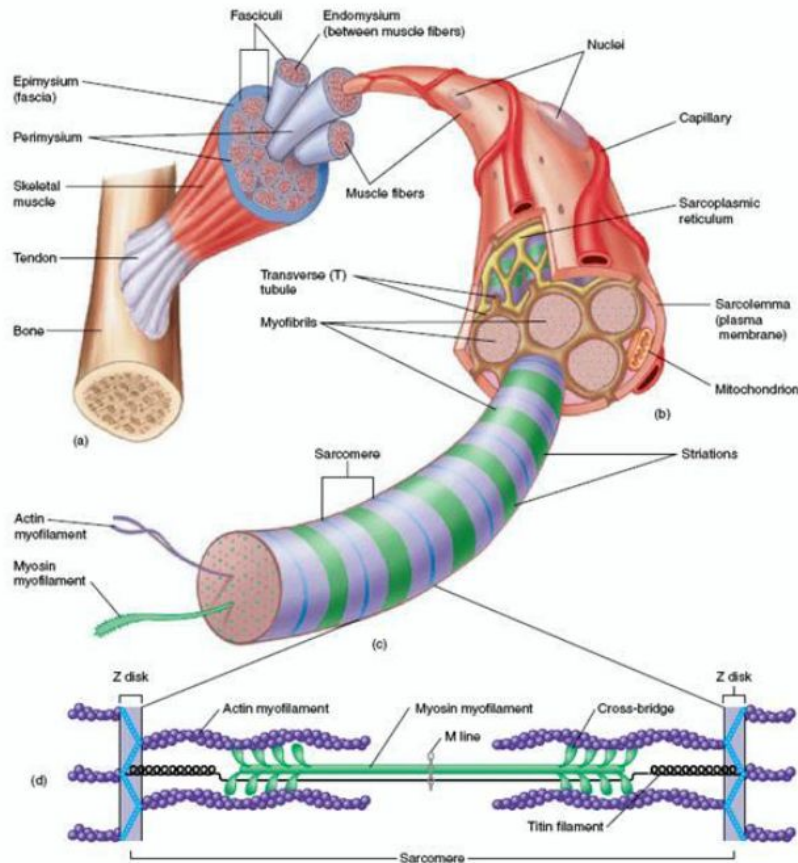
Тонкие  
нити

M - линия

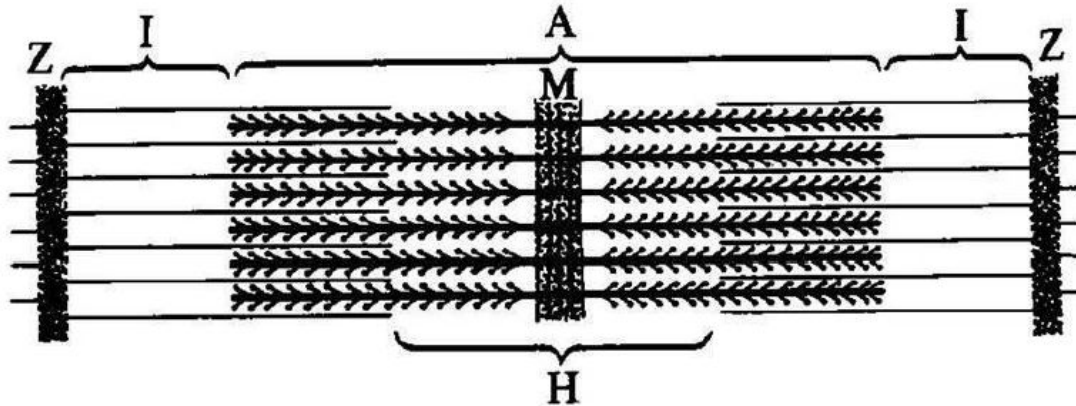
Толстые нити

Титиновые нити

# Миофибрилла состоит из

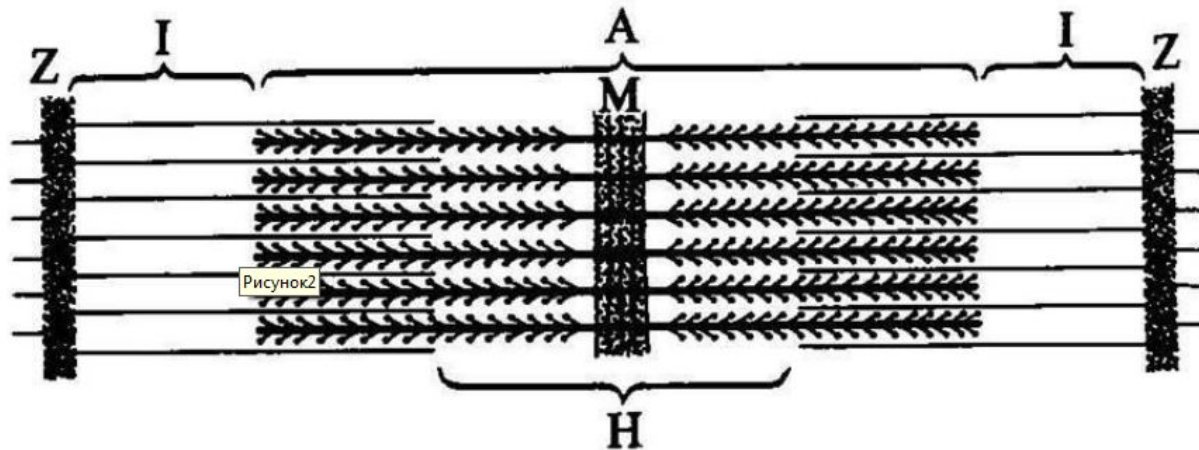


- **АКТИНОВЫХ** филаментов (**тонких**)
- **МИОЗИНОВЫХ** филаментов (**толстых**)
- Филаменты упакованы в саркомеры



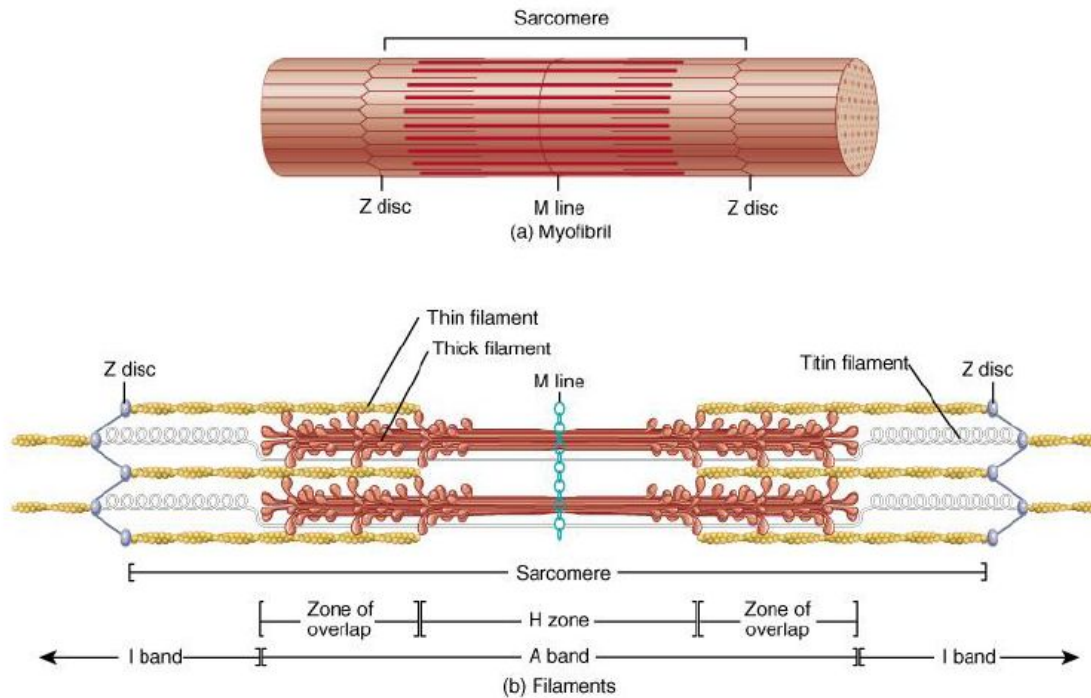
- **A-зона** (анизотропная, темная) содержит миозиновые и актиновые филаменты
- **H-зона** – посередине A-зоны (только миозиновые филаменты)
- **M-линия** – посередине A-зоны (сшивает миозиновые филаменты)

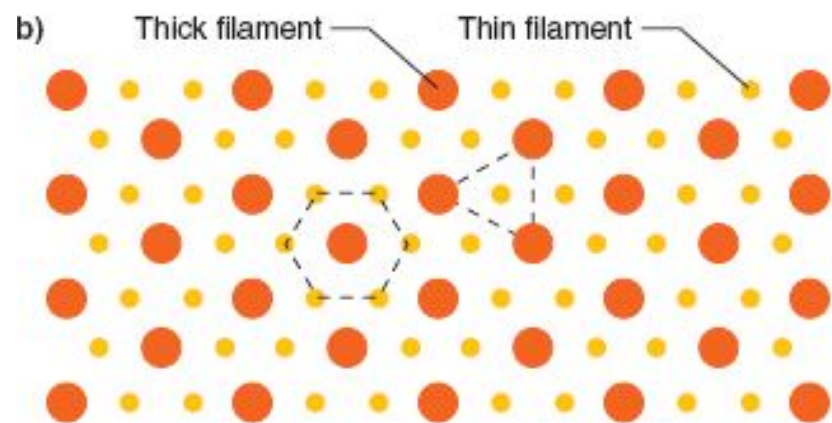
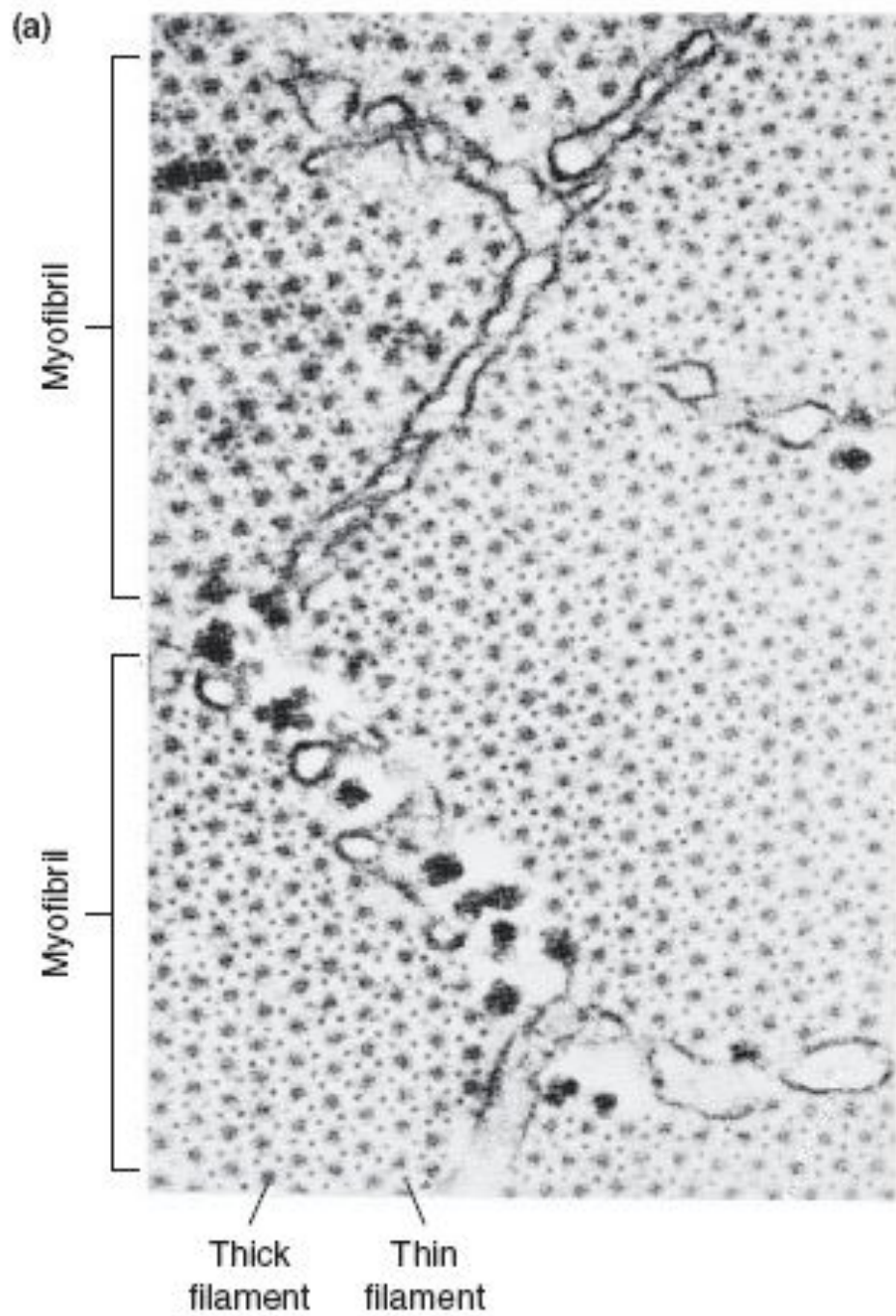
- **I–зона** (изотропная, светлая) содержит только актиновые филаменты
- **Z–линия** – посередине I-зоны (прикрепление актиновых филаментов)

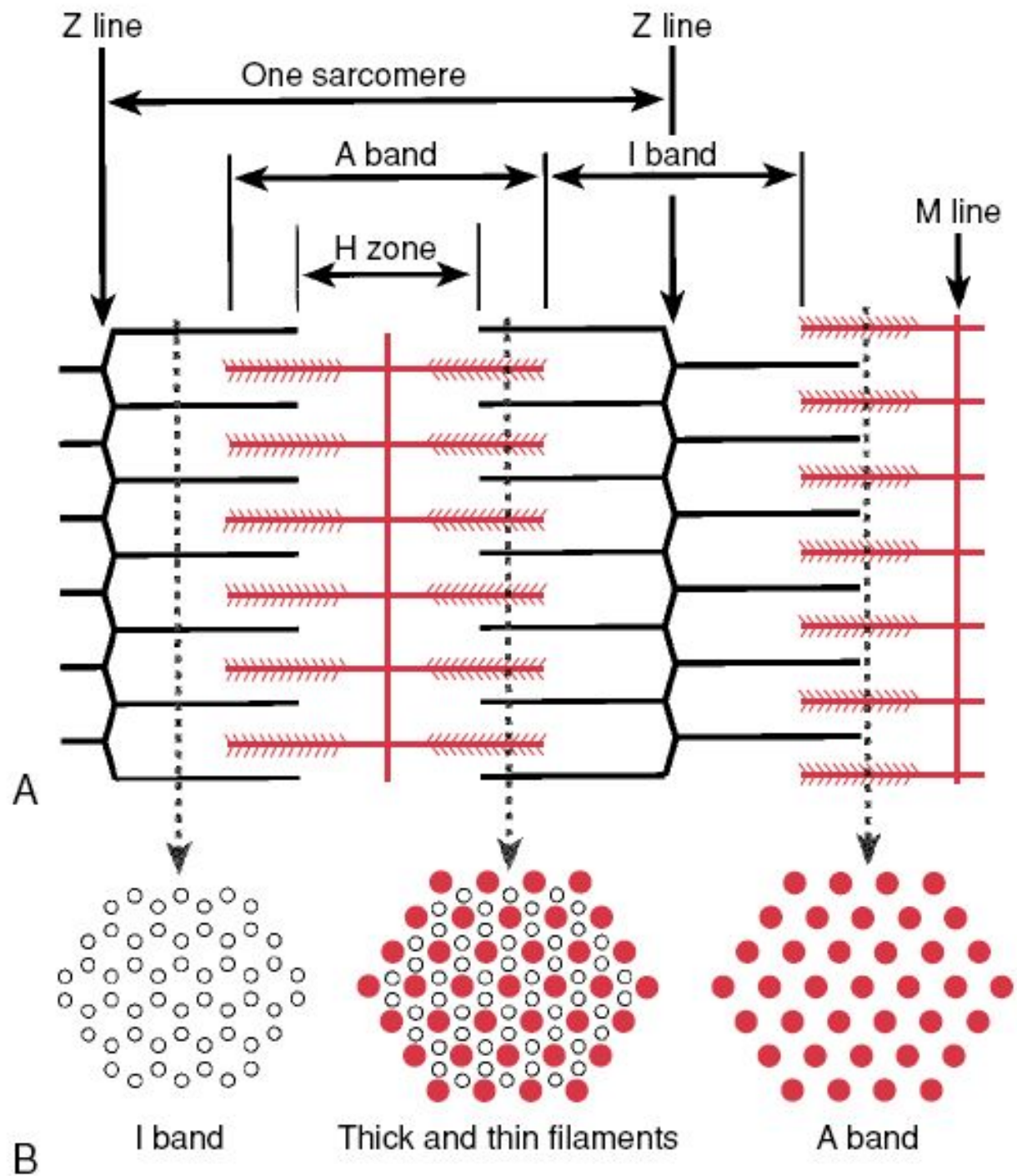


# Саркомер -

- Участок миофибриллы между двумя соседними Z-линиями

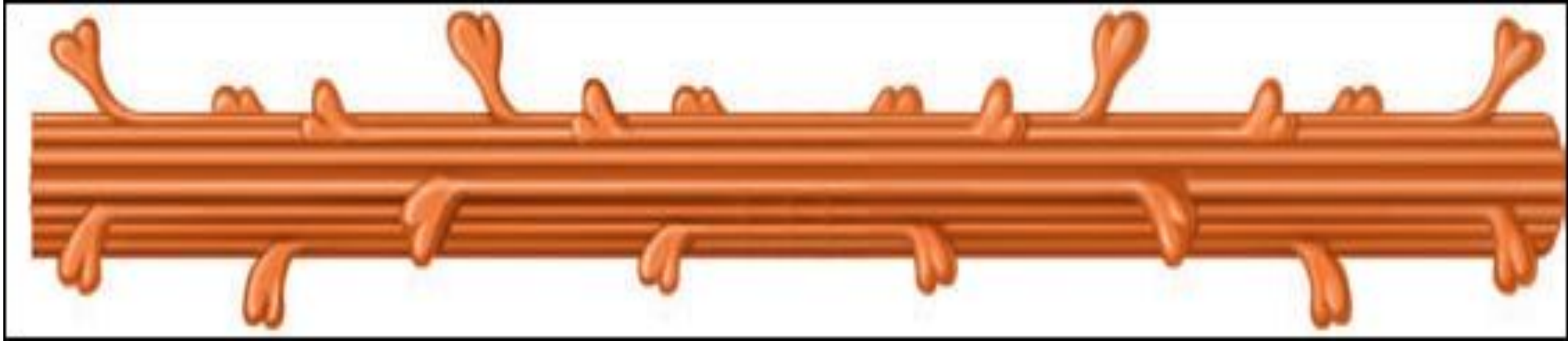




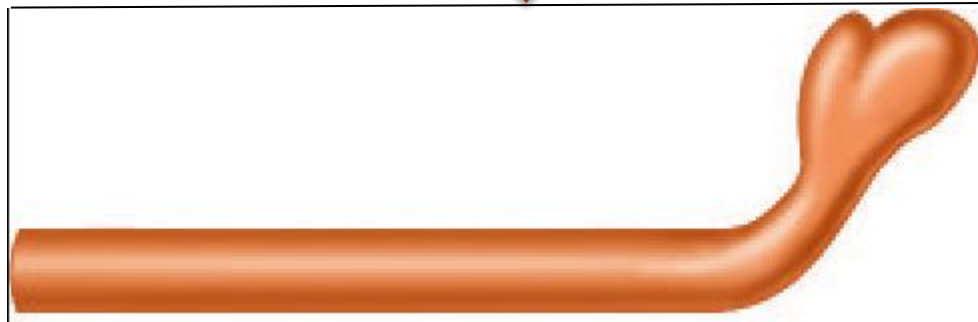




# Миозиновые нити (толстые нити)

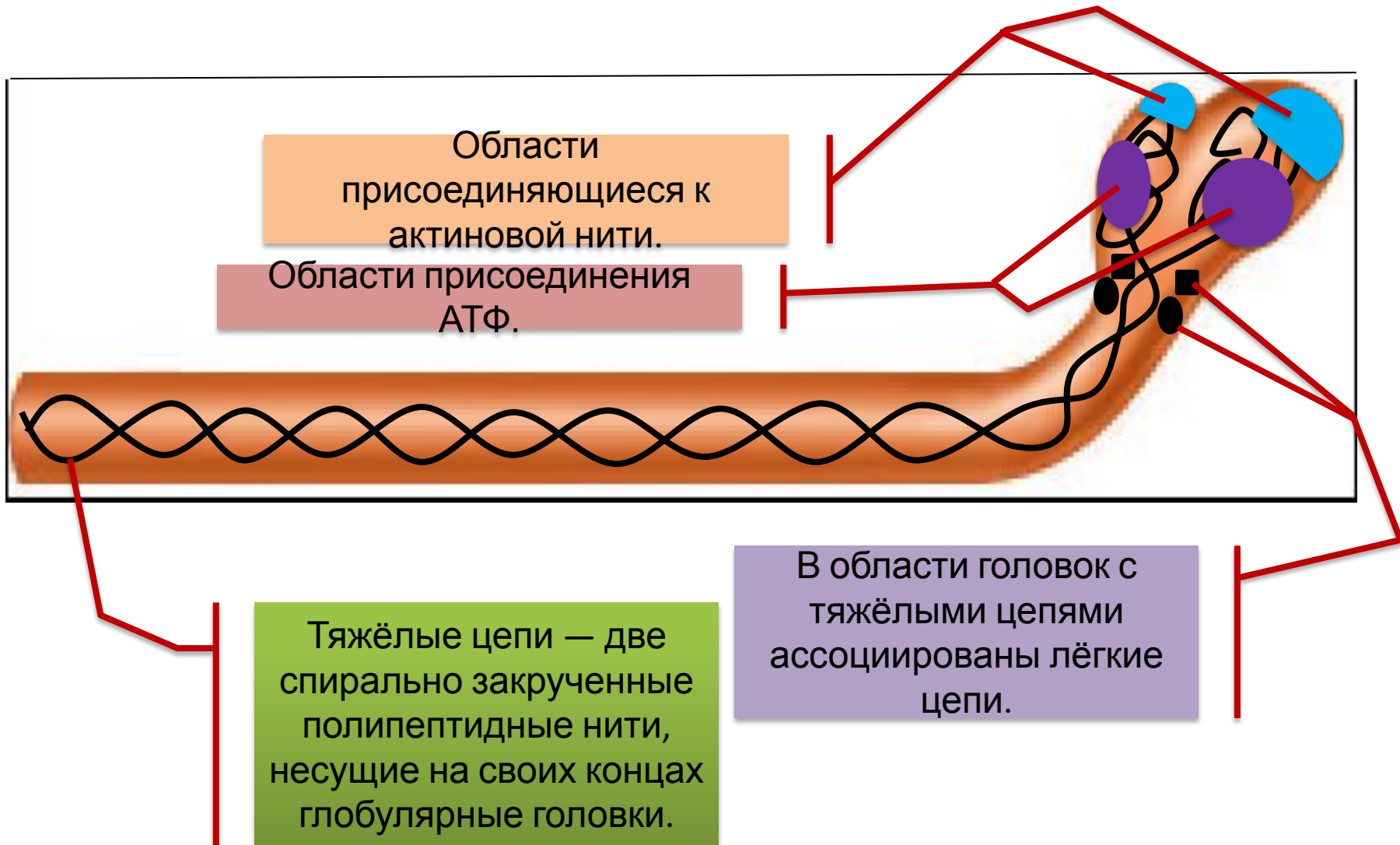


**Каждая миозиновая нить состоит из  
300–400 молекул миозина.**



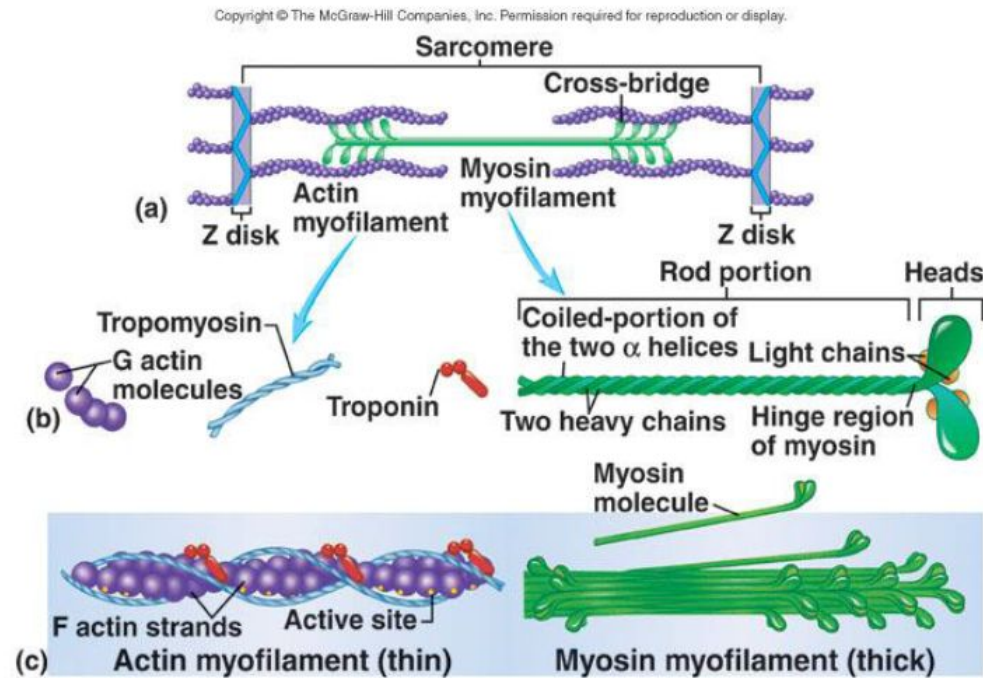
# Строение молекулы миозина

Миозин — гексамер (две тяжёлые и четыре лёгкие цепи).

