

# БИОФИЗИКА МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

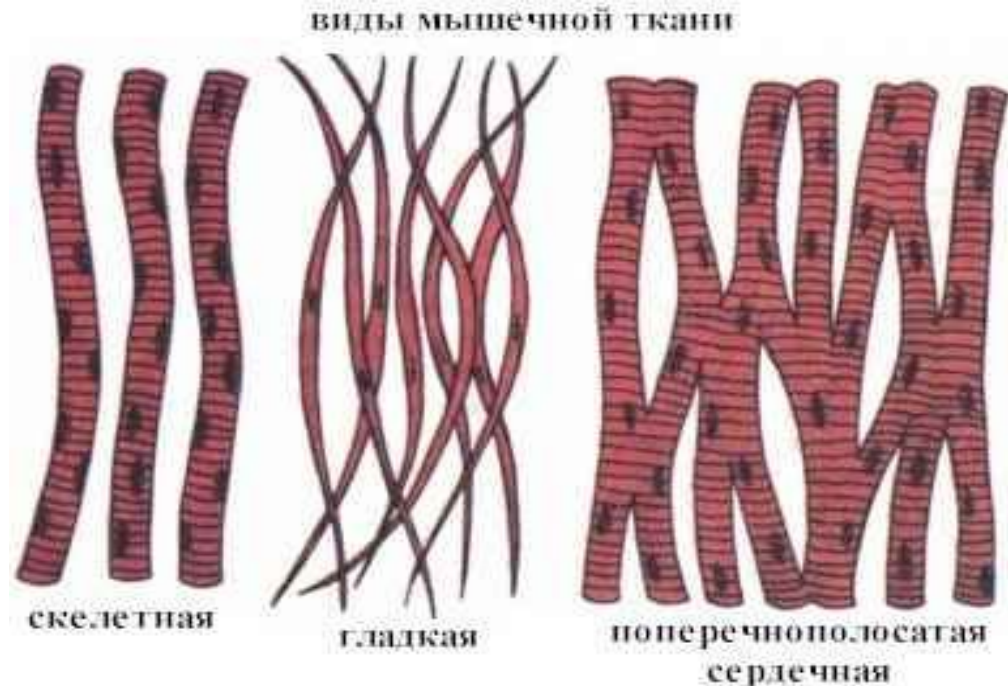


1. В каждой клетке организма на мембране существует разность потенциалов, которая называется мембранным потенциалом покоя. Он служит основой для возникновения потенциалов действия (ПД) в возбудимых тканях организма.

2. Возбудимыми являются нервная и мышечная ткани. При действии на них стимулов (раздражений) могут возникать распространяющиеся ПД. В нервной ткани с их помощью передаётся информация, которая необходима для управления и регуляции деятельности всех органов и тканей в организме. Клетки мышечной ткани при возникновении в их мембранах ПД сокращаются, тем самым осуществляя двигательную функцию отдельных органов и организма в целом.

3. Движение – одно из основных и общих свойств живого.

Различные типы мышц создают движения конечностей, всего тела или его частей (скелетные мышцы), внутренних органов и сосудов (гладкие мышцы), сердца (сердечная мышца).  
Основа движений – мышечное сокращение.



**ПД в мембранах мышечных клеток возникают под действием нервных импульсов, приходящих из ЦНС.**

**В вентральной части серого вещества спинного мозга находятся тела двигательных нейронов (мотонейронов). Их аксоны направляются к мышцам.**

**ПД от аксона передаётся через нервно-мышечный синапс (концевая пластинка) на мембрану мышечных клеток, где находятся лиганд-зависимые ионные каналы (медиатор – ацетилхолин).**