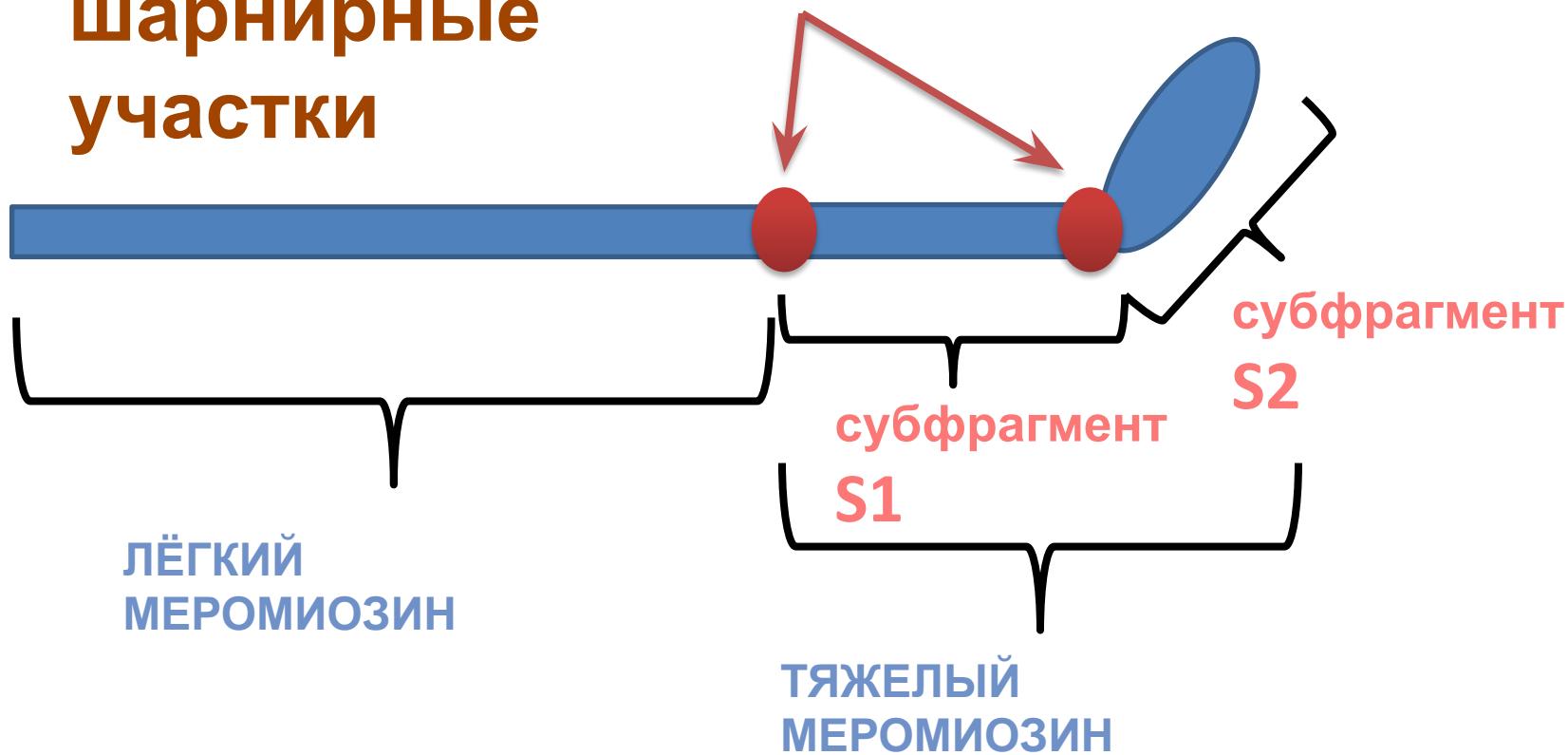


# Толстые филаменты

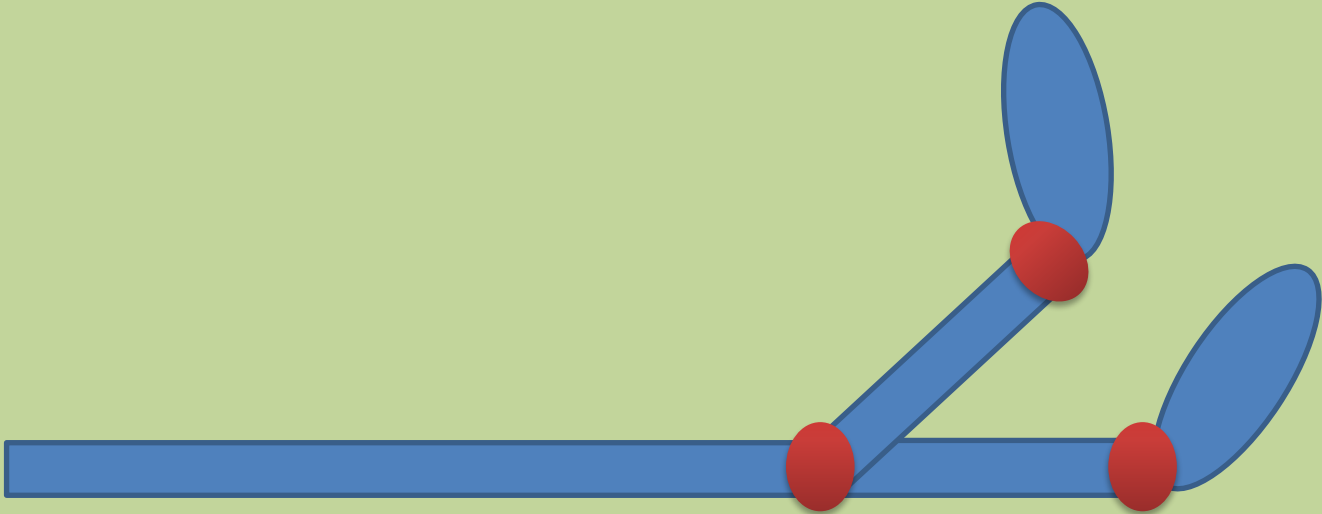
- Толстые филаменты состоят из белка миозина
- Молекула миозина напоминает клюшку для гольфа
- При сокращении с актином взаимодействует головка миозина

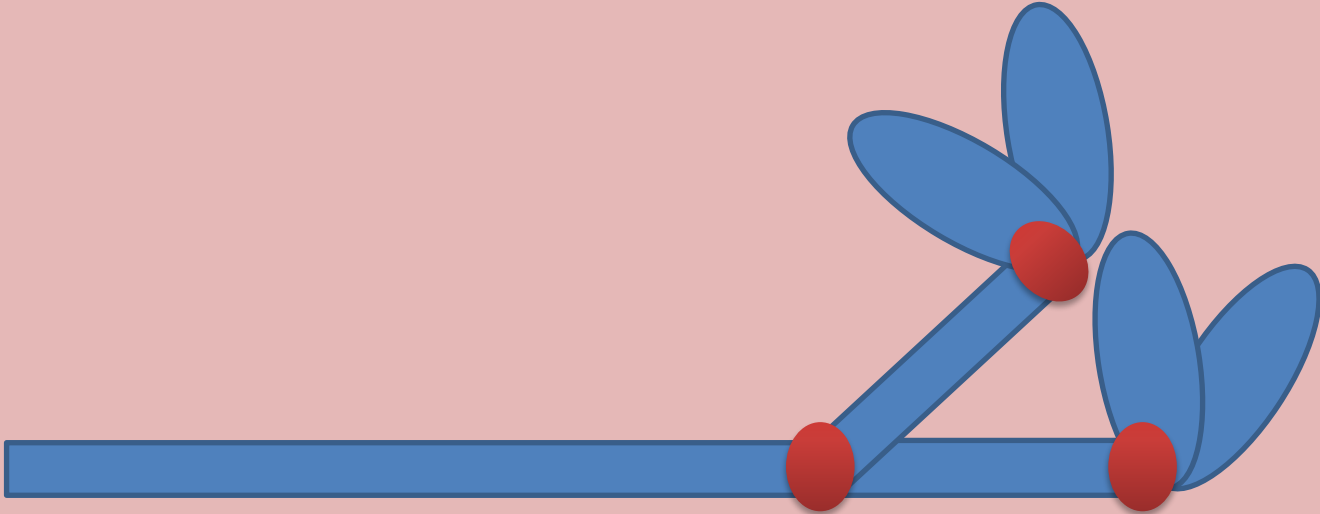


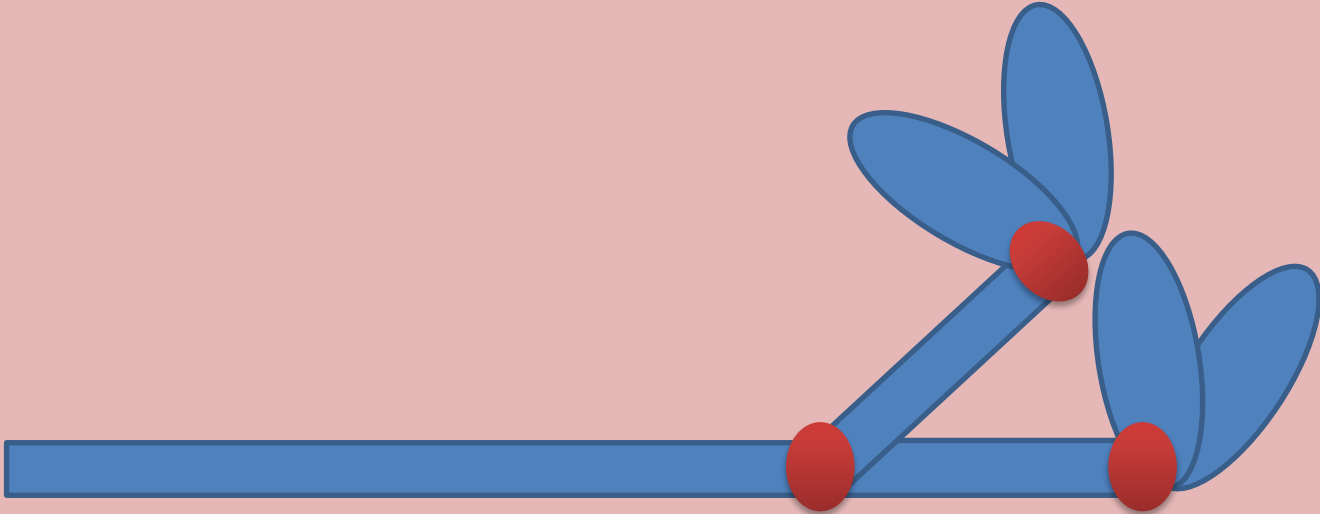
шарнирные  
участки



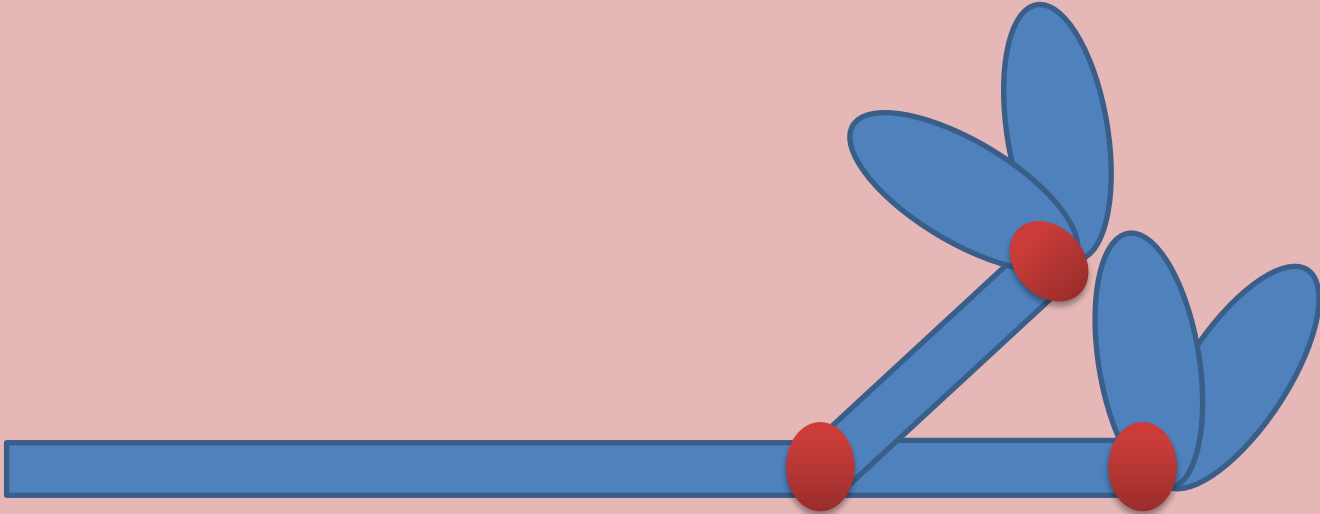


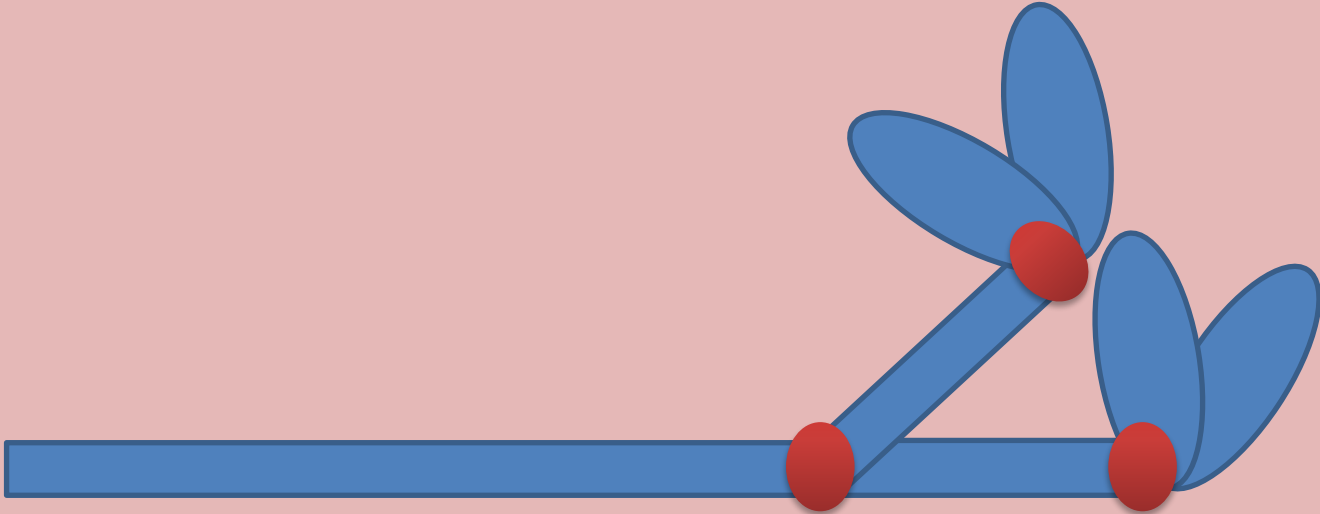




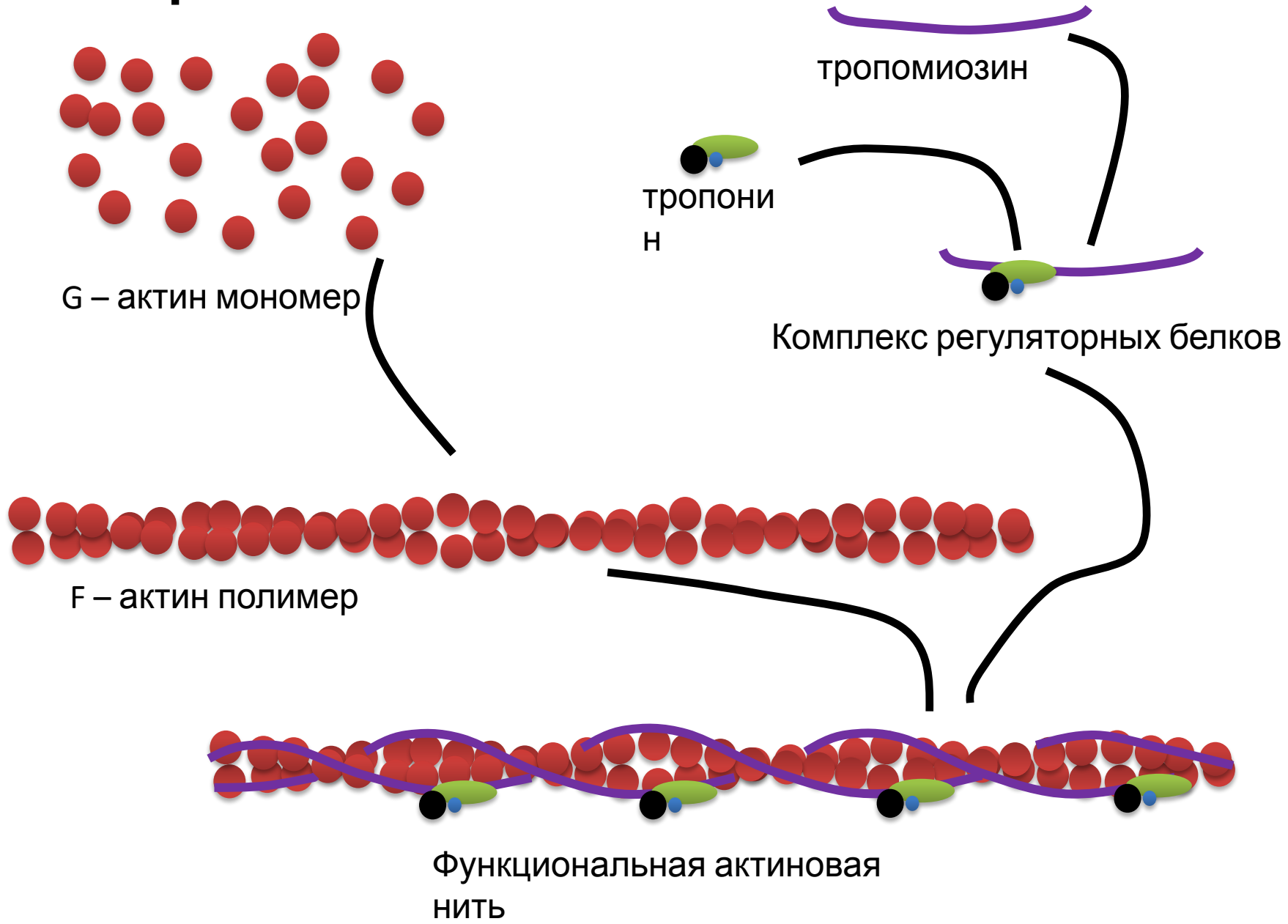


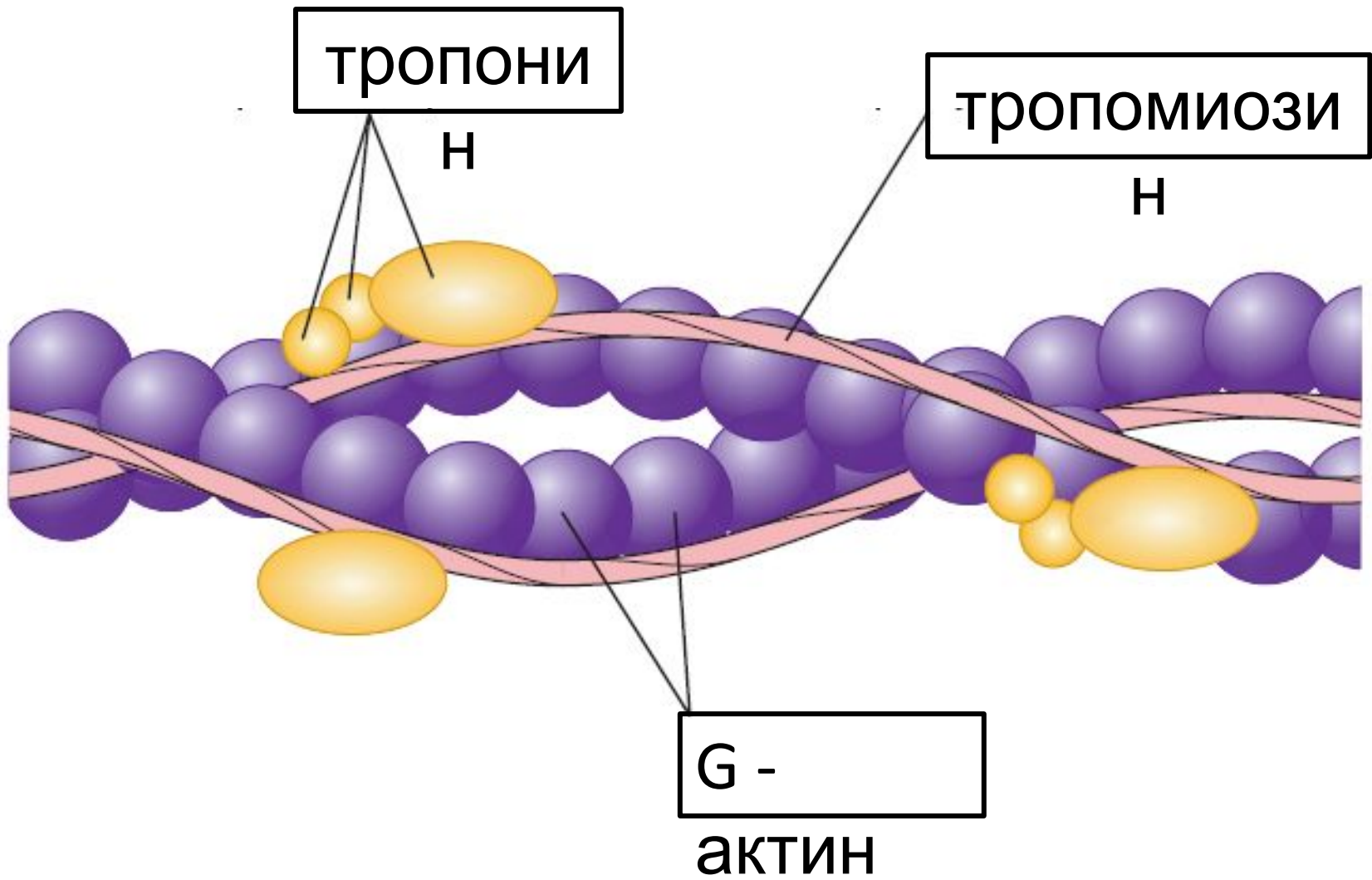






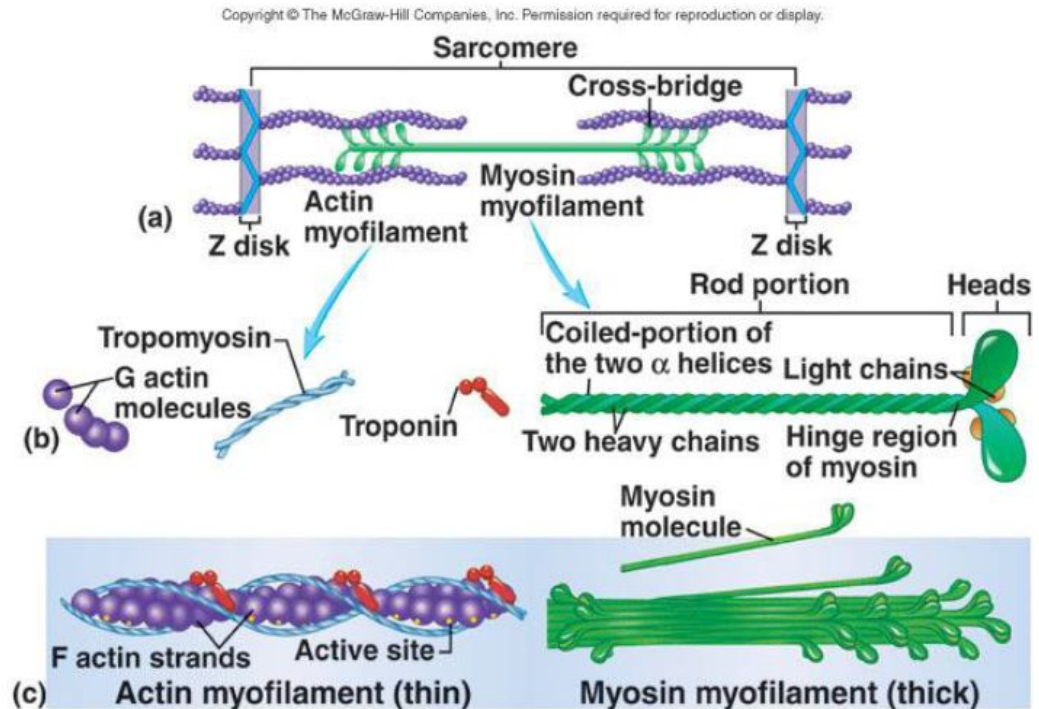
# Строение актиновых нитей

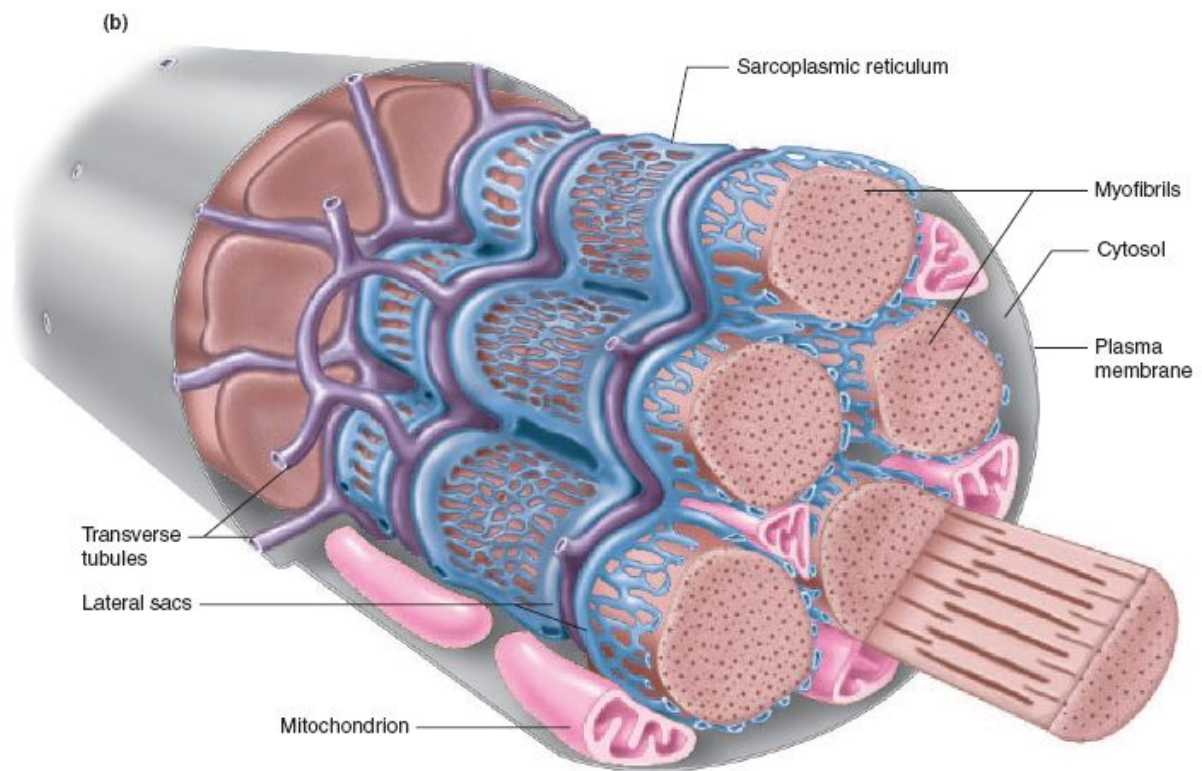
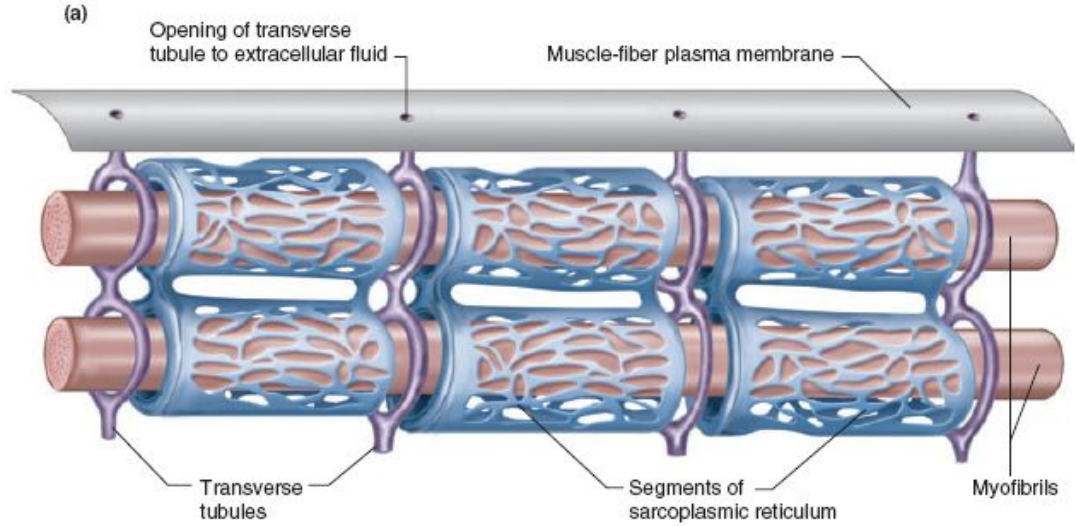




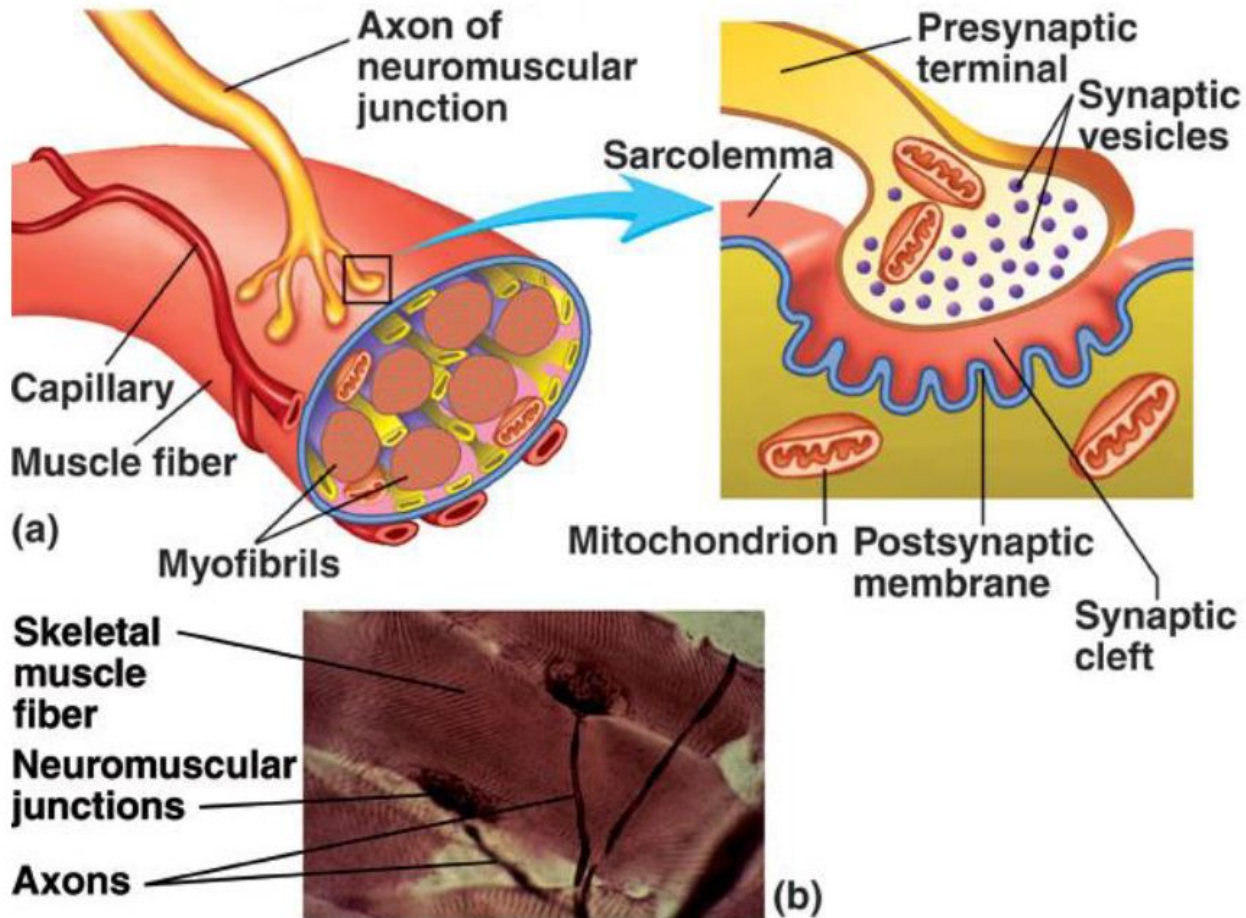
# Тонкие филаменты

- **F-актин** (фибрилярный), который состоит из **G-актина** (глобулярного)
- Две нити F-актина свернуты в спираль
- В желобке между нитями F-актина лежит длинная молекула **тропомиозина**, к которой прикрепляются молекулы белка **тропонина**

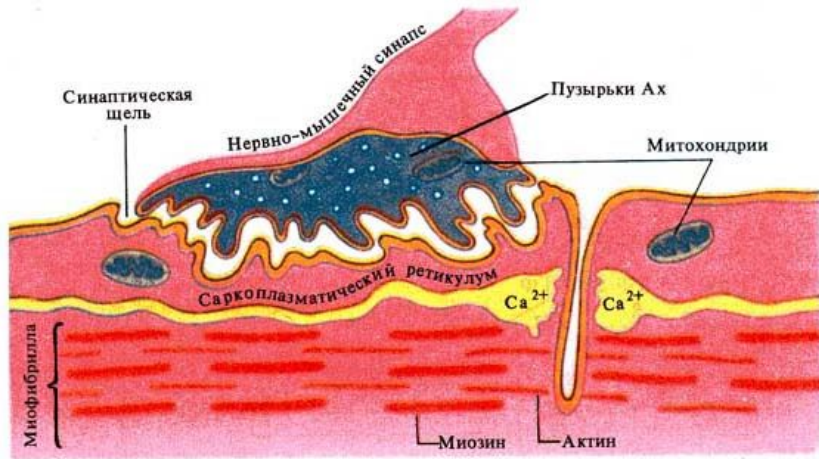




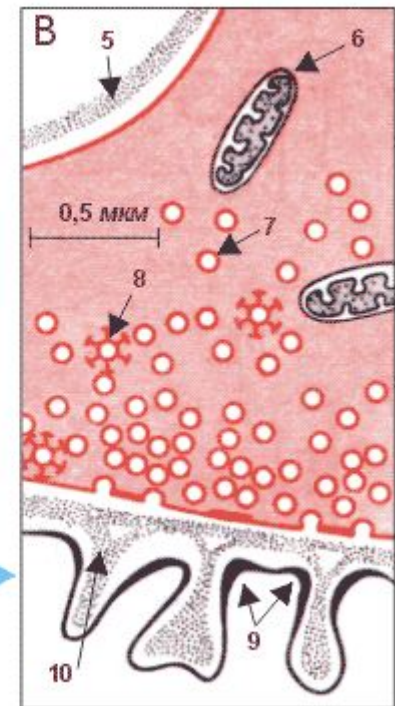
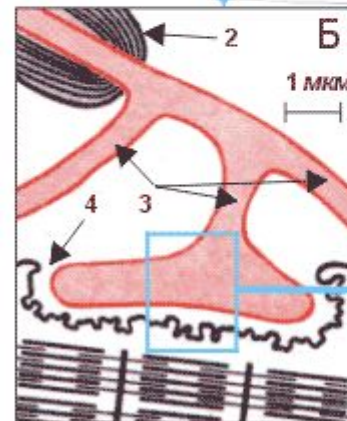
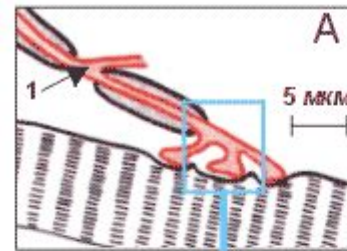
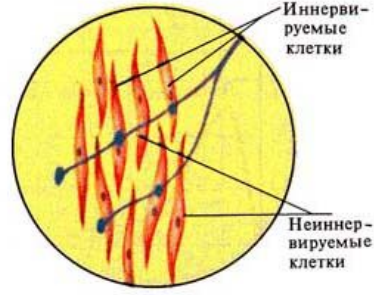
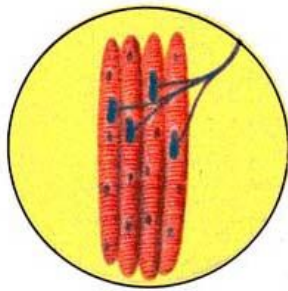
# Механизм сокращения



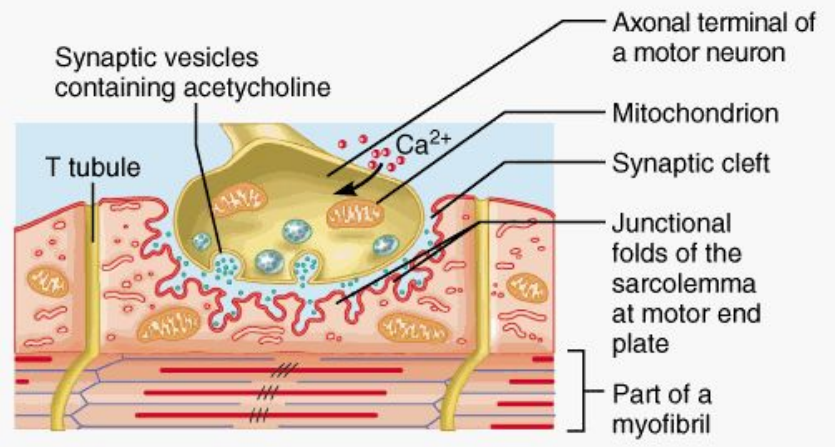
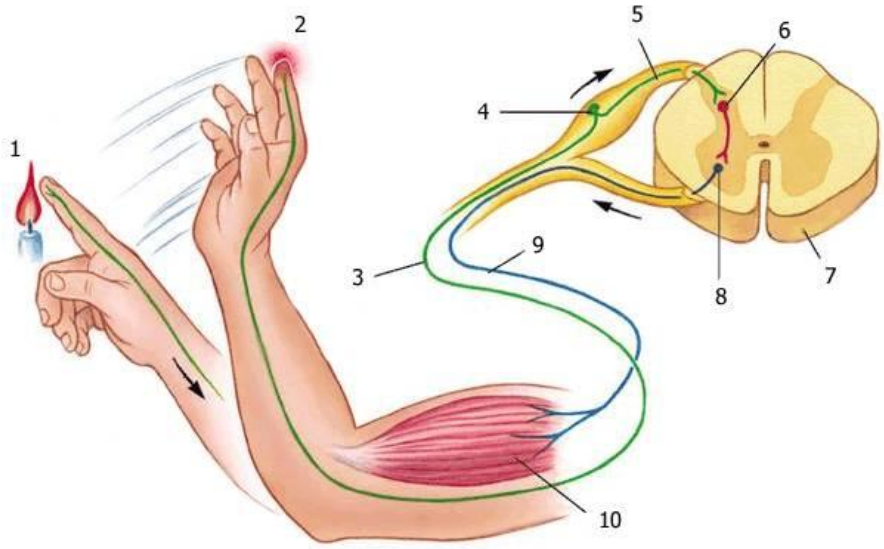
# НЕРВНО-МЫШЕЧНЫЙ СИНАПС



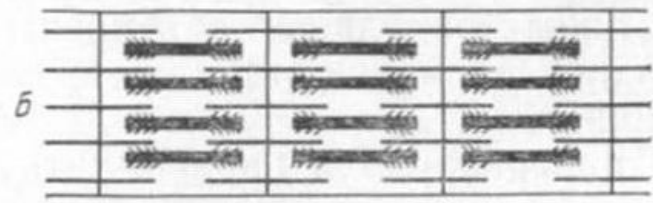
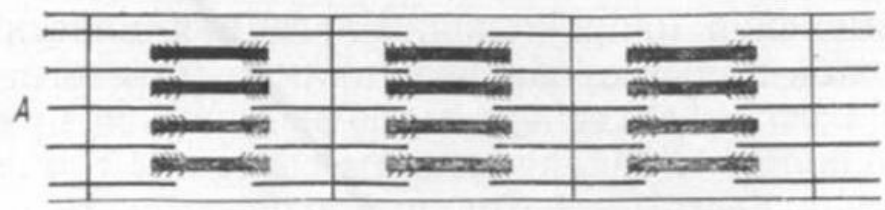
А







(b)  
 Copyright © 2001 Benjamin Cummings, an imprint of Addison Wesley Longman, Inc.



# Последовательность процессов при мышечном сокращении

Деполаризация постсинаптической мембраны и генерация ПД.

Распространение ПД по плазмолемме МВ .

Передача сигнала в триадах на саркоплазматический ретикулум.

Выброс  $\text{Ca}^{2+}$  из саркоплазматического ретикулума.

Связывание  $\text{Ca}^{2+}$  тропонином С тонких нитей.

Взаимодействие тонких и толстых нитей (формирование мостиков), появление тянущего усилия и скольжение нитей относительно друг друга.

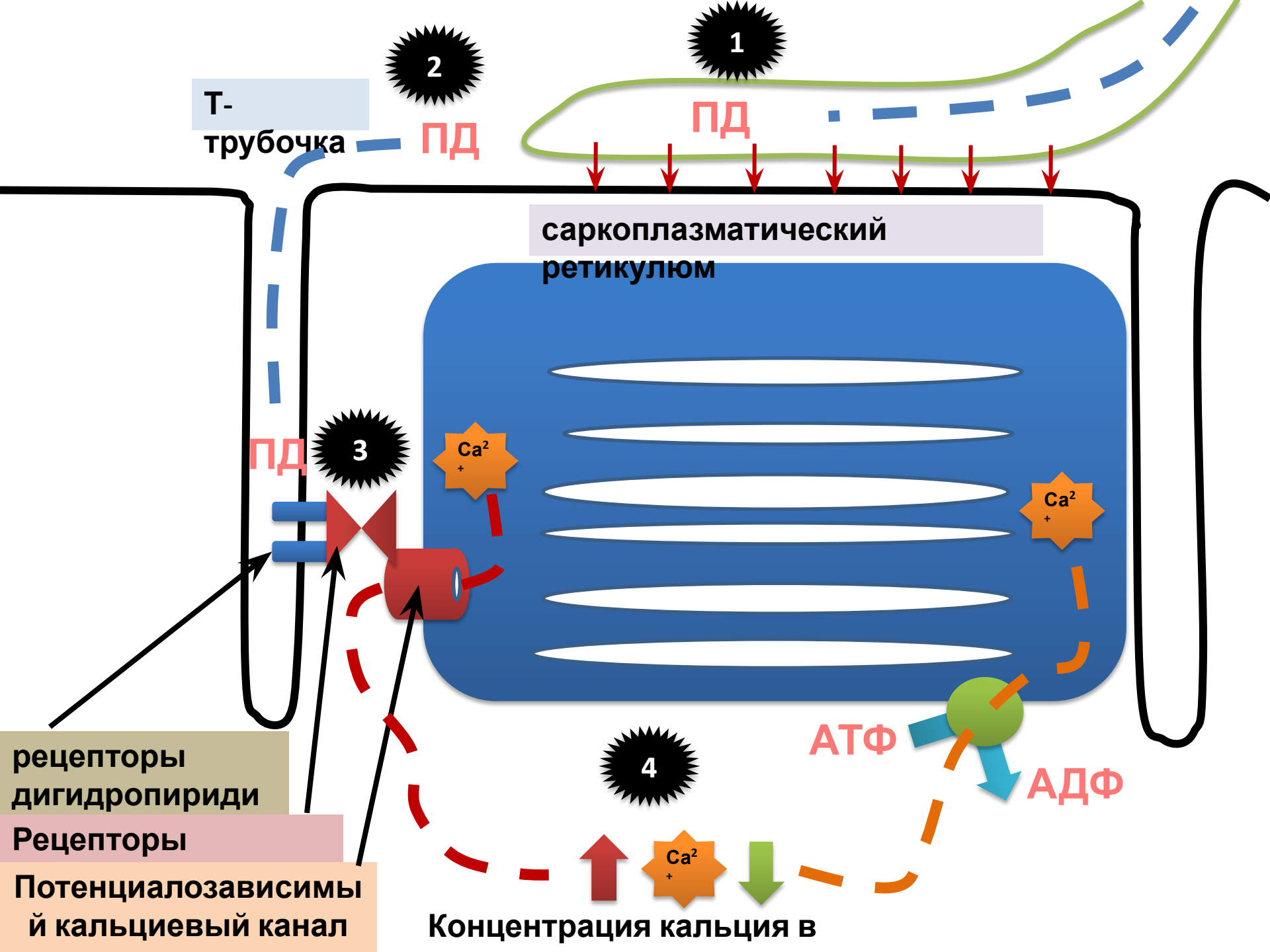
Цикл взаимодействия нитей.

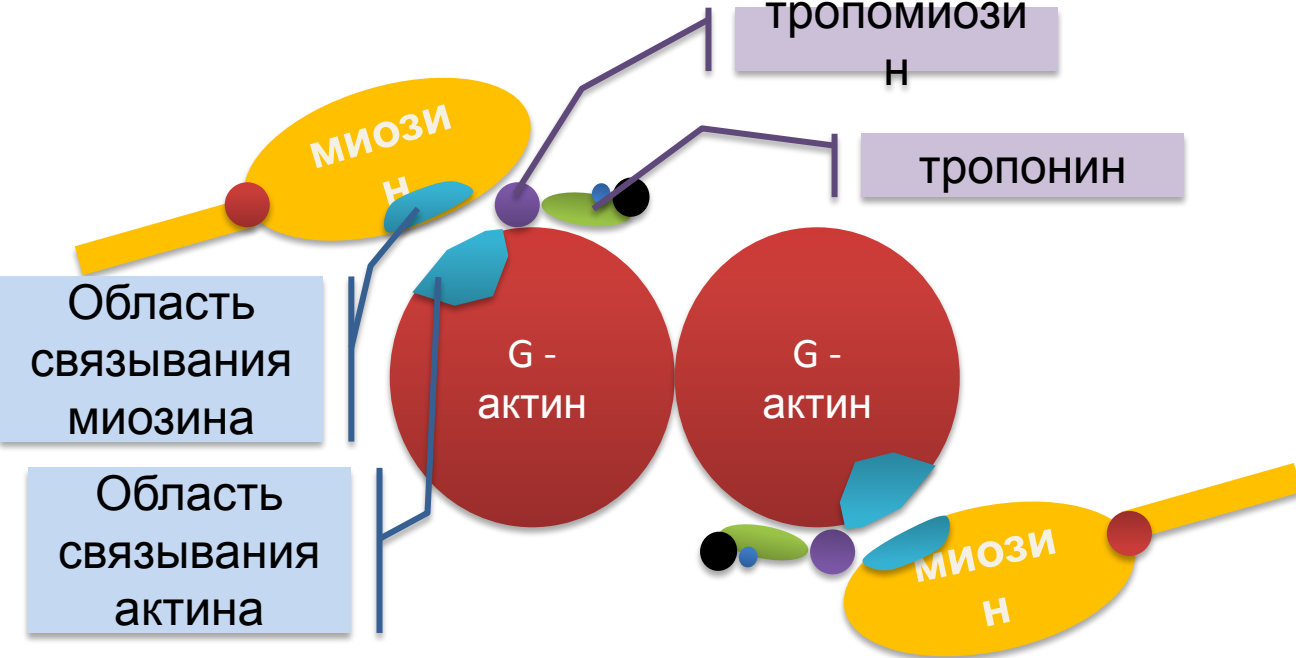
Укорочение саркомеров и сокращение МВ.

Расслабление.

# Теория «скользящих нитей»

- Мышца сокращается благодаря укорочению множества последовательно соединенных саркомеров в миофибрилле
- Во время сокращения сами актиновые и миозиновые нити **не укорачиваются**
- Актиновые нити скользят вдоль миозиновых к центру саркомера, за счет «гребных» движений головок миозина
- Головки периодически прикрепляются к актиновым нитям, образуя т.н. «мостики»





$Ca^{2+} < 10^{-9} M$

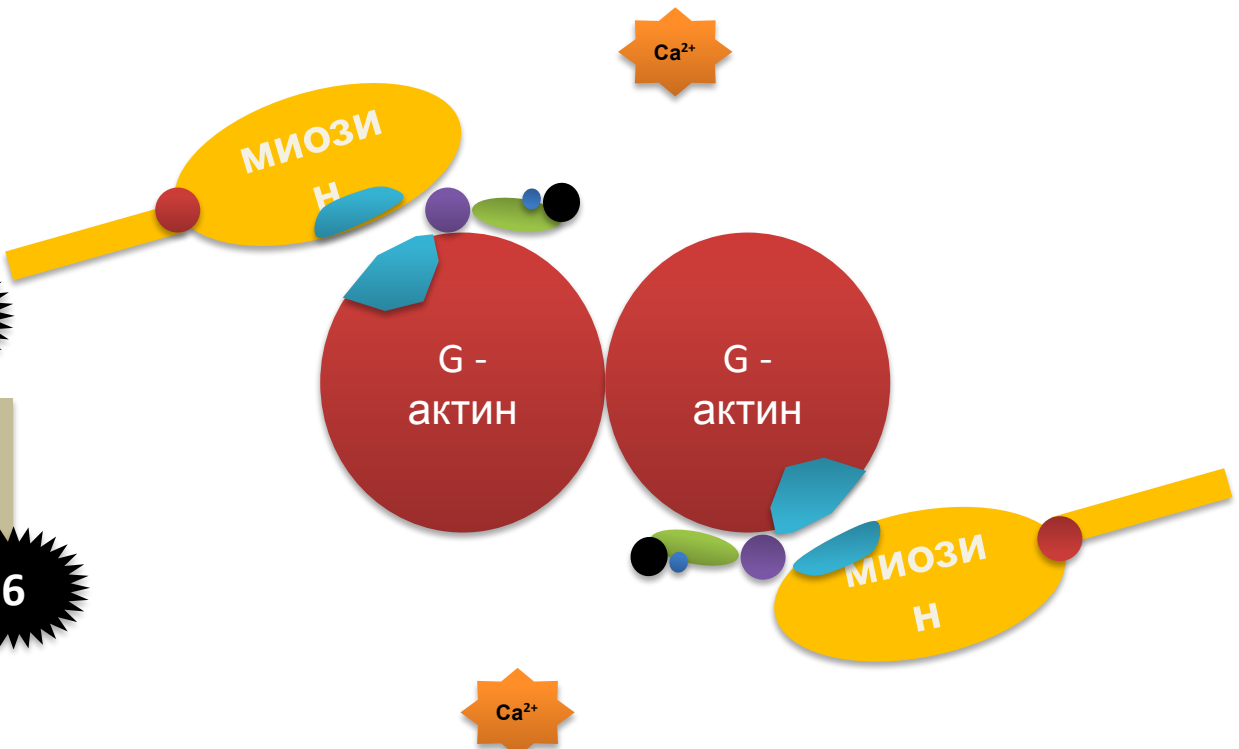
$Ca^{2+}$  не связан с тропонином.