**Аксон и группа мышечных волокон, которые он иннервирует, составляют двигательную единицу.**

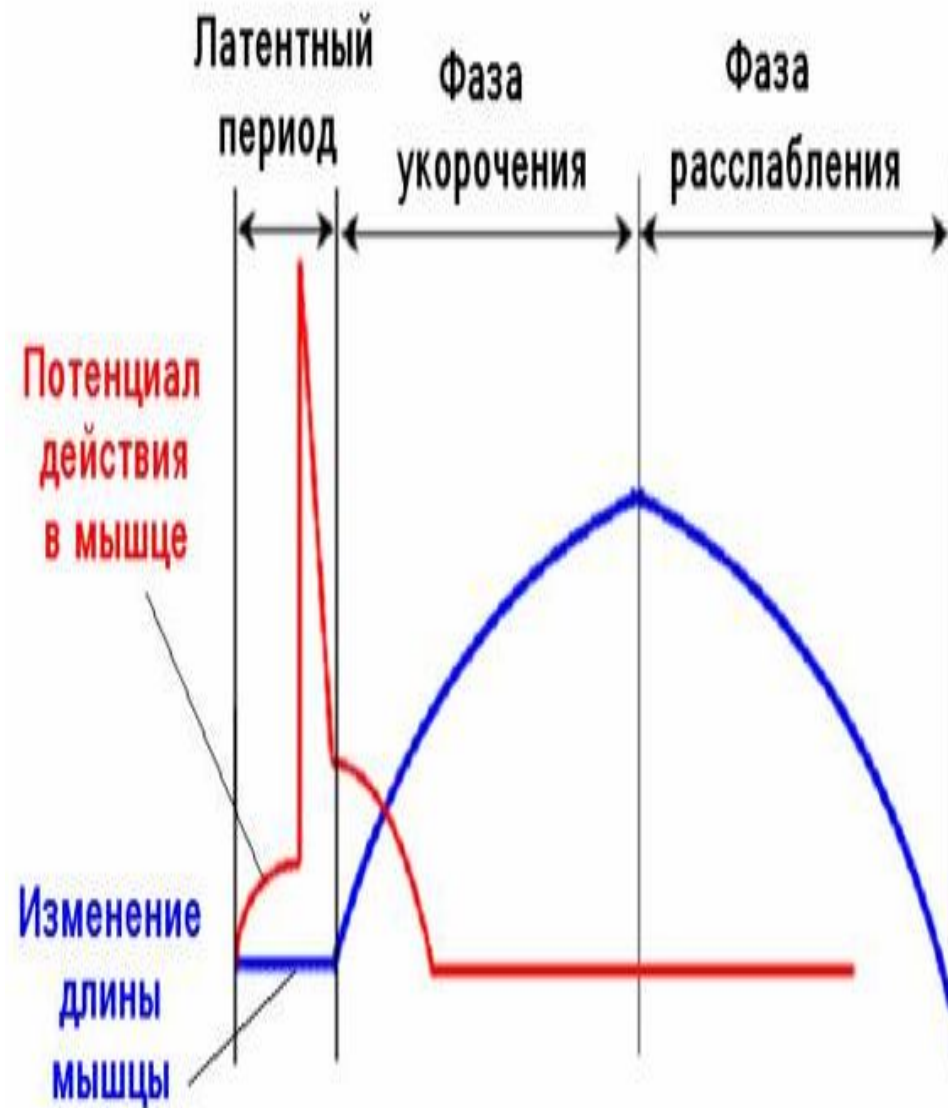
**Регуляция мышечного сокращения осуществляется путём изменения числа активных двигательных единиц и частоты приходящих из ЦНС нервных импульсов.**



**Мембранный потенциал покоя мышечного волокна составляет от - 80- до – 90 мВ.**

**ПД связан с увеличением проницаемости мембраны для ионов натрия, имеет амплитуду около 120-130 мВ, длительность 3-5 мс. ПД распространяется так же, как и в нервном волокне (за счёт местных токов), но с меньшей скоростью – 1-5 м/с.**

**Одиночный ПД вызывает одиночное мышечное сокращение, которое возникает фактически после окончания ПД (с латентным периодом 5-10 мс) и длится 200-300мс.**



**На рисунке показано изменение длины мышцы в процессе сокращения в ответ на одиночный ПД, если ничто не препятствует этому изменению длины (то есть концы мышцы не зафиксированы).**



# СТРУКТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СКЕЛЕТНОЙ МЫШЦЫ



**МЫШЦА**



**Мышечные пучки**



**Мышечные клетки (из-за своей формы и длины их называют волокнами)**



**Миофибриллы**



**Протофибриллы  
(актиновые и миозиновые микроволокна).**

**Мышца крепится через сухожилие к кости и, сокращаясь, приводит в движение кости скелета.**

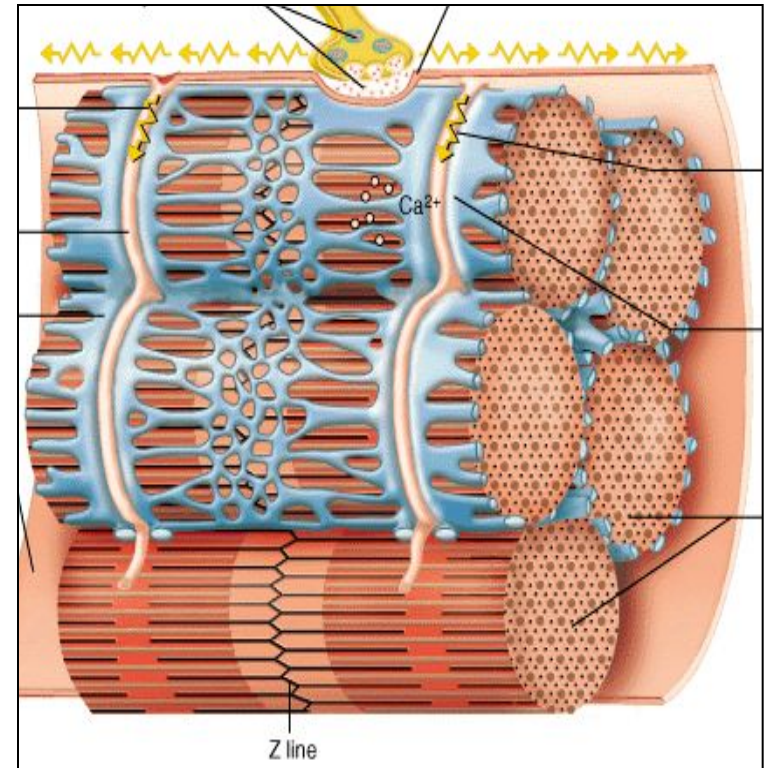
# ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ МЫШЕЧНОЙ КЛЕТКИ



**1. Представляет собой многоядерную клетку диаметром от 20 до 80 мкм и длиной от нескольких миллиметров до нескольких десятков сантиметров (соответственно длине мышцы).**