Взаимодействие актина с миозином заблокировано.

$Ca^{2+} < 10^{-5} M$

$Ca^{2+}$  связан с тропонином.

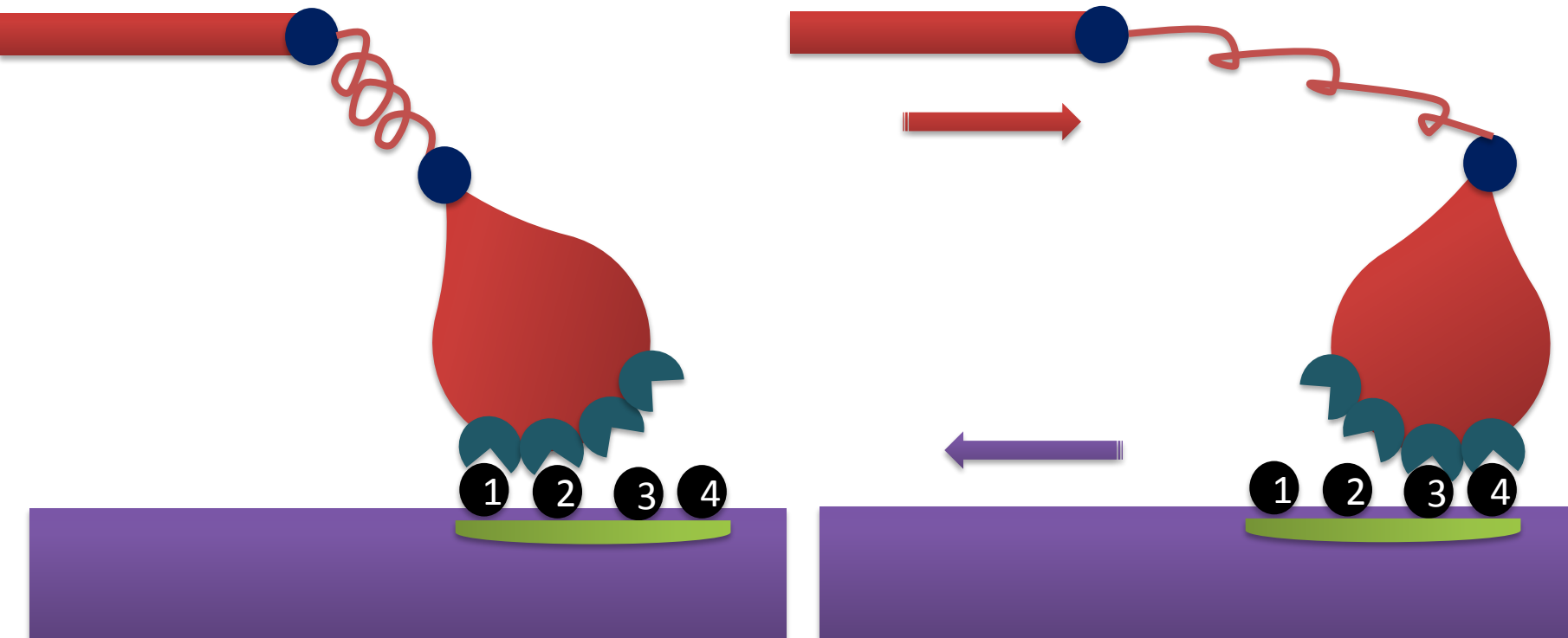
5



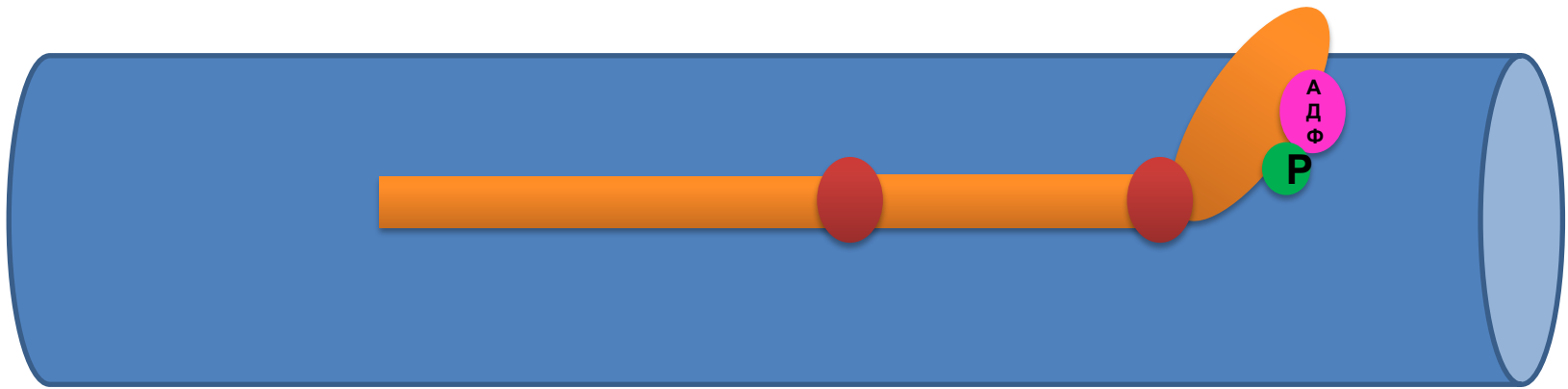
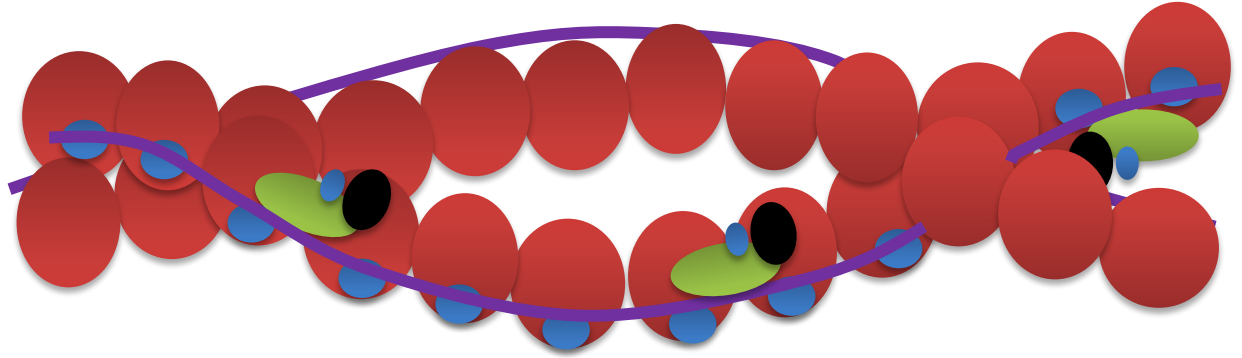
Взаимодействие актина с миозином разблокировано.

6

# Модель мостика Хаксли-Симмонса

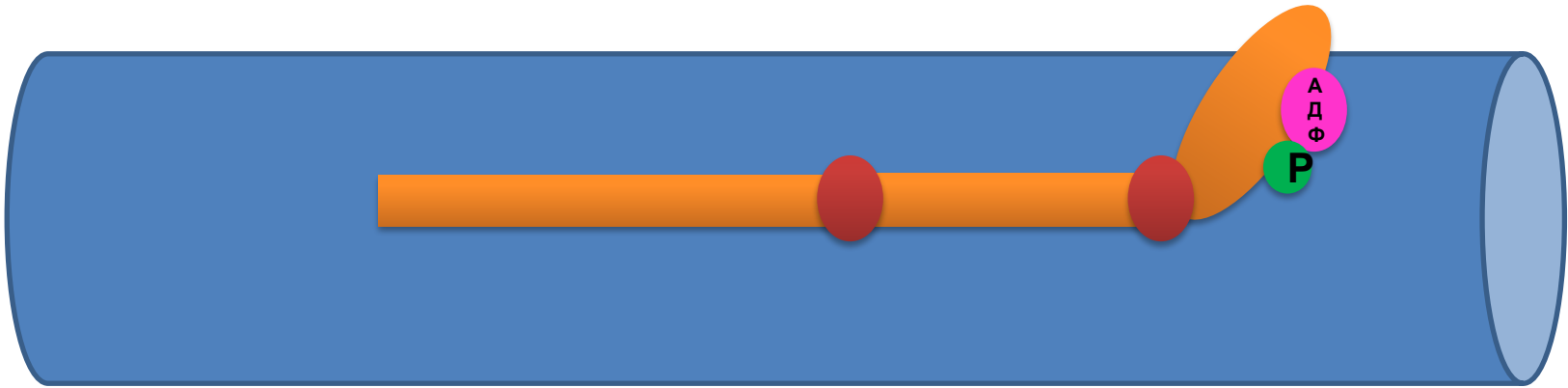
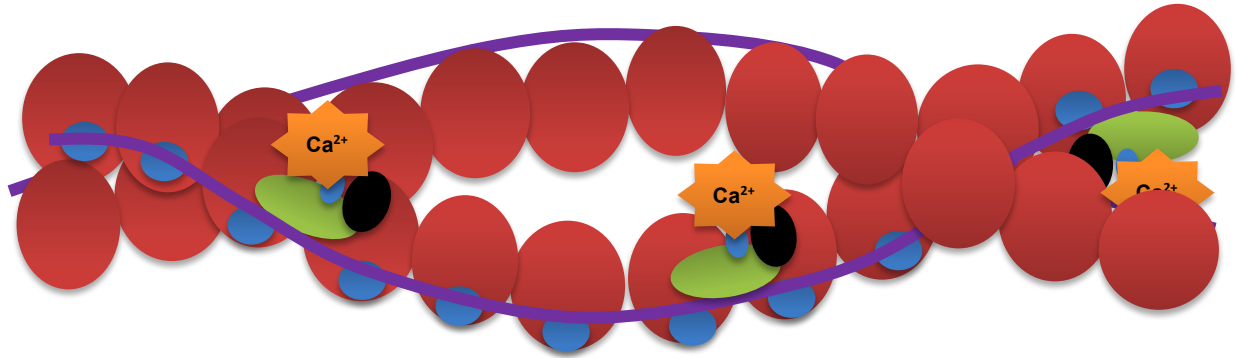