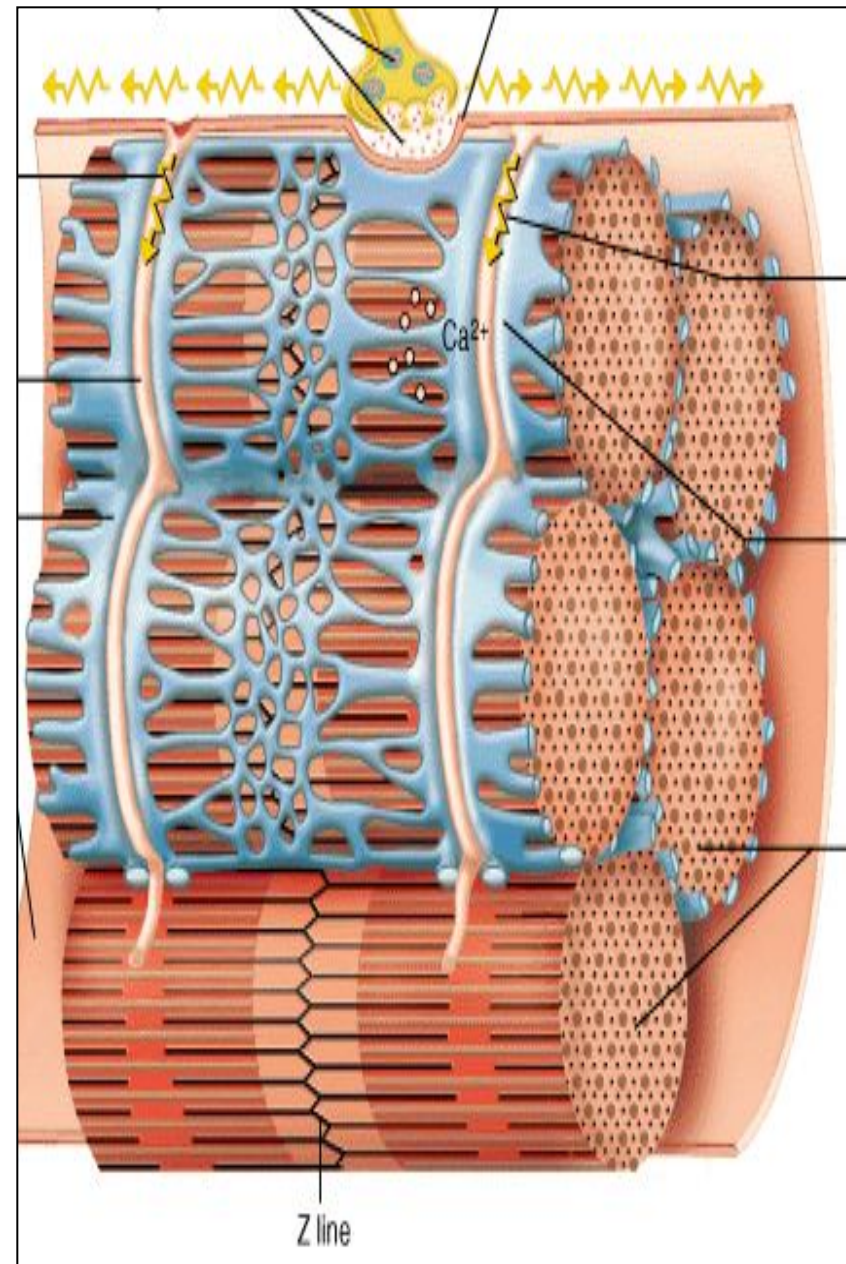
**2. Содержит большое количество митохондрий, обеспечивающих энергией мышечные сокращения.**

**3. Содержит около 2000 миофибрилл – специализированных функциональных ультраструктур, имеющих «поперечную исчерченность» вследствие упорядоченного расположения толстых (миозиновых) и тонких (актиновых) протофибрилл. На долю сократительных белков - актина и миозина- приходится 80% общего белка мышцы.**