# Цикл взаимодействия нитей

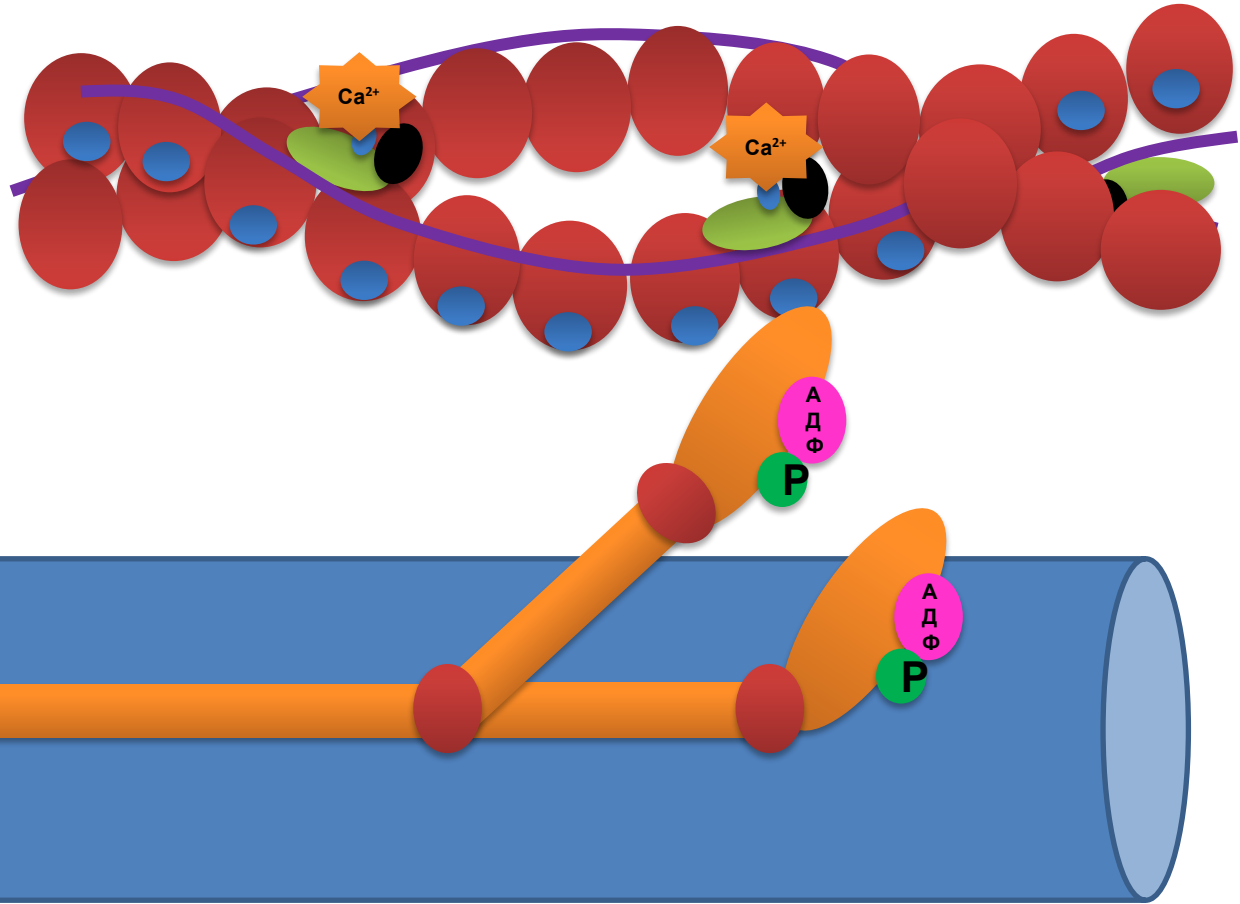




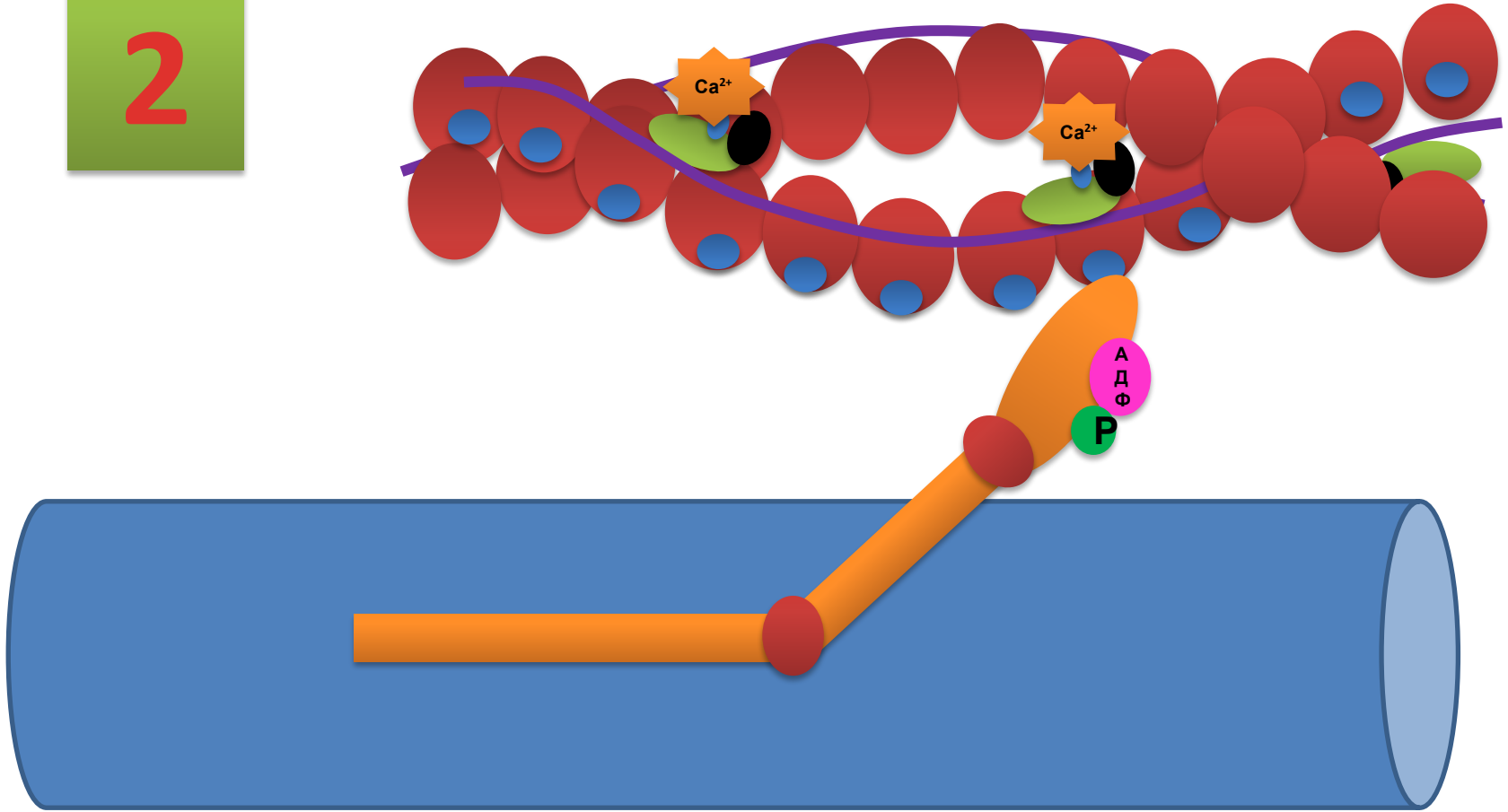
1

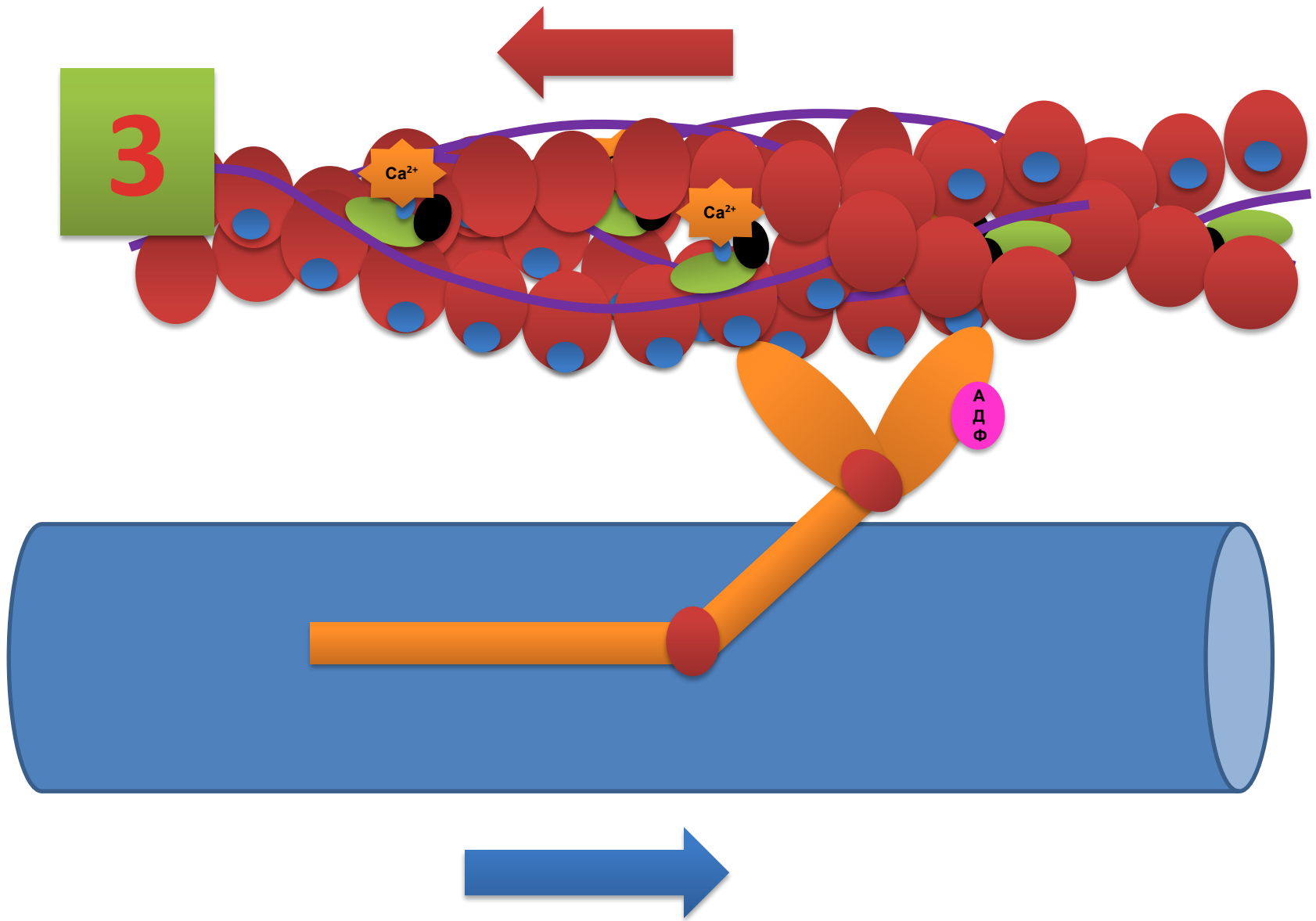


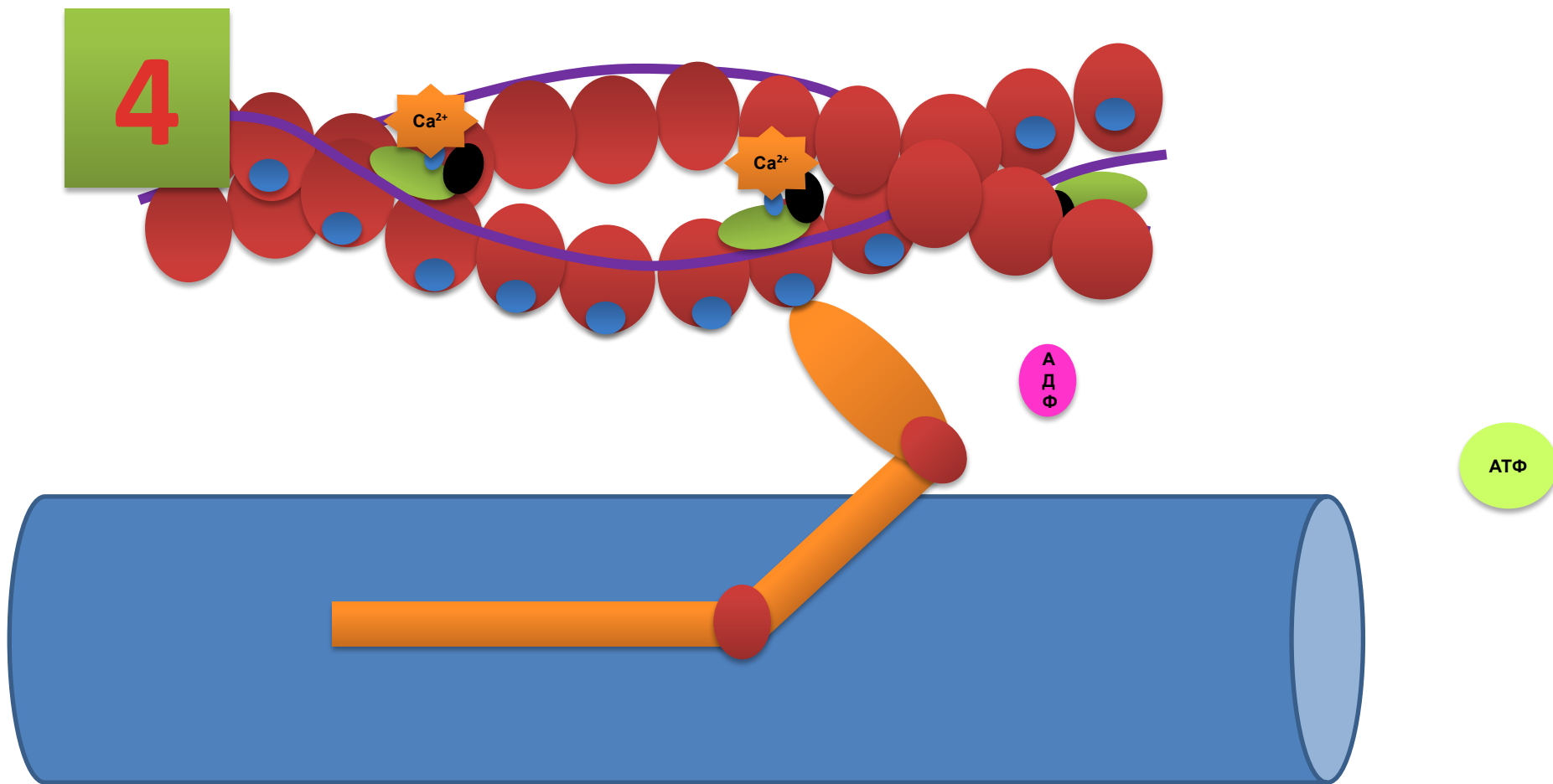
1

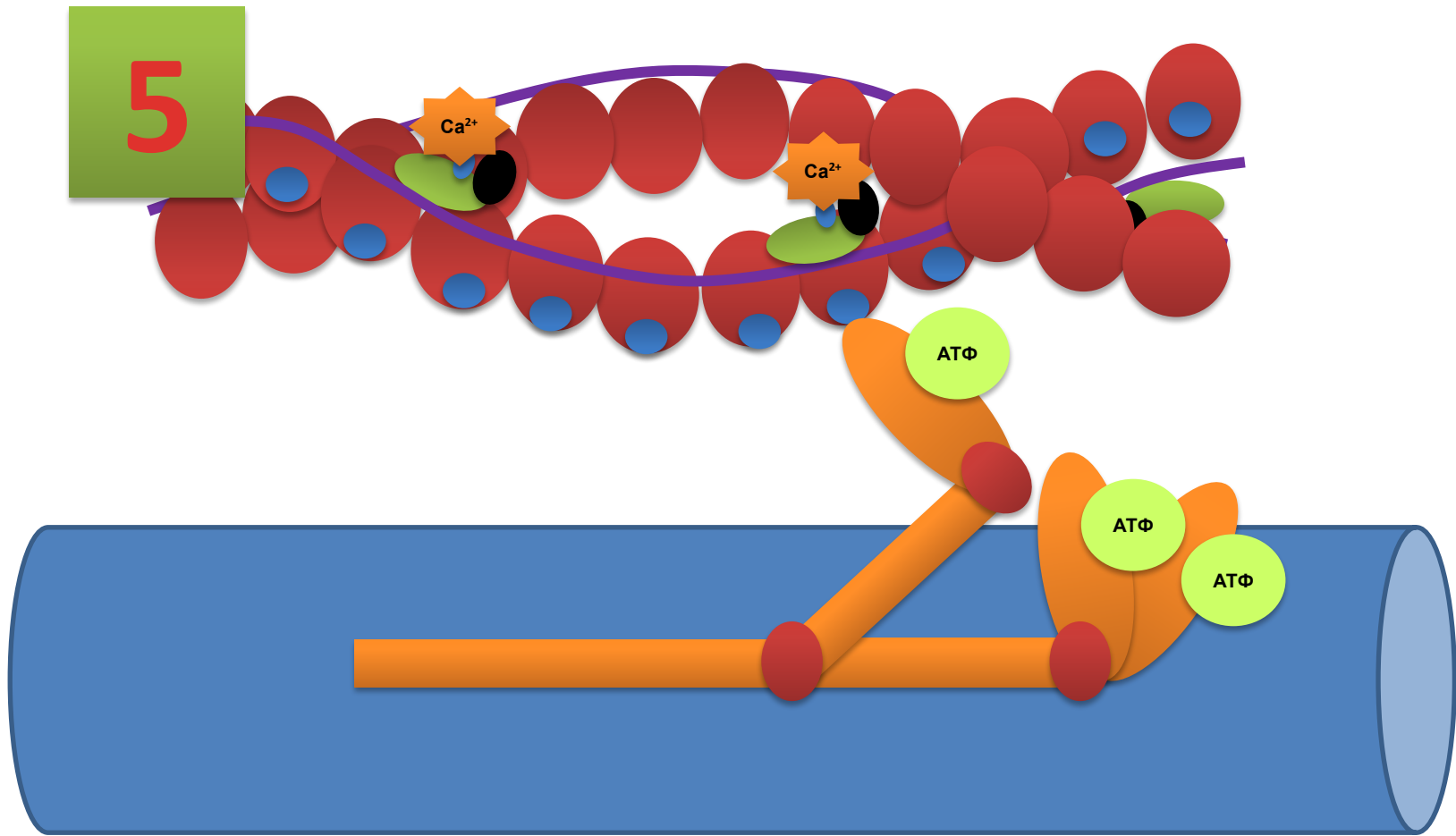


2

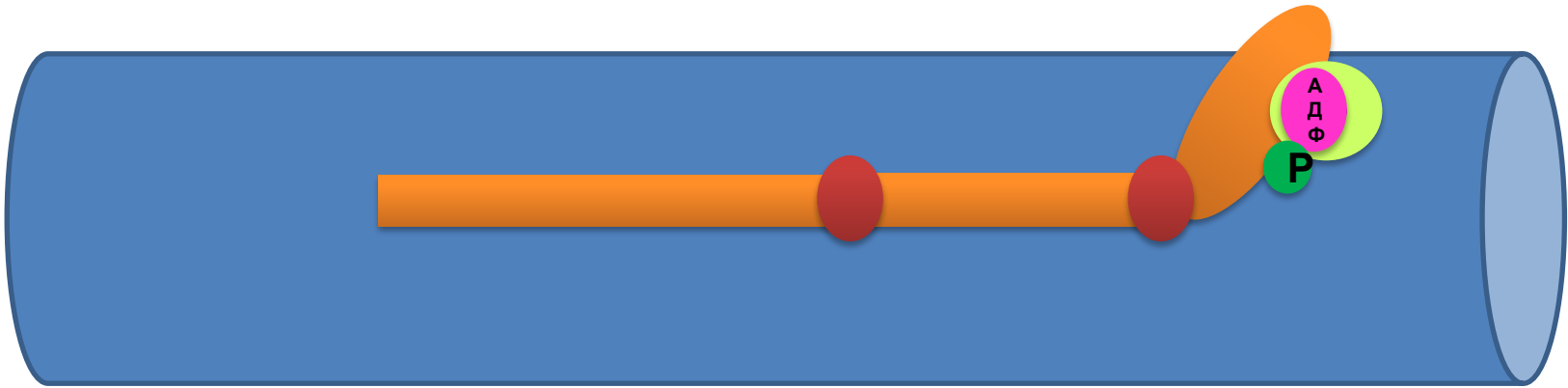
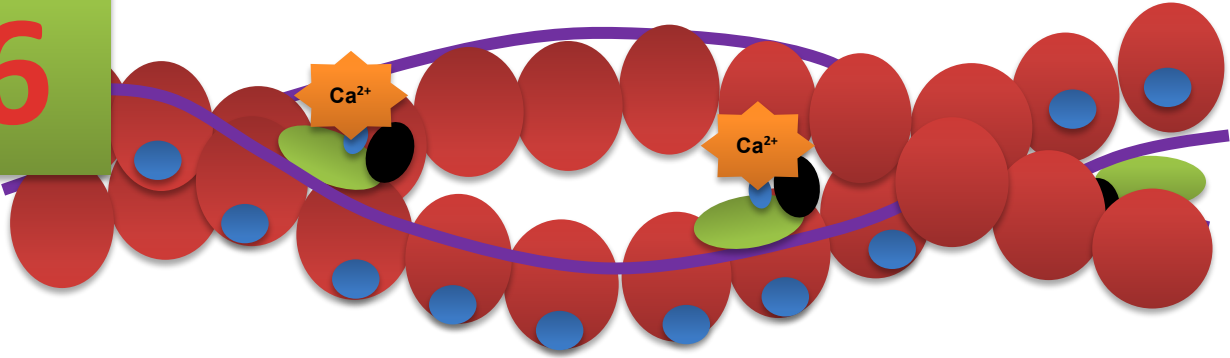




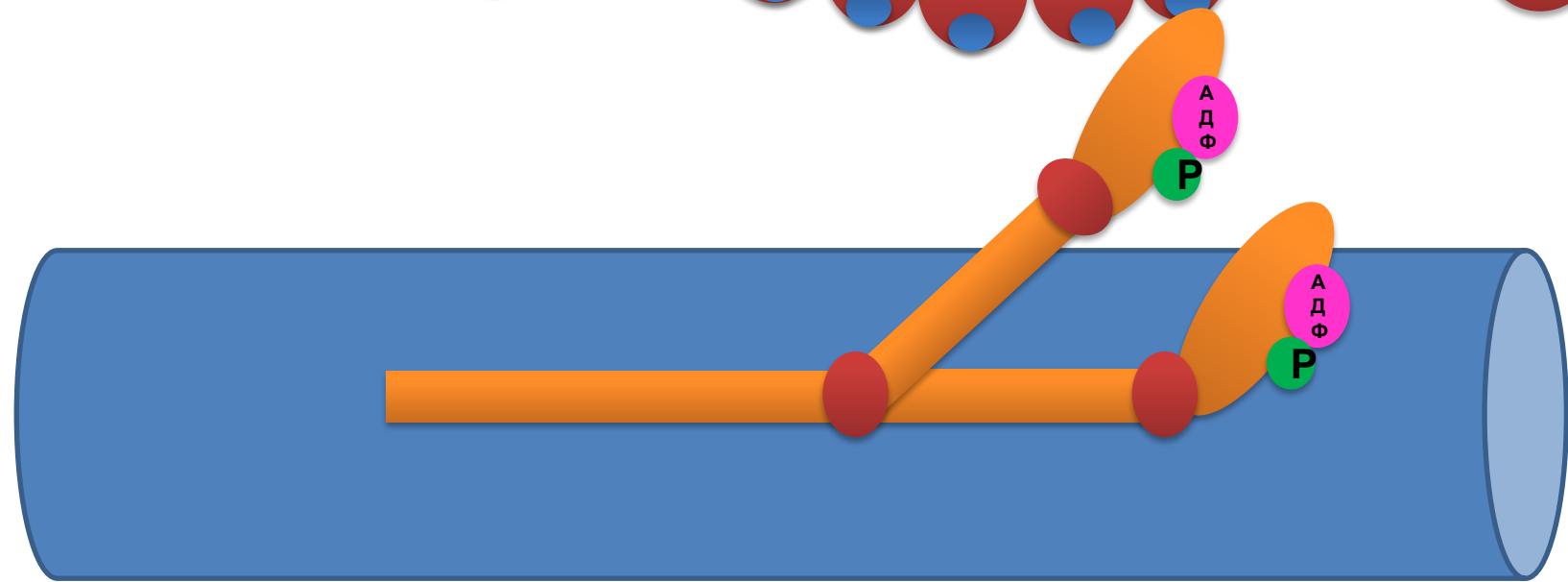
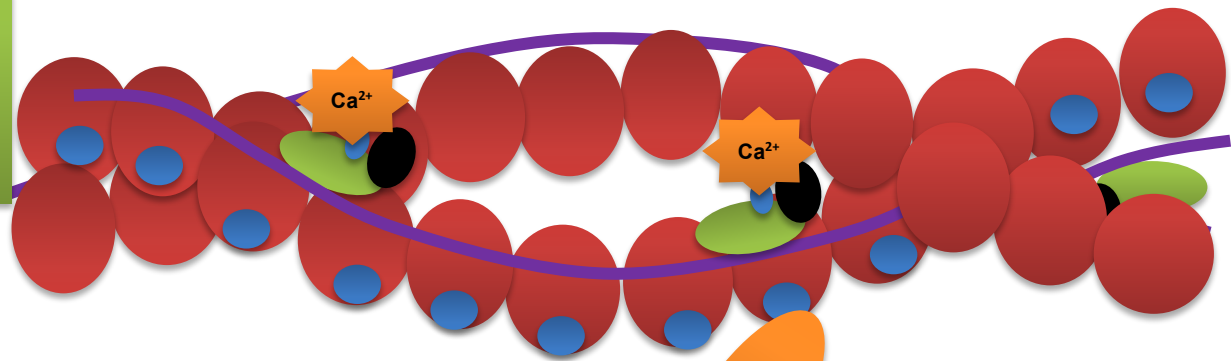




6

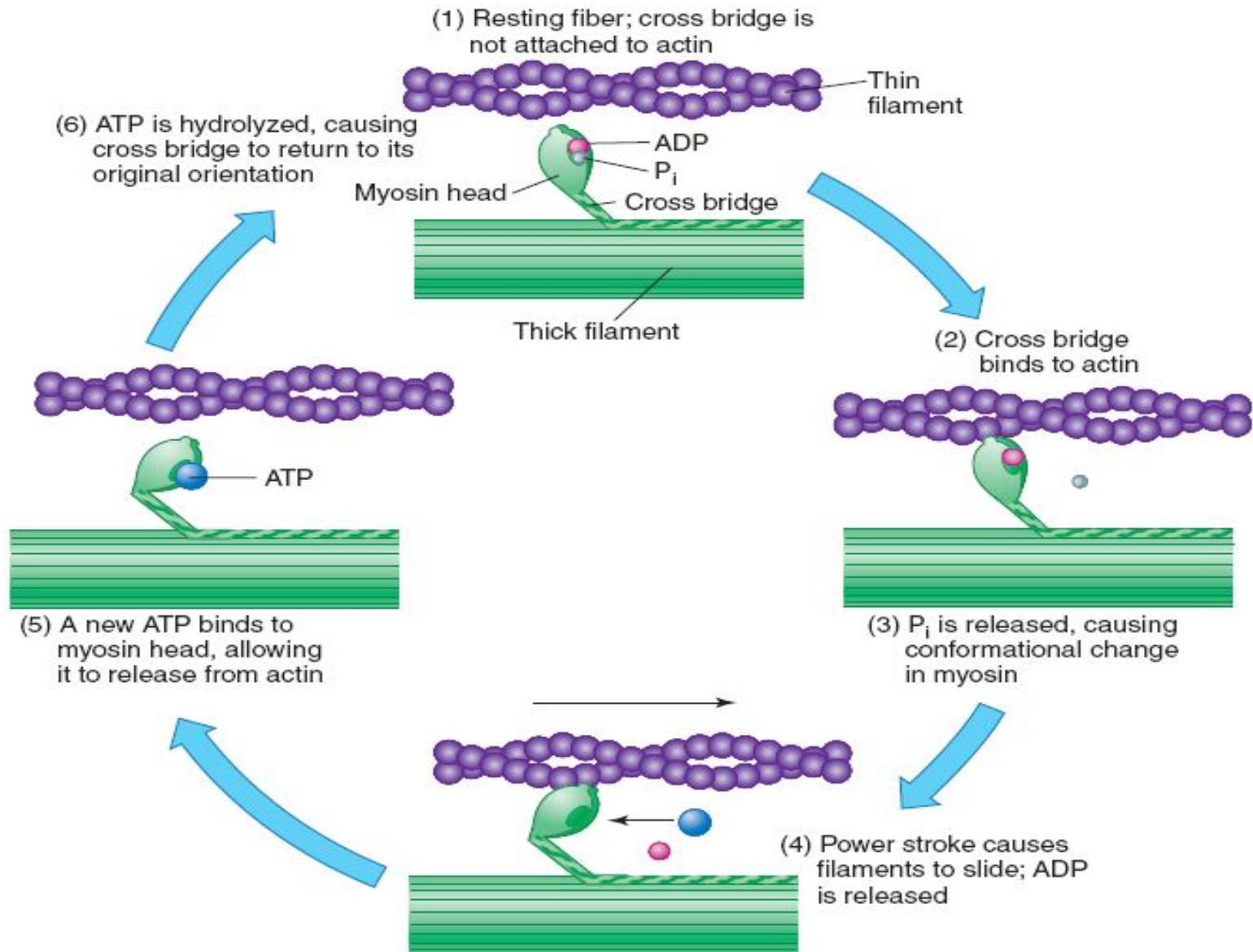


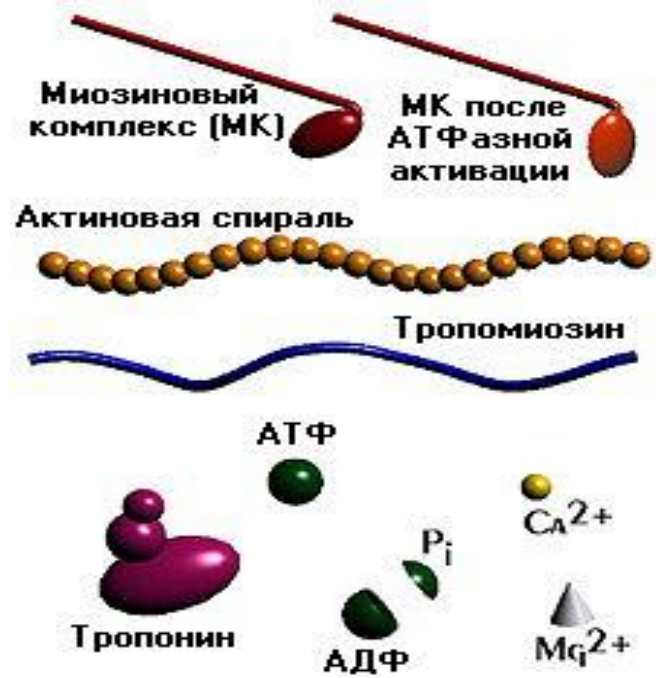
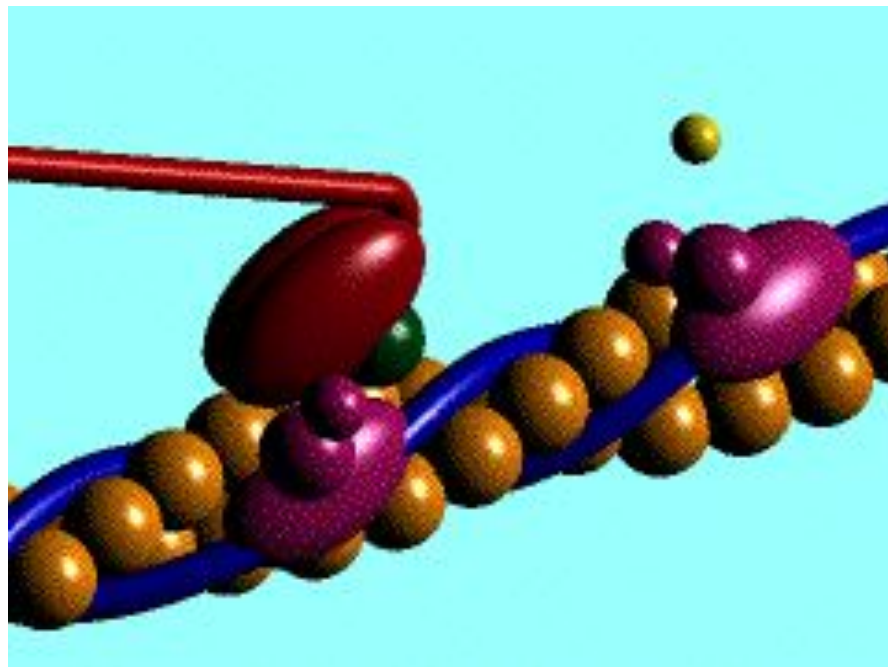
1 = 7





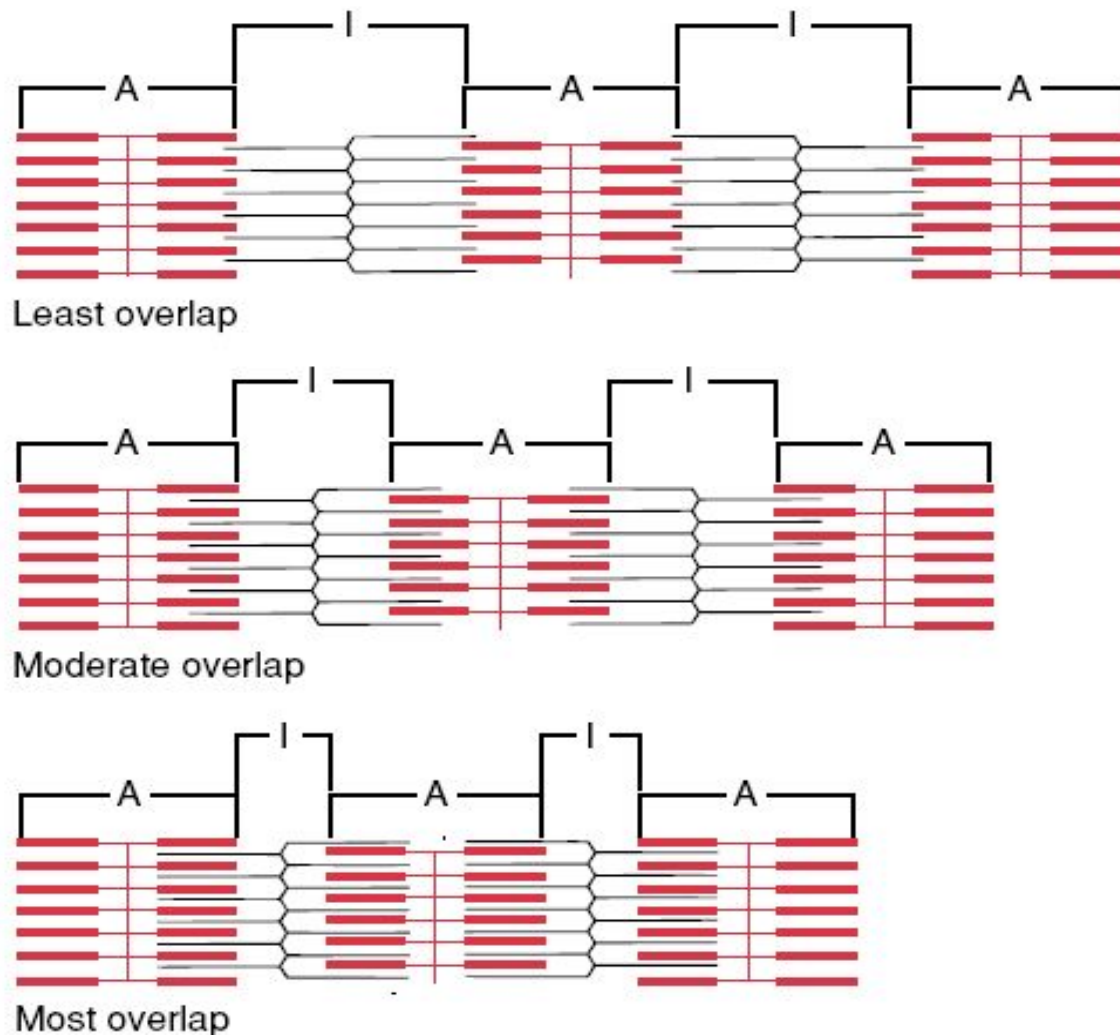
# Цикл взаимодействия нитей





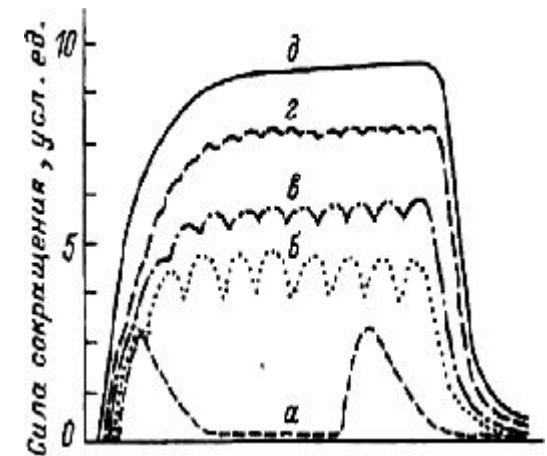
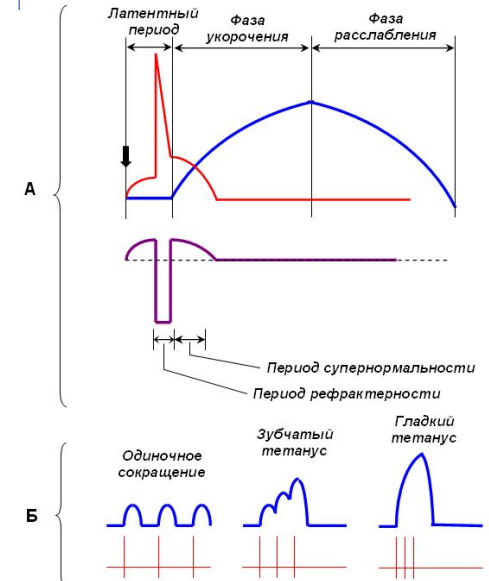
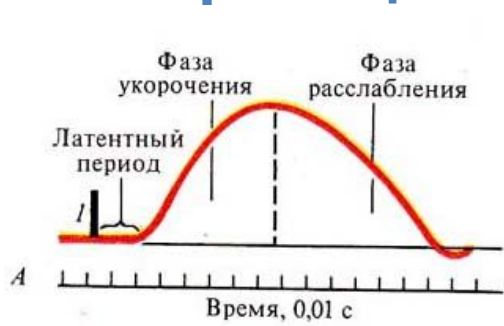
# Укорочение саркомеров и сокращение