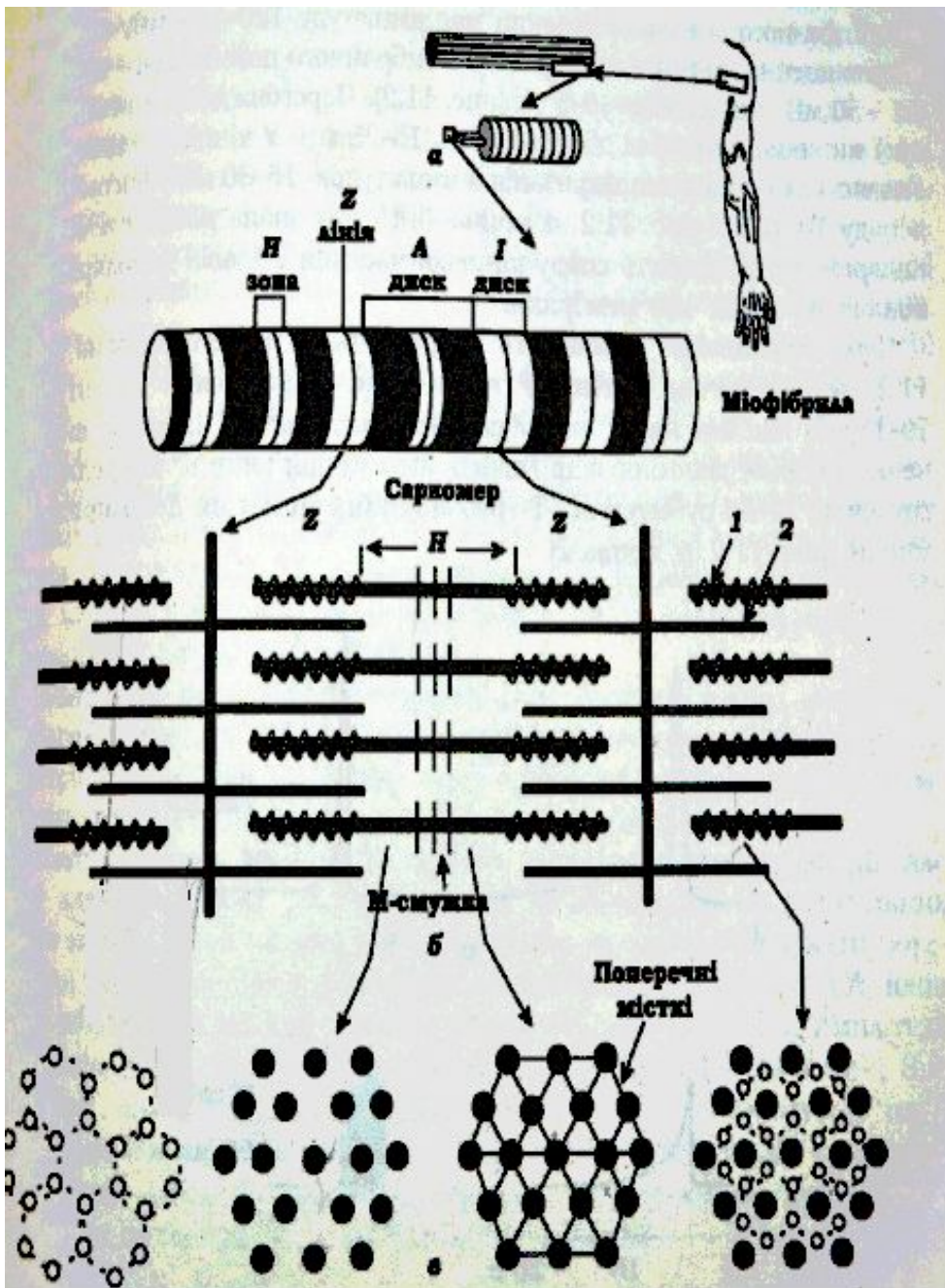
**3. Плазматическая мембрана (сарколемма) образует внутри волокна «впячивания» - трубочки Т-системы, которые пронизывают мышечную клетку, обеспечивая распространение возбуждения не только на поверхности, но и внутри мышечного волокна.**

**4. Имеет хорошо развитый эндоплазматический ретикулум (10-15% объёма мышечной клетки, а площадь которого в 100 раз больше, чем площадь сарколеммы). СПР является хранилищем (депо) ионов кальция. СПР имеет специфическое строение: в начале саркомера – терминальные цистерны, потом система продольных каналов, в центре саркомера – плоская цистерна («обруч» или «продырявленный воротничок»).**



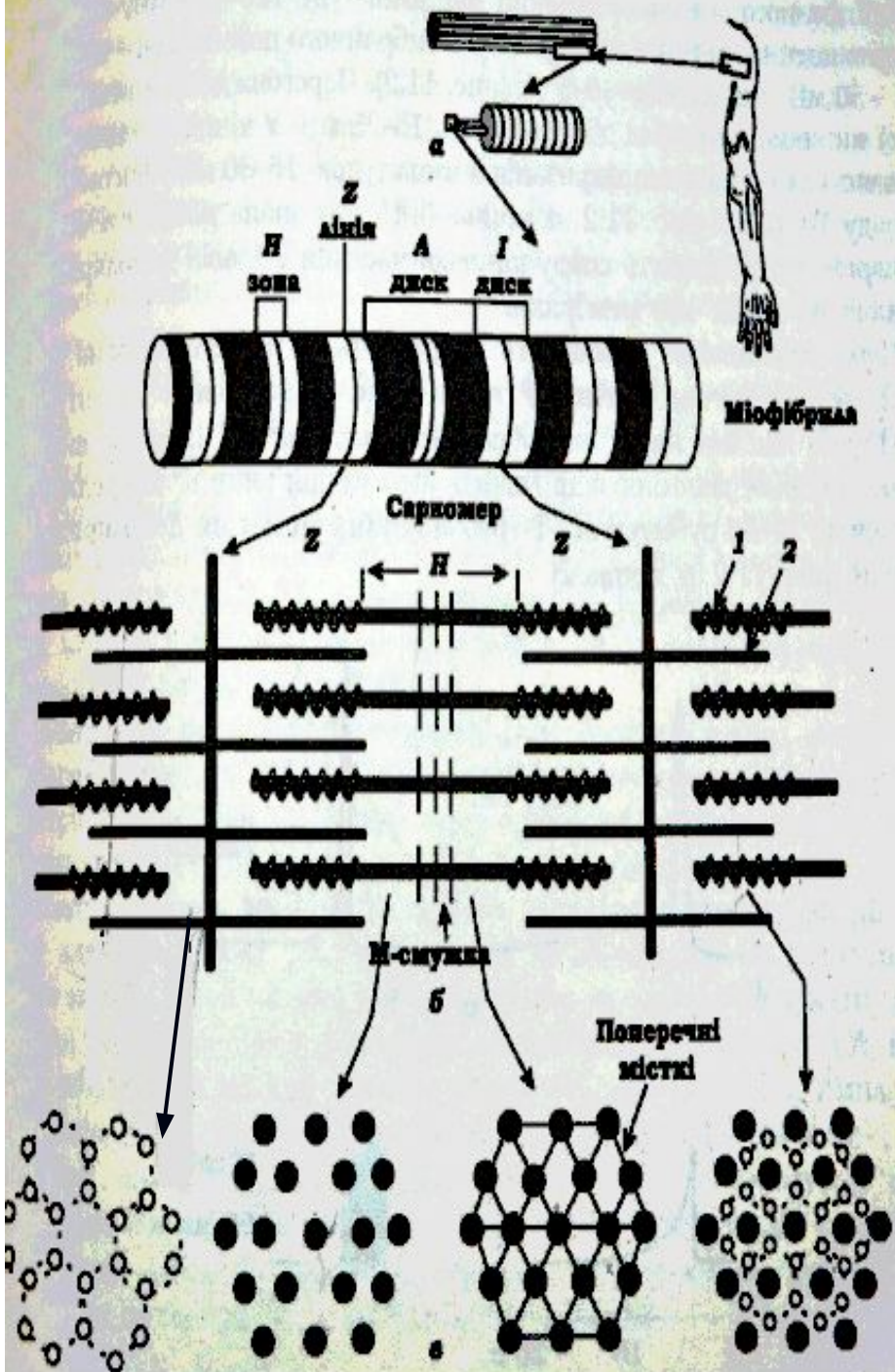


# СТРОЕНИЕ МИОФИБРИЛЛЫ и САРКОМЕРА



1. Каждая миофибрилла поделена Z-мембранами на саркомеры. Положение этих мембран одинаково во всех миофибриллах волокна.
2. Саркомер – это наименьшая сократительная единица миофибриллы, участок между двумя Z-мембранами. В покое его длина составляет 2-3 мкм.
3. К Z-мембранам прикреплены центральной частью тонкие актиновые протофибриллы. В центре саркомера лежат толстые миозиновые протофибриллы. Концы тонких и толстых протофибрилл в покое немного перекрываются.





**4. I-диск (изотропный) содержит только актиновые нити, A-диск (анизотропный) – актиновые и миозиновые. Н-зона – светлая часть А-диска – участок саркомера, где миозиновые волокна не имеют поперечных мостиков и в покое не перекрываются с актиновыми нитями. М-полоса (в центре) содержит сеть опорных белков.**