MP

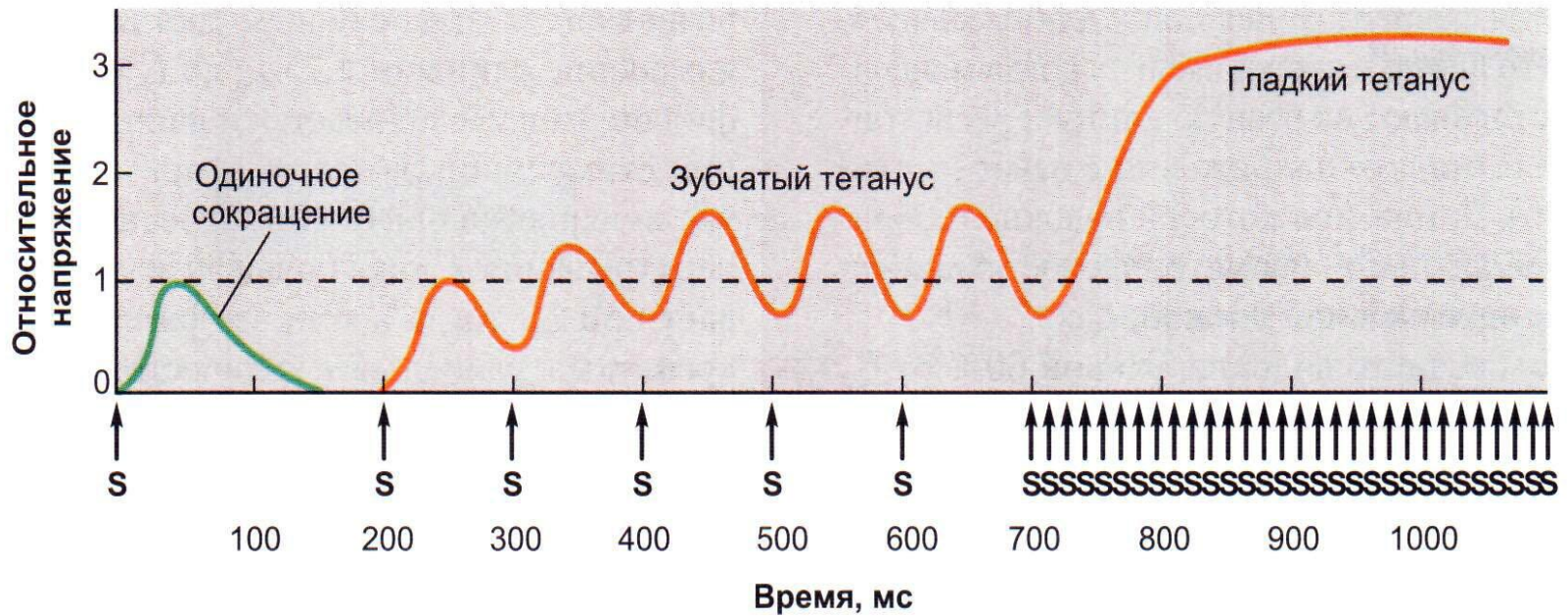


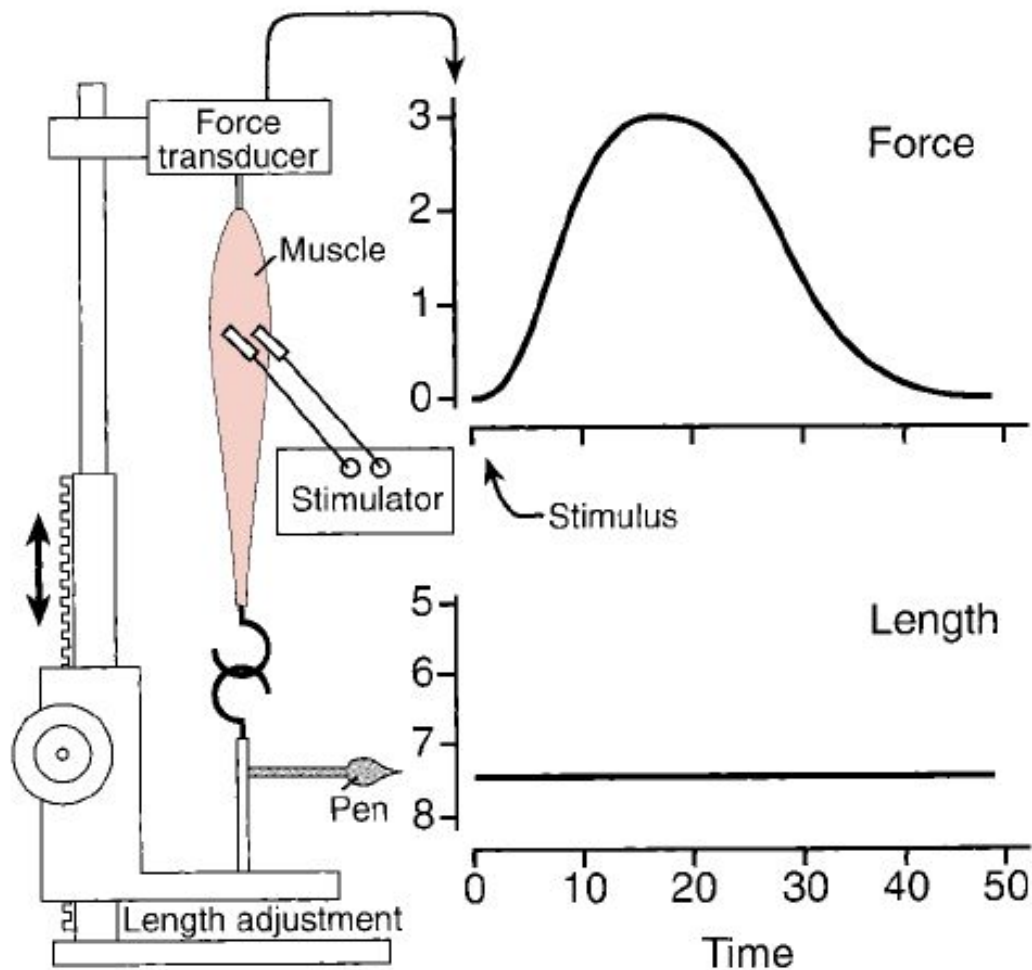
**FIGURE 8.8** The multiplying effect of sarcomeres placed in series. The overall shortening is the sum of the shortening of the individual sarcomeres.

# Одиночное и тетаническое сокращение скелетной мышцы



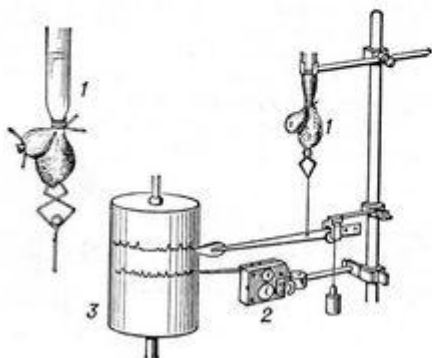
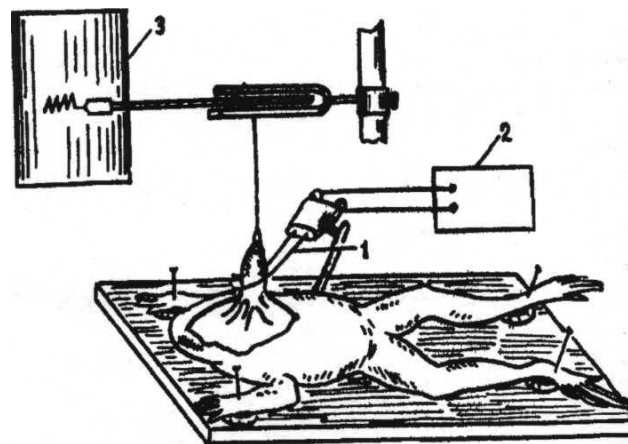
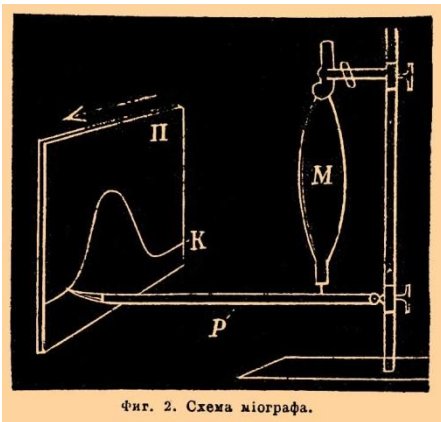
# Опыты с тетаническим сокращением





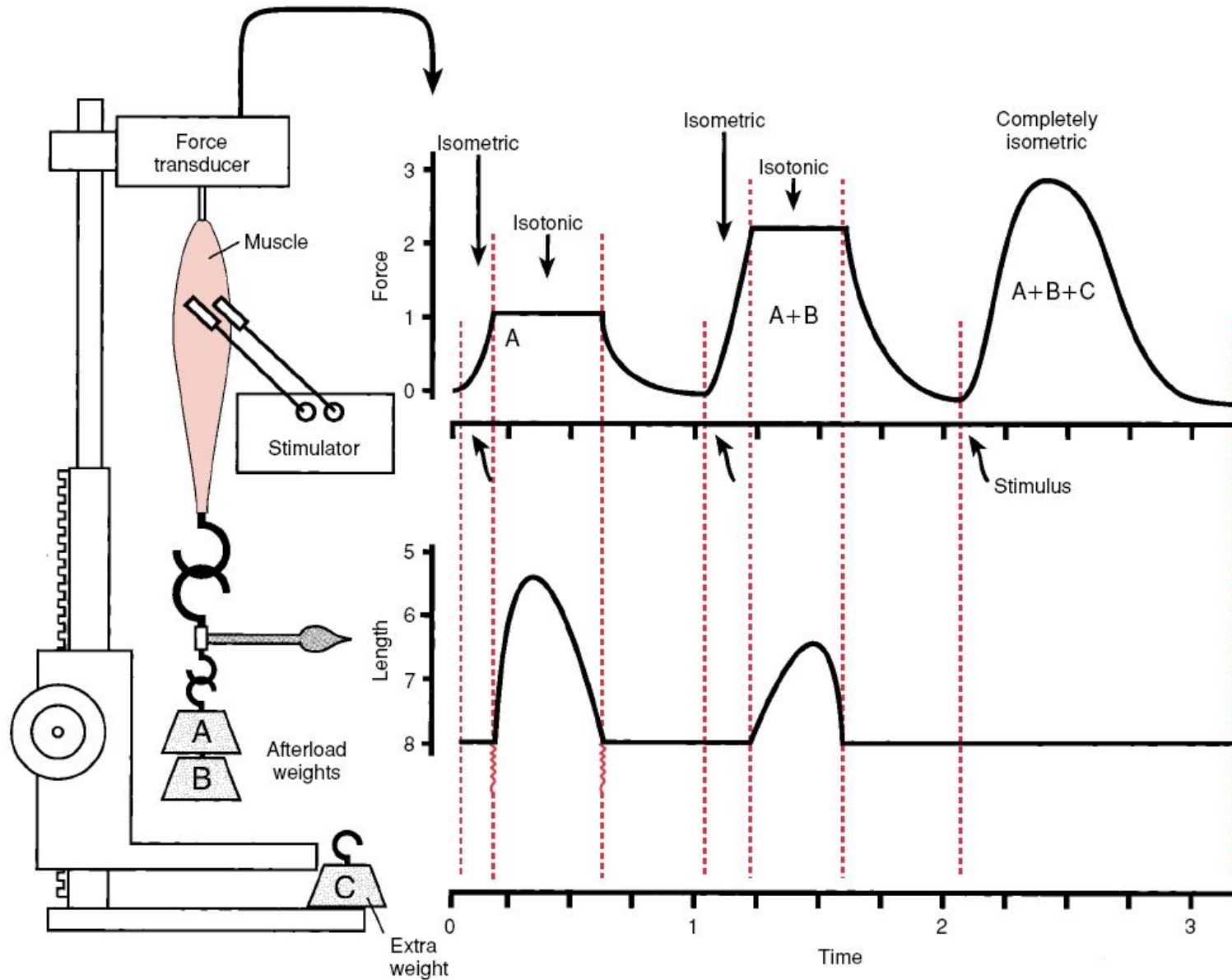
**FIGURE 9.7** A simple apparatus for recording isometric contractions. The length of the muscle (marked on the graph by the pen attached near its lower end) is adjustable at rest but is held constant during contraction. The force transducer provides a record of the isometric force response to a single stimulus at a fixed length (isometric by definition). (Force, length, and time units are arbitrary.)

# Запись сокращения мышцы – миограмма, кимограф



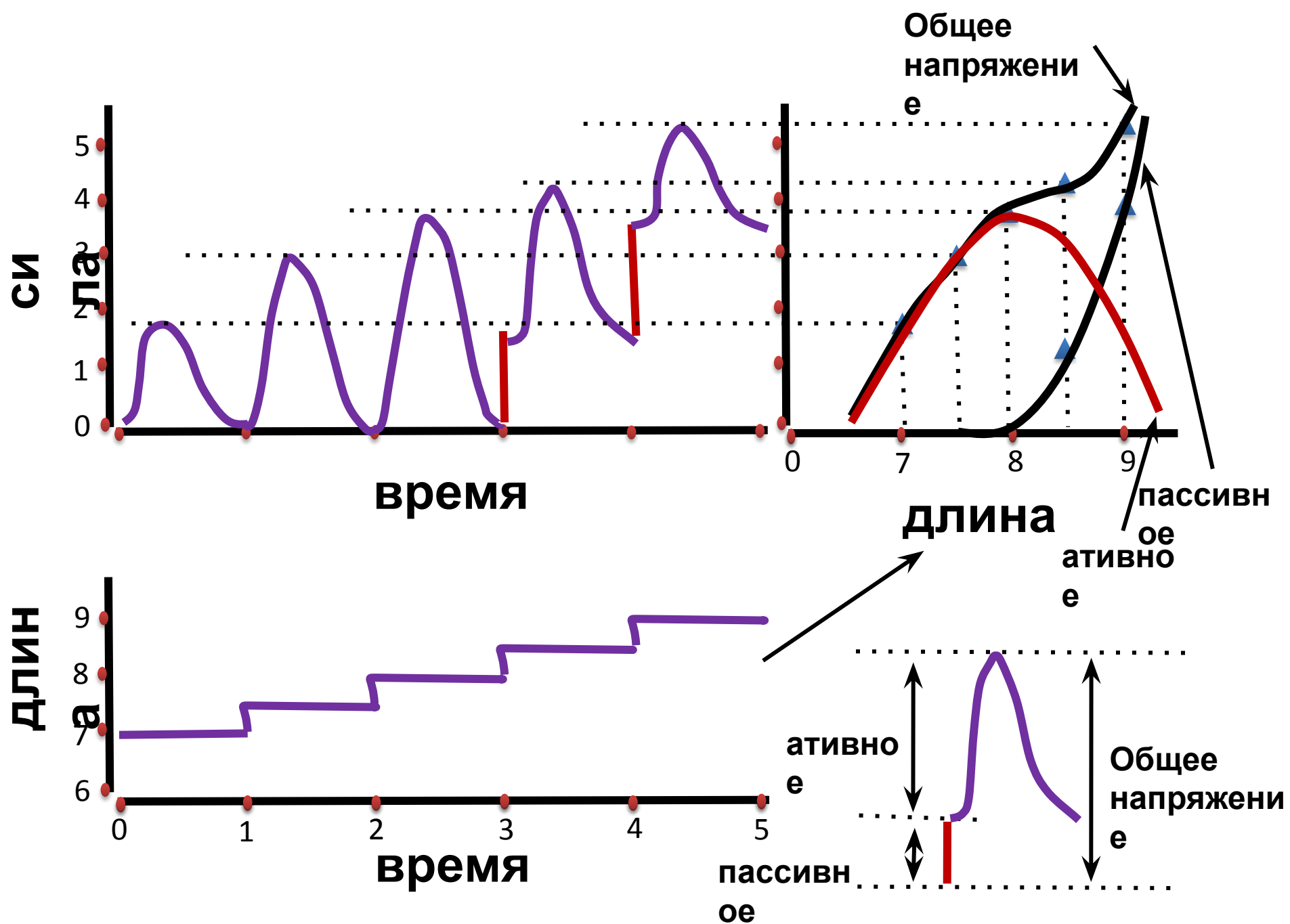


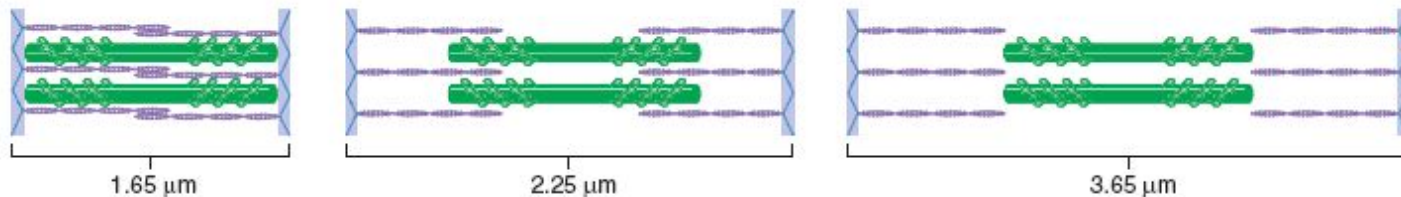
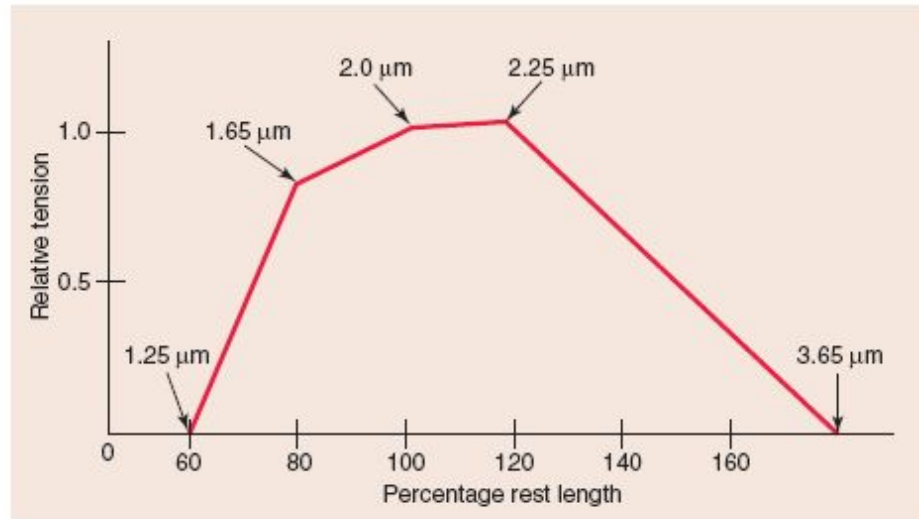




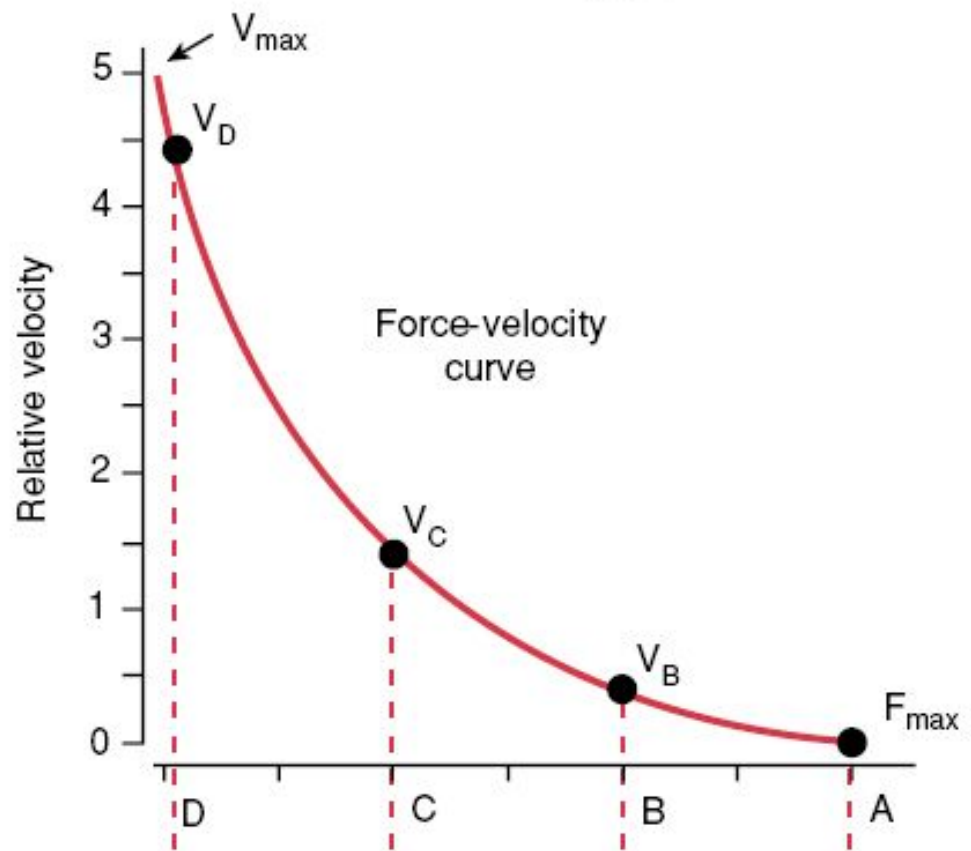
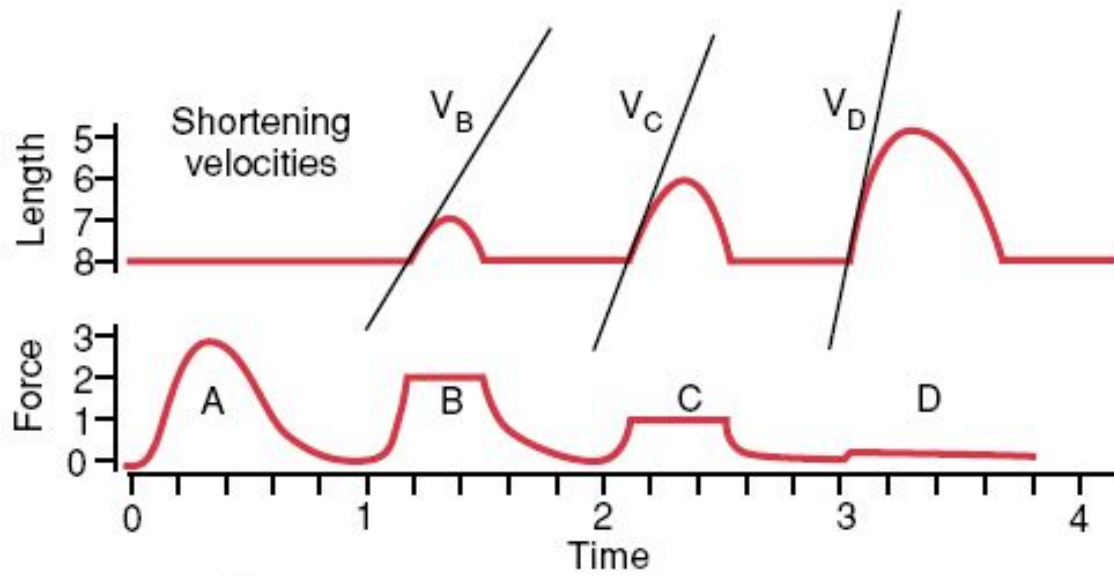
**FIGURE 9.9** A series of afterloaded isotonic contractions. The curves labeled A and A + B correspond to the force and shortening records during the lifting of those weights. In each case, the adjustable platform prevents the muscle from being stretched by the attached weight, and all con-

tractions start from the same muscle length. Note the lower force and greater shortening with the lower weight (A). If weight C (total weight = A + B + C) is added to the afterload, the muscle cannot lift it, and the entire contraction remains isometric. (Force, length, and time units are arbitrary.)



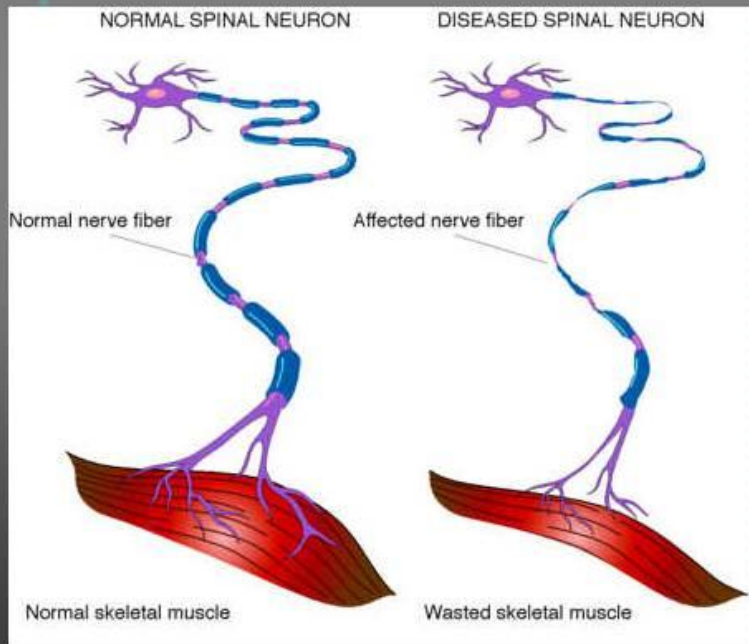


■ **Figure 12.20** The length-tension relationship in skeletal muscles. Maximum relative tension (1.0 on the y axis) is achieved when the muscle is 100% to 120% of its resting length (sarcomere lengths from 2.0 to 2.25  $\mu\text{m}$ ). Increases or decreases in muscle (and sarcomere) lengths result in rapid decreases in tension.