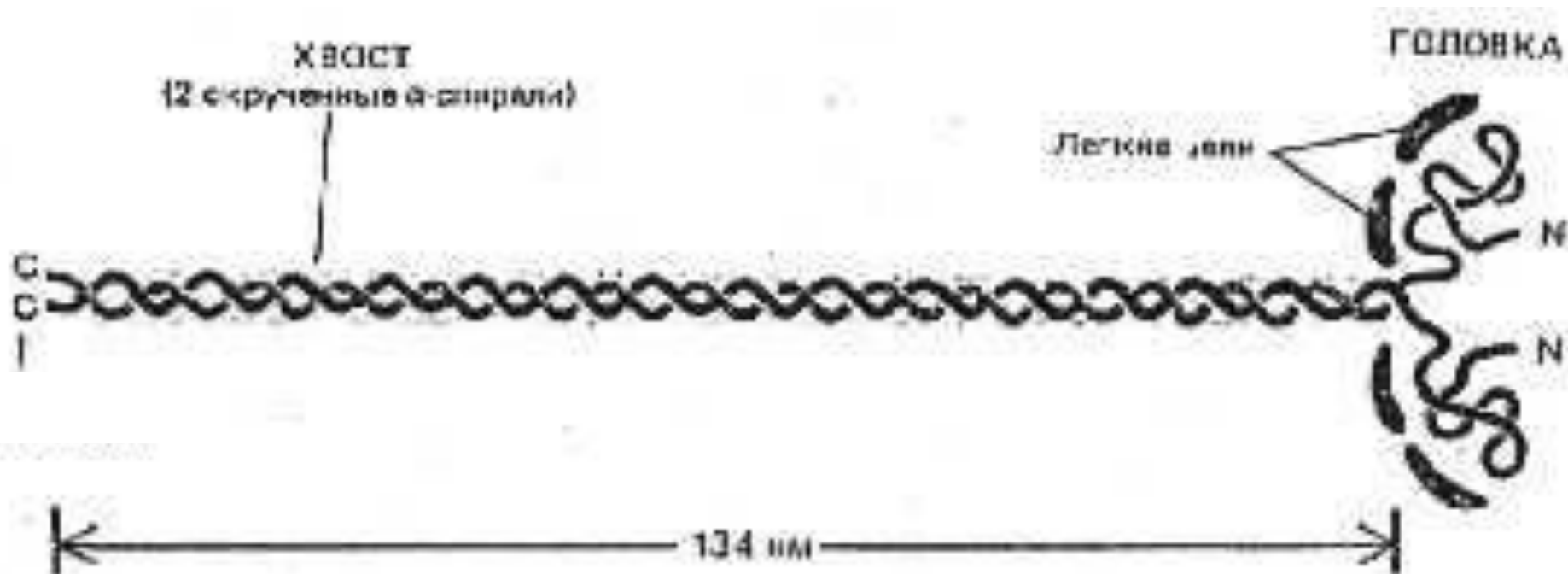
**5. В поперечном разрезе: актиновые нити (I-зона); миозиновые волокна (H-зона); миозиновые волокна, фиксированные М-мостиками (М-полоска); **каждое актиновое волокно окружено тремя миозиновыми, каждое миозиновое – шестью актиновыми (A-зона).****

# СТРОЕНИЕ МИОЗИНОВОЙ ПРОТОФИБРИЛЛЫ

1. Каждая миозиновая протофибрилла (миофиламент) состоит из 200 молекул миозина – белка с молекулярной массой, равной около 500000, которые удерживаются между собой электростатическими взаимодействиями.