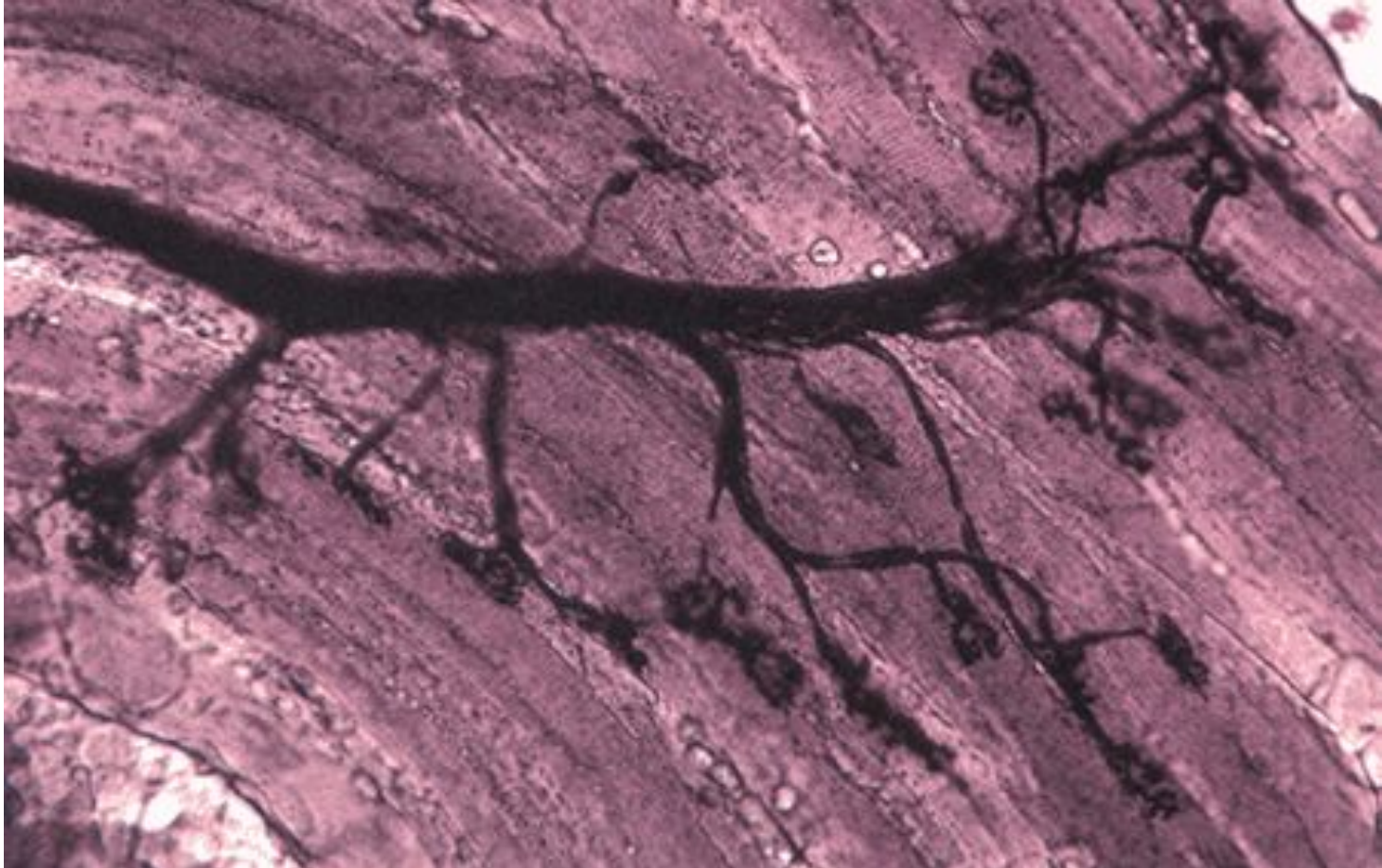


# Двигательная единица

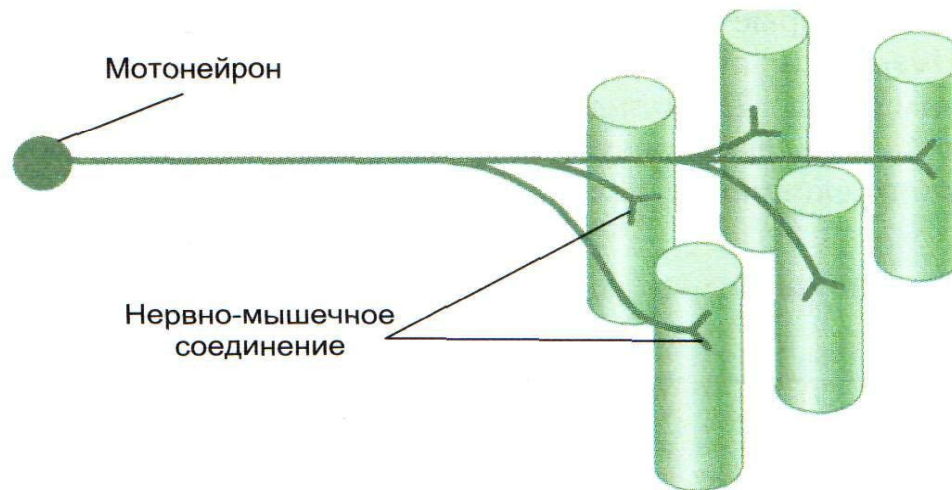
группа мышечных волокон, иннервируемых одним двигательным нейроном, которые сокращаются одновременно



# Иннервация мышц

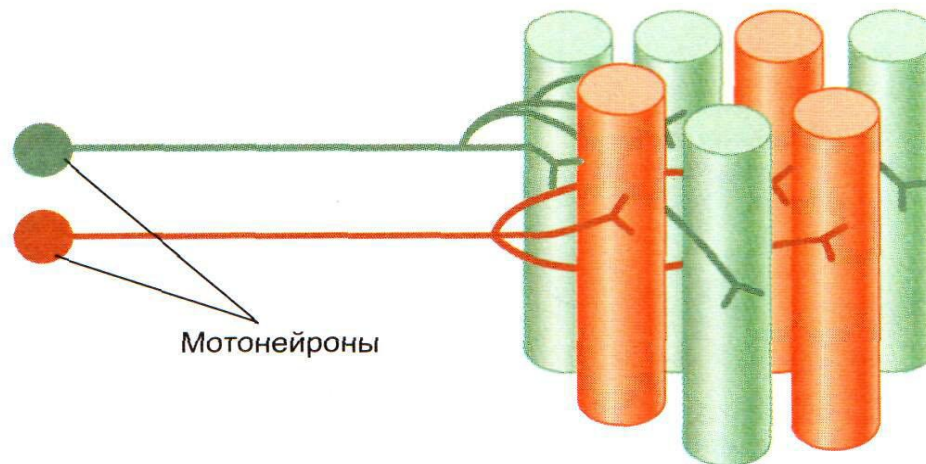


# Двигательные единицы



Одна двигательная единица

а



Две двигательные единицы

б

### Число мышечных волокон в двигательной единице

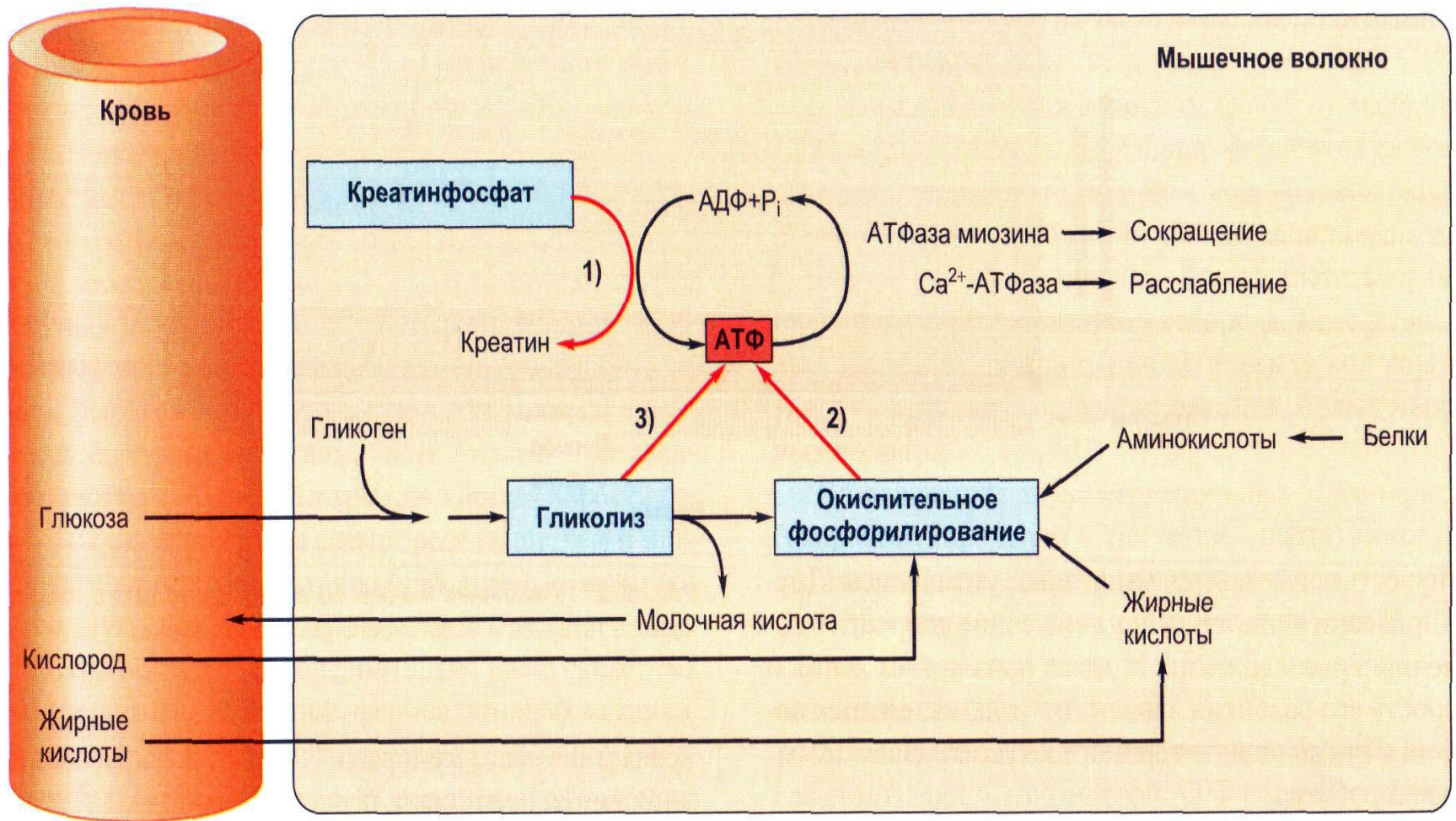
Мышцы	Число мышечных волокон
Глаза	Менее 10
Пальцев руки	10—25
Двуглавая мышца	Около 750
Камбаловидная мышца	» 2000



# Классификация двигательных единиц

- *Фазные (фазовые)*
  1. Быстрые («белые») – одиночная иннервация, генерируют быстро распространяющийся ПД, длительность сокращения 10-30 мс
  2. Медленные («красные») – одиночная иннервация, скорость проведения ПД ниже. Длительность сокращения 100 мс и более. Малоутомляемы
- *Тонические* – у земноводных, рептилий. Множественная иннервация, ПД не генерируется, возбуждение в виде ЛО

# Энергетическое обеспечение работы скелетных мышц

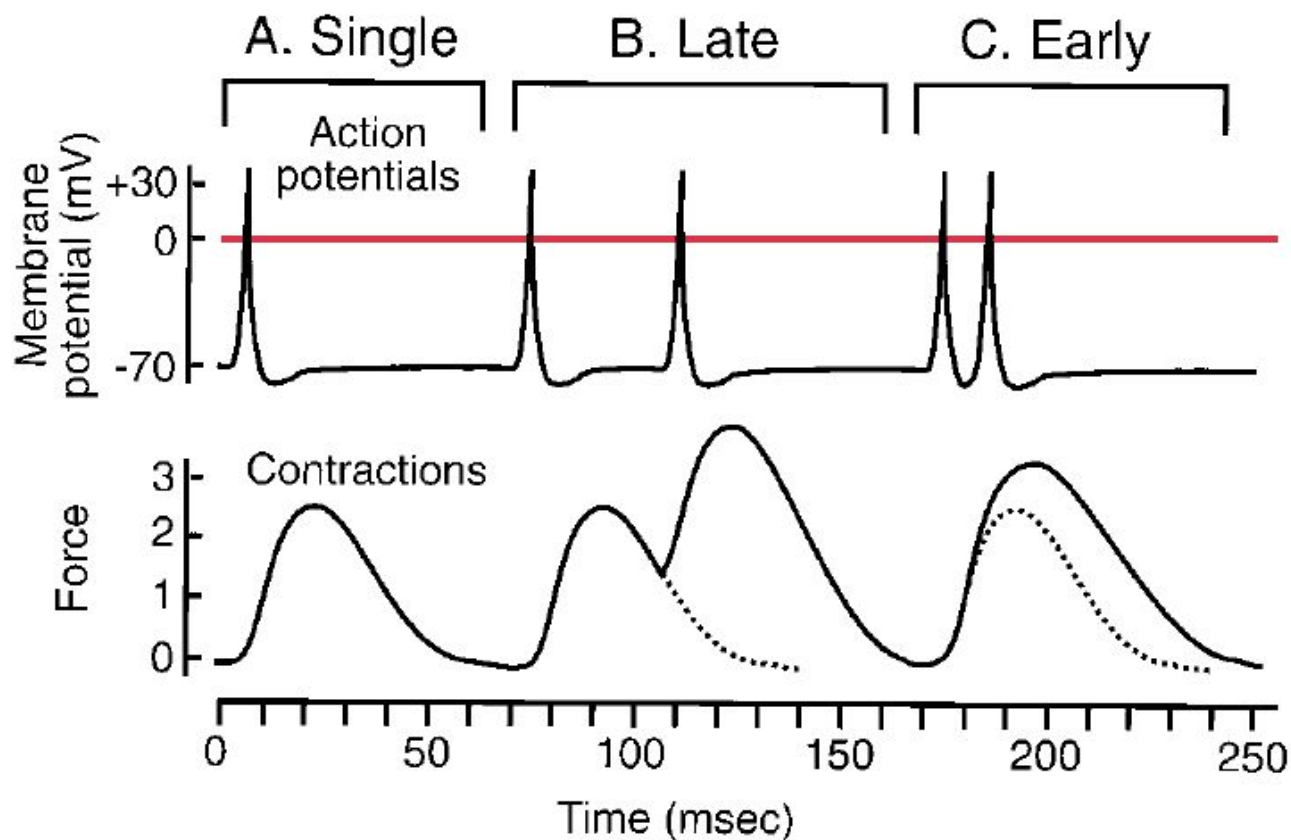


# Режимы мышечных сокращений

- **Изотоническое** – мышца при этом укорачивается, т.к. закреплен только один конец мышцы. Напряжение остается постоянным. Основа **динамической** работы
- **Изометрическое** – оба конца мышцы закреплены, длина мышечных волокон постоянна, напряжение нарастает. Основа **статической** работы

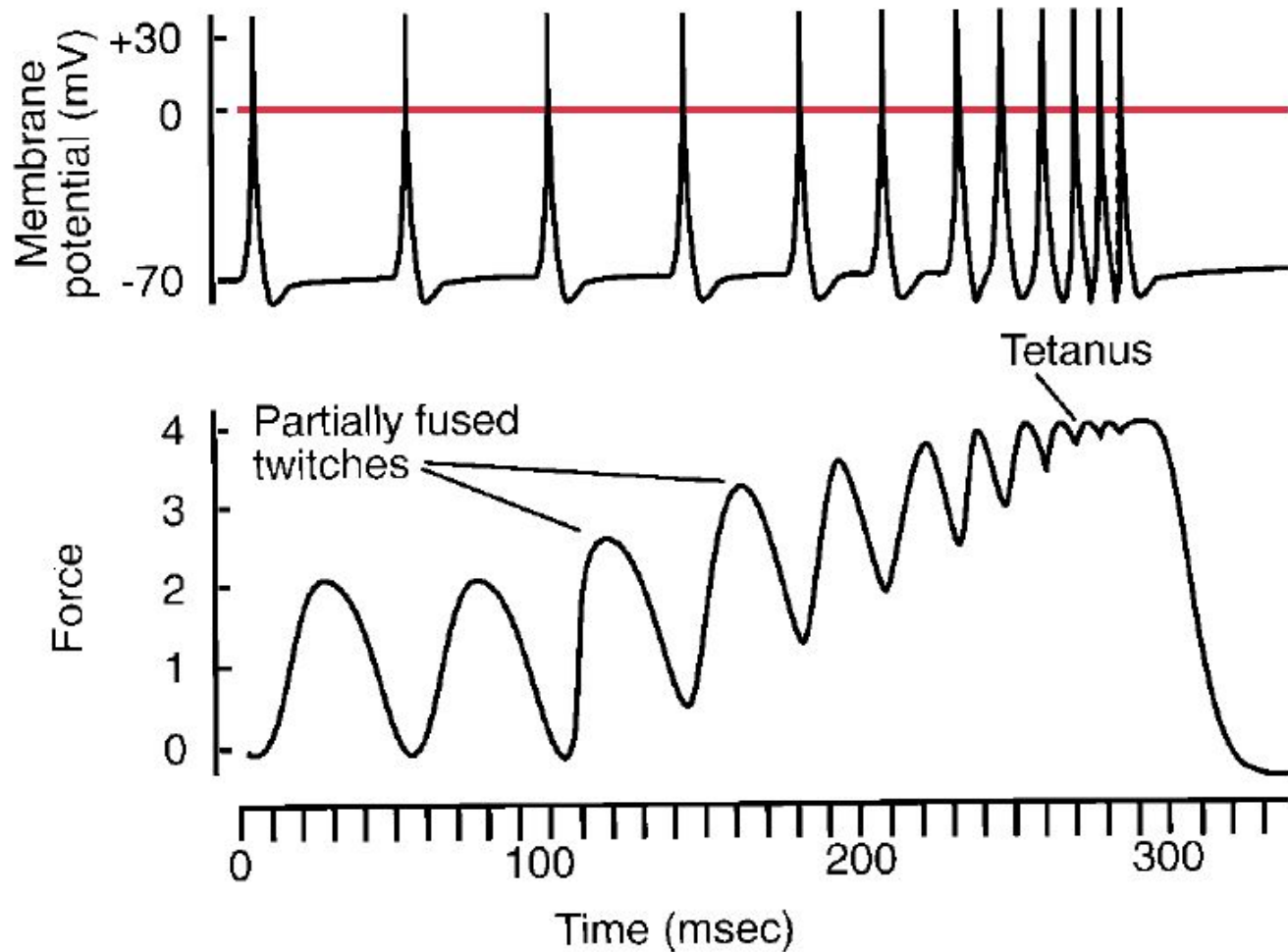
# В целостном организме различают режимы:

- *Изометрическое*
- *Концентрическое* – с укорочением мышцы
- *Эксцентрическое* – с удлинением мышцы (работа по опусканию груза)

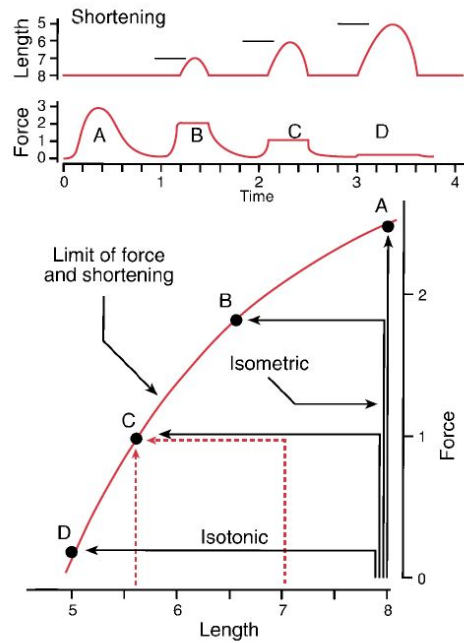


**FIGURE 9.4** Temporal summation of muscle twitches. A, The first contraction is in response to a single action potential. B, The next contraction shows the summed response to a second stimulus given during relaxation; the two individual responses are evident. C, The last contraction is the result of two stimuli in quick succession. Though measured force was still rising when the second stimulus was given, the fact that there could be an added response shows that internal activation had begun to decline. In all cases, the solid line in the lower graph represents the actual summed tension.

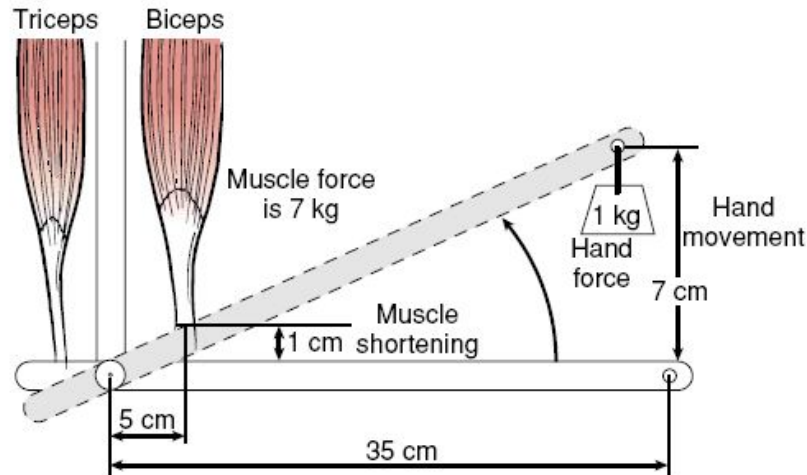
## Motor nerve action potentials



**FIGURE 9.5** Fusion of twitches into a smooth tetanus. The interval between successive stimuli steadily decreases until no relaxation occurs between stimuli.



**FIGURE 9.12** The relationship between isotonic and isometric contractions. The top graphs show the contractions from Figure 9.11, with different amounts of shortening. The bottom graph shows, for contractions B, C, and D, the initial portion is isometric (the line moves upward at constant length) until the afterload force is reached. The muscle then shortens at the afterload force (the line moves to the left) until its length reaches a limit determined (at least approximately) by the isometric length-tension curve. The dotted lines show that the same final force/length point can be reached by several different approaches. Relaxation data, not shown on the graph, would trace out the same pathways in reverse. (Force, length, and time units are arbitrary.)

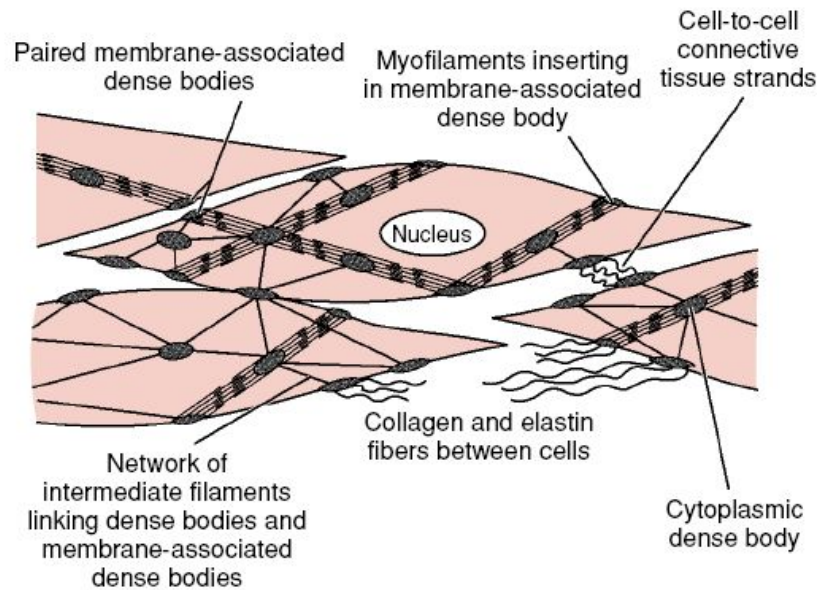


**FIGURE 9.13** Antagonistic pairs and the lever system of skeletal muscle. Contraction of the biceps muscle lifts the lower arm (flexion) and elongates the triceps, while contraction of the triceps lowers the arm and hand (extension) and elongates the biceps. The bones of the lower arm are pivoted at the elbow joint (the fulcrum of the lever); the force of the biceps is applied through its tendon close to the fulcrum; the hand is 7 times as far away from the elbow joint. Thus, the hand will move 7 times as far (and fast) as the biceps shortens (lever ratio, 7:1), but the biceps will have to exert 7 times as much force as the hand is supporting.

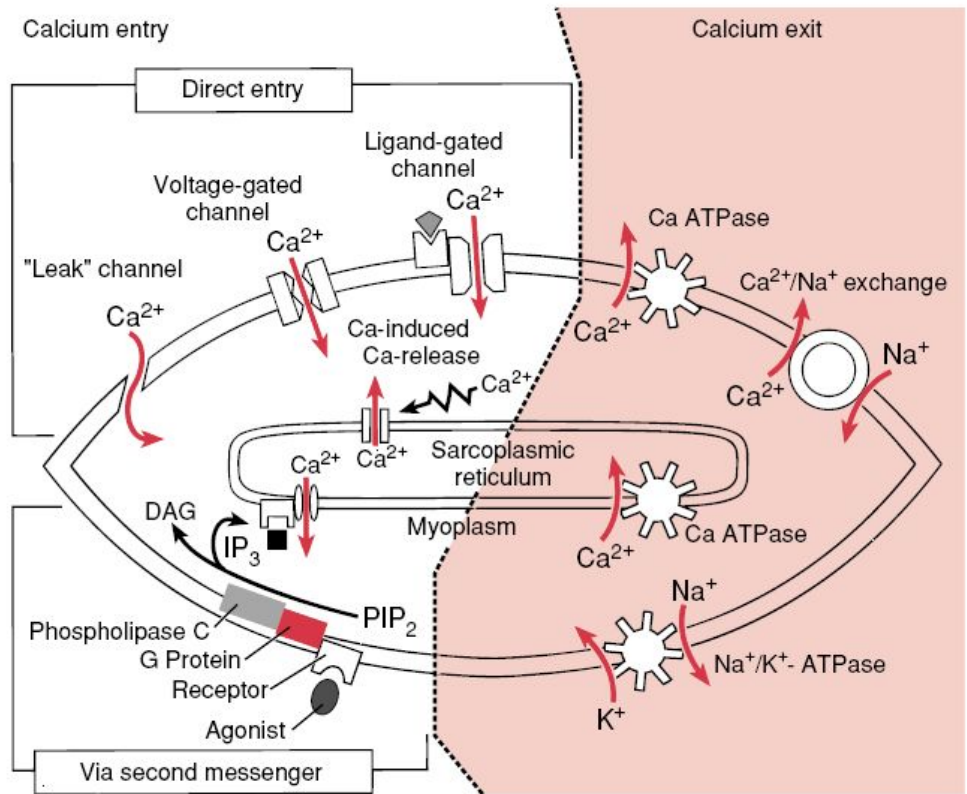


**TABLE 9.1** Classification of Skeletal Muscle Fiber Types

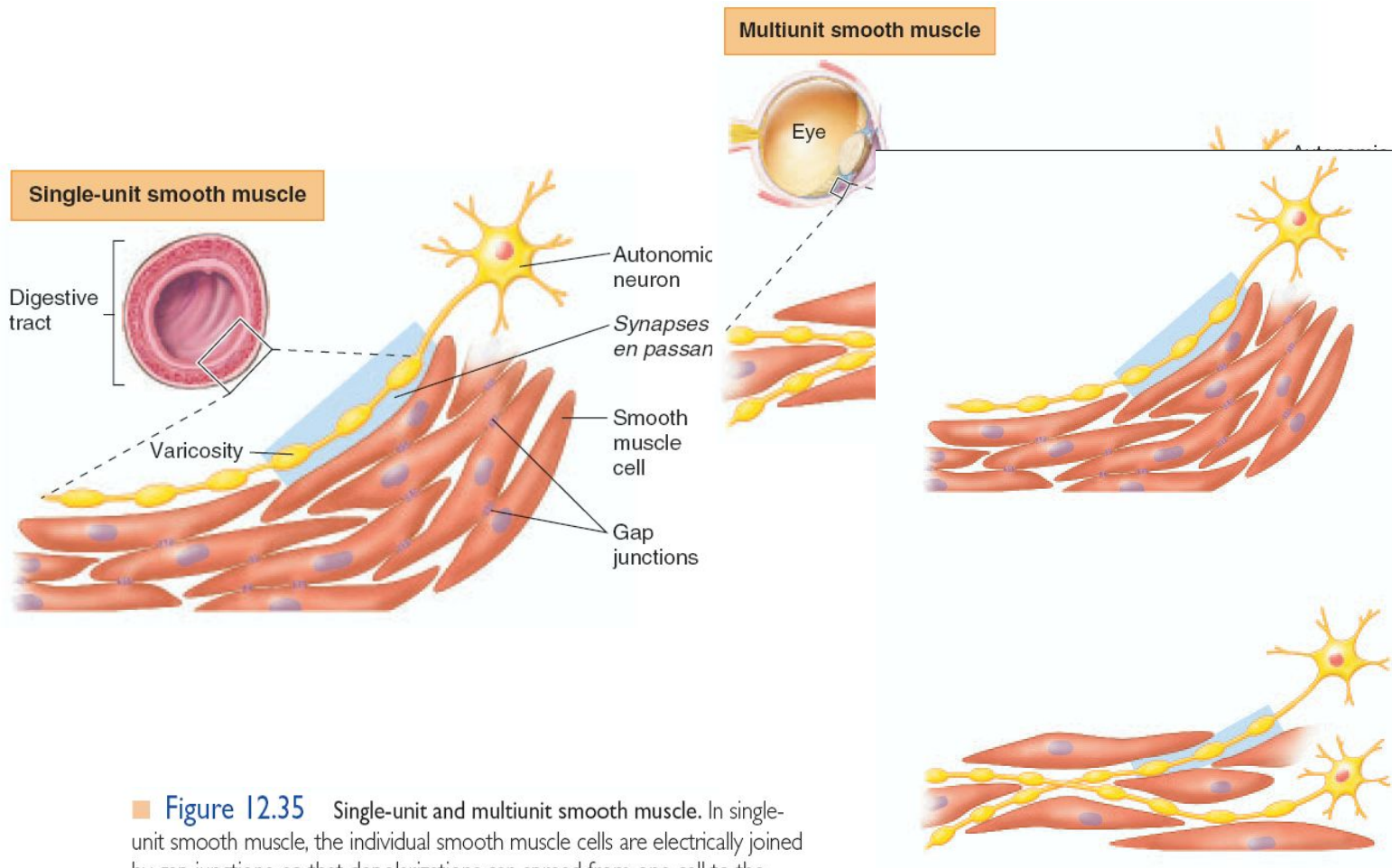
Metabolic Type	Fast Twitch		Slow Twitch
	Fast Glycolytic (White)	Fast Oxidative-Glycolytic (Red)	Slow Oxidative (Red)
<b>Metabolic properties</b>			
ATPase activity	High	High	Low
ATP source(s)	Anaerobic glycolysis	Anaerobic glycolysis/ Oxidative phosphorylation	Oxidative phosphorylation
Glycolytic enzyme content	High	Moderate	Low
Number of mitochondria	Low	High	High
Myoglobin content	Low	High	High
Glycogen content	High	Moderate	Low
Fatigue resistance	Low	Moderate	High
<b>Mechanical properties</b>			
Contraction speed	Fast	Fast	Slow
Force capability	High	Medium	Low
SR Ca <sup>2+</sup> -ATPase activity	High	High	Moderate
Motor axon velocity	100 m/sec	100 m/sec	85 m/sec
<b>Structural properties</b>			
Fiber diameter	Large	Moderate	Small
Number of capillaries	Few	Many	Many
<b>Functional role in body</b>	Rapid and powerful movements	Medium endurance	Postural/endurance
<b>Typical example</b>	Latissimus dorsi	Mixed-fiber muscle, such as vastus lateralis	Soleus



**FIGURE 9.15** The contractile system and cell-to-cell connections in smooth muscle. Note regions of association between thick and thin filaments that are anchored by the cytoplasmic and membrane-associated dense bodies. A network of intermediate filaments provides some spatial organization (see, especially, the left side). Several types of cell-to-cell mechanical connections are shown, including direct connections and connections to the extracellular connective tissue matrix. Structures are not necessarily drawn to scale. (See text for details.)

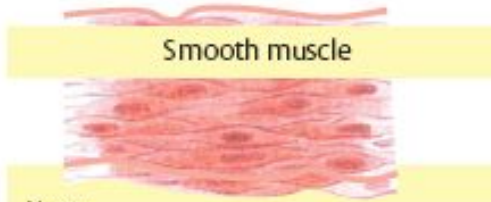


**FIGURE 9.16** Major routes of calcium entry and exit from the cytoplasm of smooth muscle. The ATPase reactions are energy-consuming ion pumps. The processes on the left side increase cytoplasmic calcium and promote contraction; those on the right decrease internal calcium and cause relaxation.  $\text{PIP}_2$ , phosphatidylinositol 4,5-bisphosphate;  $\text{IP}_3$ , inositol 1,4,5-trisphosphate; DAG, diacylglycerol.



■ **Figure 12.35** Single-unit and multiunit smooth muscle. In single-unit smooth muscle, the individual smooth muscle cells are electrically joined by gap junctions, so that depolarizations can spread from one cell to the next. In multiunit smooth muscle, each smooth muscle cell must be stimulated by an axon. The axons of autonomic neurons have varicosities, which release neurotransmitters, and which form *synapses en passant* with the smooth muscle cells.

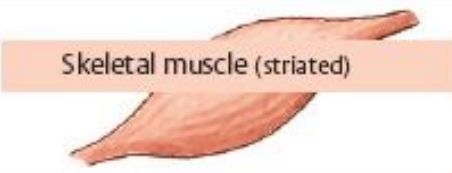
**Structure and function**



Smooth muscle



Cardiac muscle (striated)



Skeletal muscle (striated)

Motor end-plates
Fibers
Mitochondria
Nucleus per fiber
Sarcomeres
Electr. coupling
Sarcoplasmic reticulum
Ca <sup>2+</sup> "switch"
Pacemaker
Response to stimulus
Tetanic
Work range

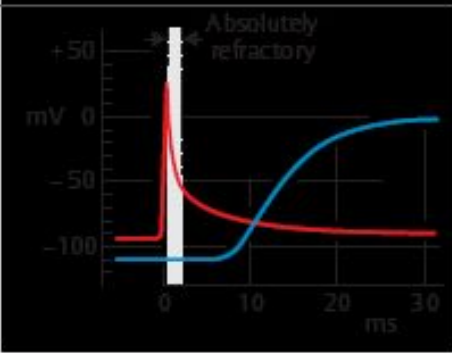
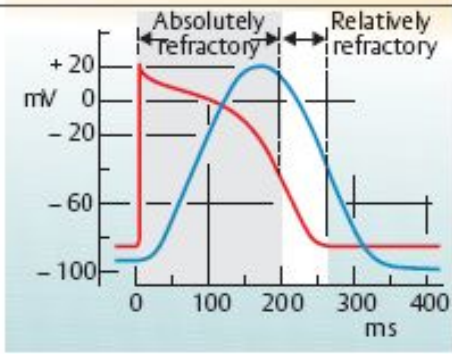
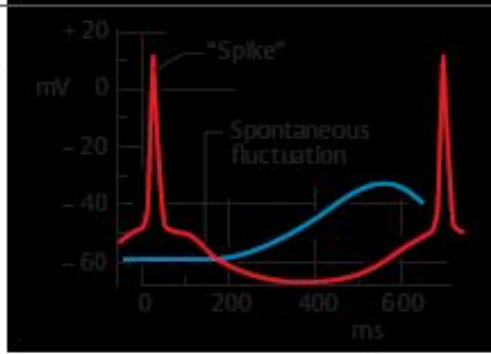
None
Fusiform, short ( $\leq 0.2$ mm)
Few
1
None
Some (single-unit type)
Little developed
Calmodulin/caldesmon Some spontaneous rhythmic activity ( $1s^{-1} - 1h^{-1}$ )
Change in tone or rhythm frequency
Yes
Length-force curve is variable

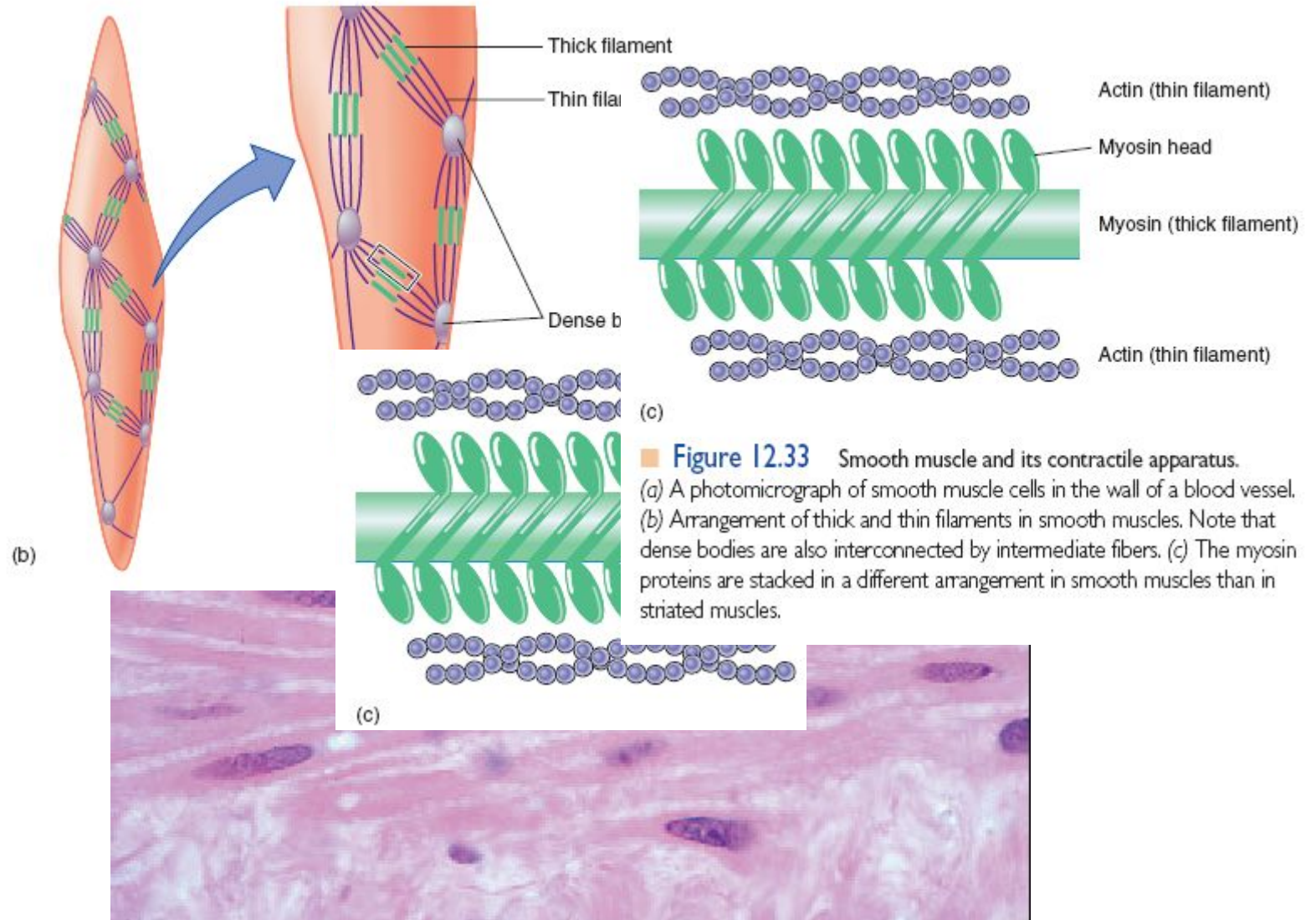
None
Branched
Many
1
Yes, length $\leq 2.6 \mu m$
Yes (functional syncytium)
Moderately developed
Troponin
Yes (sinus nodes ca. $1s^{-1}$ )
All or none
No
In rising length-force curve (see 2.15E)

Yes
Cylindrical, long ( $\leq 15$ cm)
Few (depending on muscle type)
Multiple
Yes, length $\leq 3.65 \mu m$
No
Highly developed
Troponin
No (requires nerve stimulus)
Graded
Yes
At peak of length-force curve (see 2.15E)

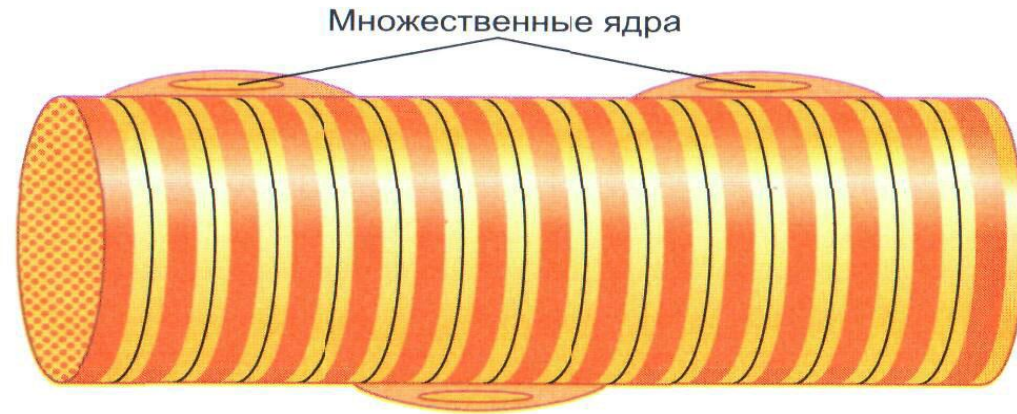
**Response to stimulus**

Potential —  
Muscle tension —

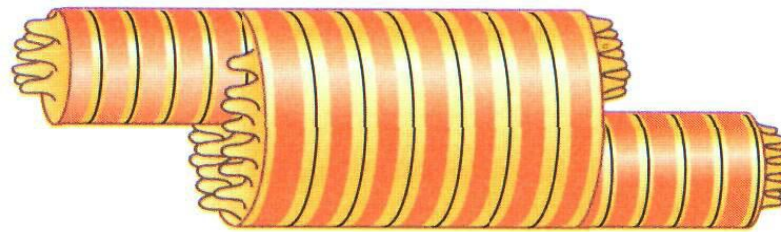




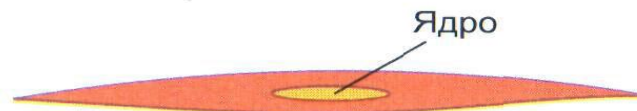
# Различные виды мышечной ткани



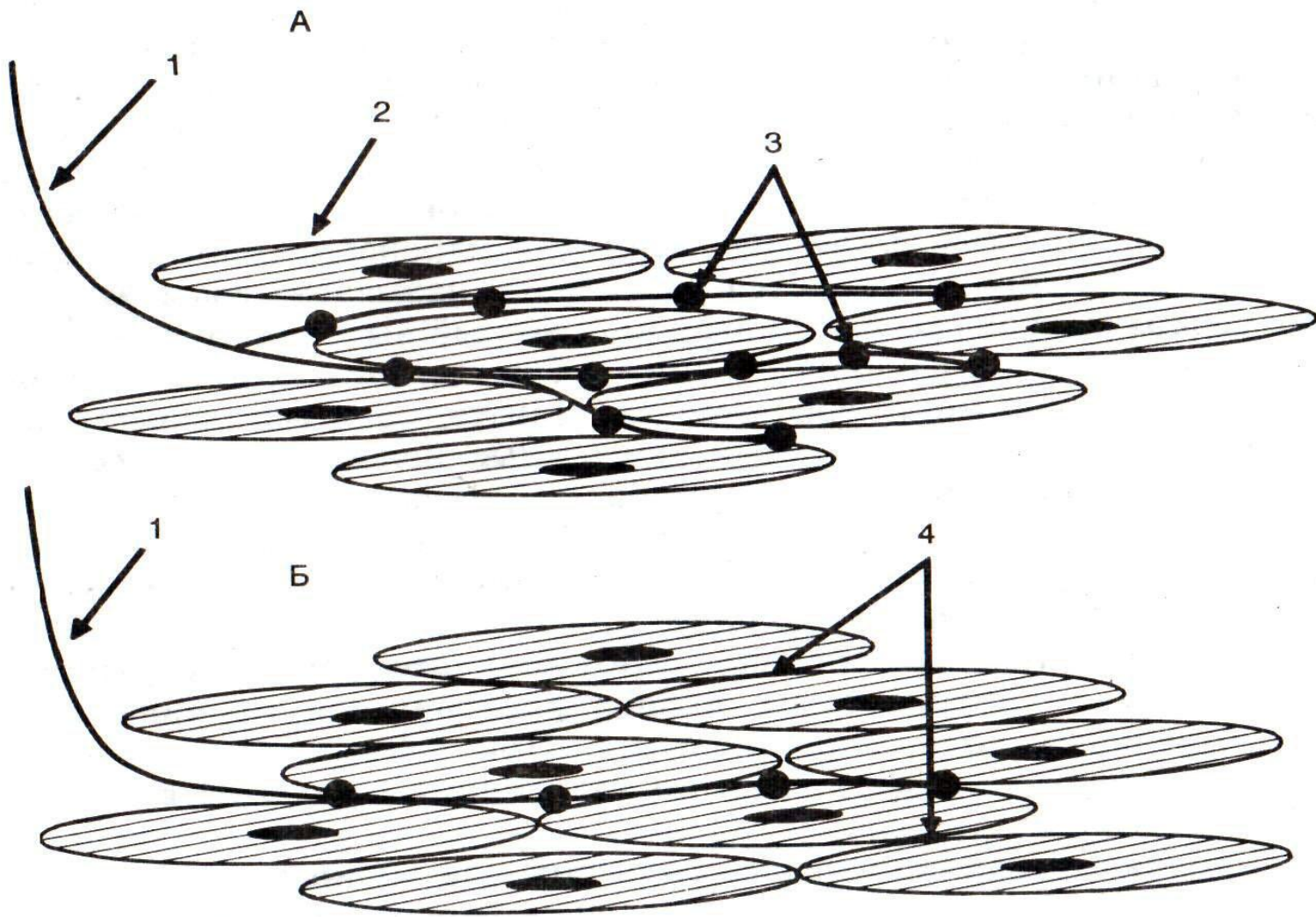
**Волокно скелетной мышцы**



**Клетка сердечной мышцы**



**Гладкая мышечная клетка**



**А – мультиунитарная гладкая мышца**

**Б- висцеральная гладкая мышца**

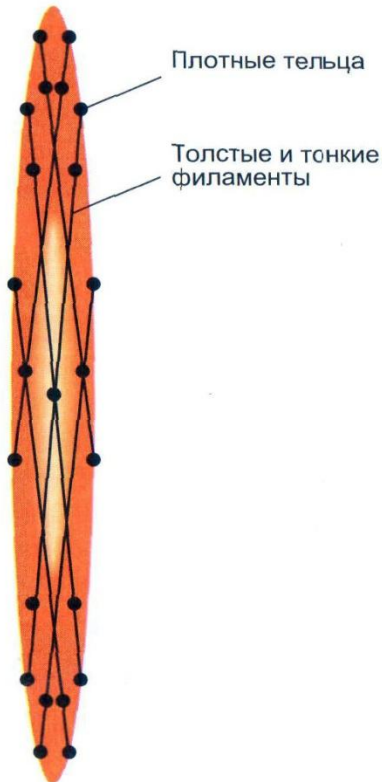
1 – вегетативное нервное волокно; 2 – гладкомышечная клетка; 3 – варикозы; 4 – плотные контакты (нексусы)



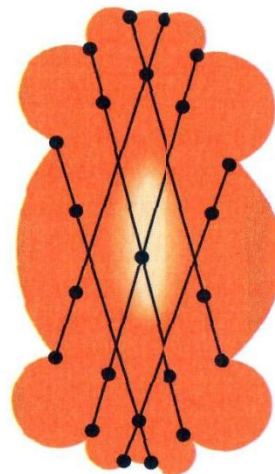
# Особенности сокращения гладкомышечных клеток

## Сокращение гладкомышечной клетки

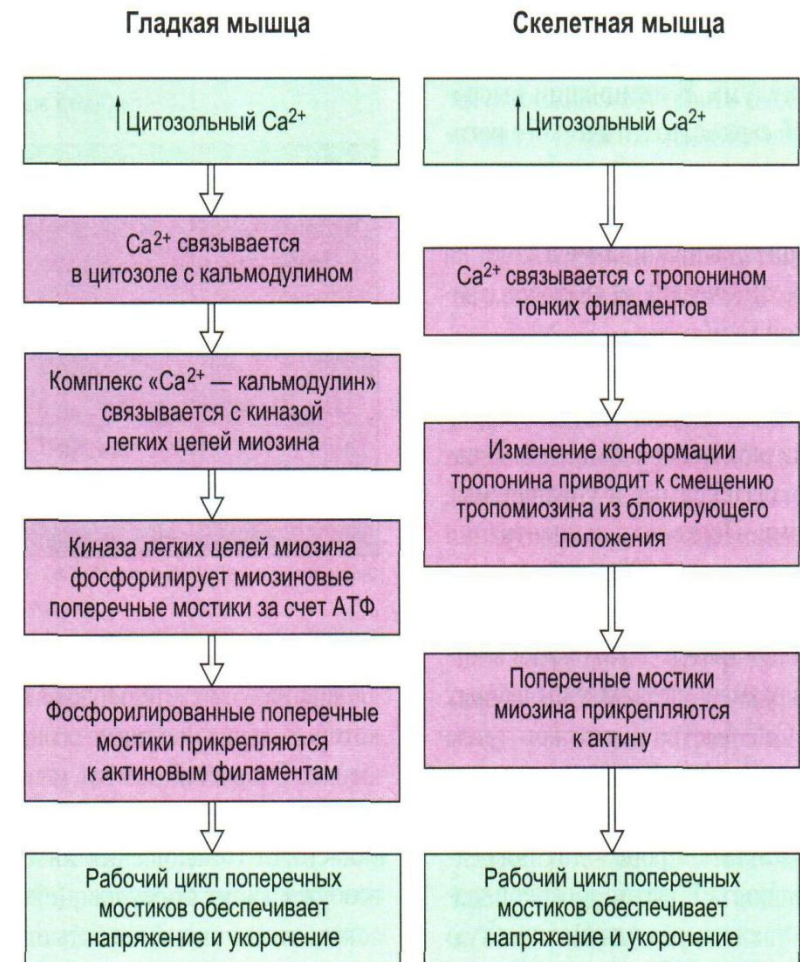
Расслабление



Сокращение



## Последовательность событий при сокращении гладкой и скелетной мышцы



# Свойства гладких мышц

- Функциональный синцитий
- Пластичность (тонус)
- Автоматия
- Электрическая активность
- Длительный латентный период
- Продолжительное сокращение
- Экономичность работы, низкая утомляемость
- Зависимость от физиологически активных веществ

# Свойства гладких мышц

- Функциональный синцитий
- Пластичность (тонус)
- Автоматия
- Электрическая активность
- Длительный латентный период
- Продолжительное сокращение
- Экономичность работы, низкая утомляемость
- Зависимость от физиологически активных веществ