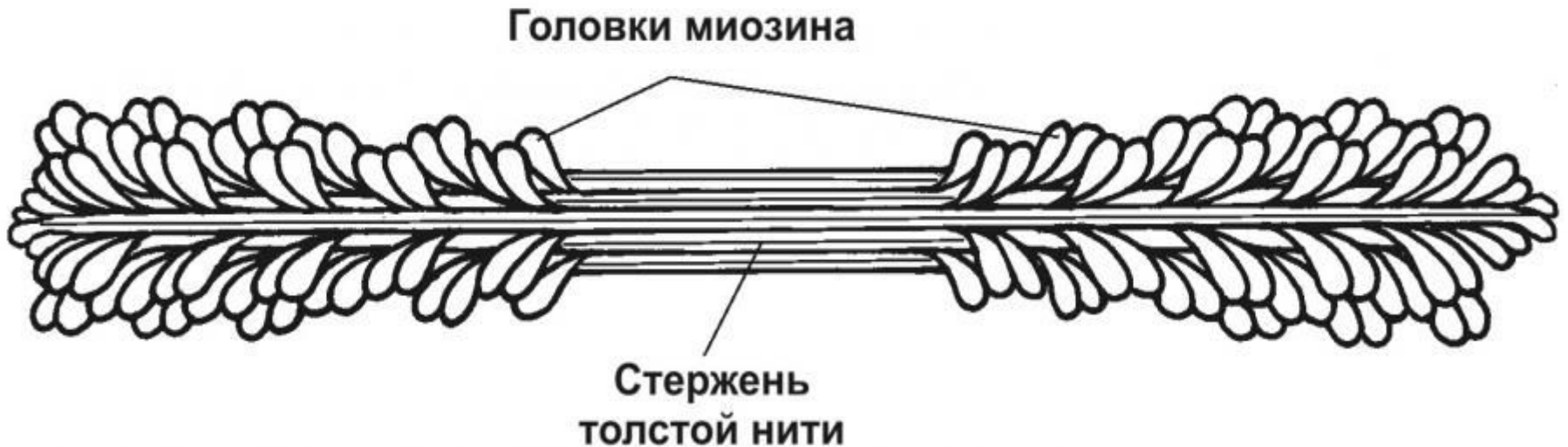
2. Миозин состоит из 6 полипептидных цепей – двух тяжёлых и четырех лёгких. Две тяжёлые цепи свёрнуты в спираль, а на конце молекулы - формируют две глобулярные головки. Головки имеют центр связывания АТФ и при взаимодействии с актином обладают АТФазной активностью.

Лёгкие цепи молекулы миозина входят в состав головок.



**3. Головки + часть спирали каждой молекулы формируют «поперечные мостики». В миозиновой протофибрилле, состоящей из 200 молекул миозина, поперечные мостики расположены по спирали на её поверхности.**

**4. В центре миозиновой протофибриллы молекулы миозина ориентированы друг к другу «хвостом к хвосту», в результате чего образуется «голая зона», не содержащая поперечных мостиков. На периферии молекулы миозина ориентированы «хвост к головке».**

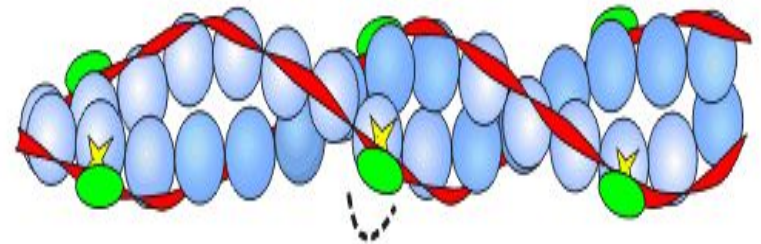




# СТРОЕНИЕ АКТИНОВОЙ ПРОТОФИБРИЛЛЫ

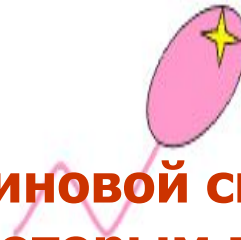
1. Каждая актиновая протофибрилла состоит из 2 молекул актина в F-форме (фибриллярной), свёрнутых вокруг друг друга в спираль. В свою очередь, каждая из молекул актина в F-форме состоит из множества молекул G-актина (глобулярного), имеющего молекулярную массу 42 000.

2. В состав актиновой протофибриллы также входят два регуляторных белка – фибриллярный белок тропомиозин и глобулярный белок тропонин. На 7 глобул G-актина приходится по 1 молекуле тропонина и тропомиозина.



3. Тропомиозин находится в желобке актиновой спирали, прикрывая собой «активные центры», к которым при инициации мышечного сокращения могут прикрепляться поперечные мостики миозиновой протофибриллы.

4. Молекула тропонина - сложный регуляторный комплекс, который может взаимодействовать с тропомиозином и обладает сродством к ионам кальция (4 центра связывания).

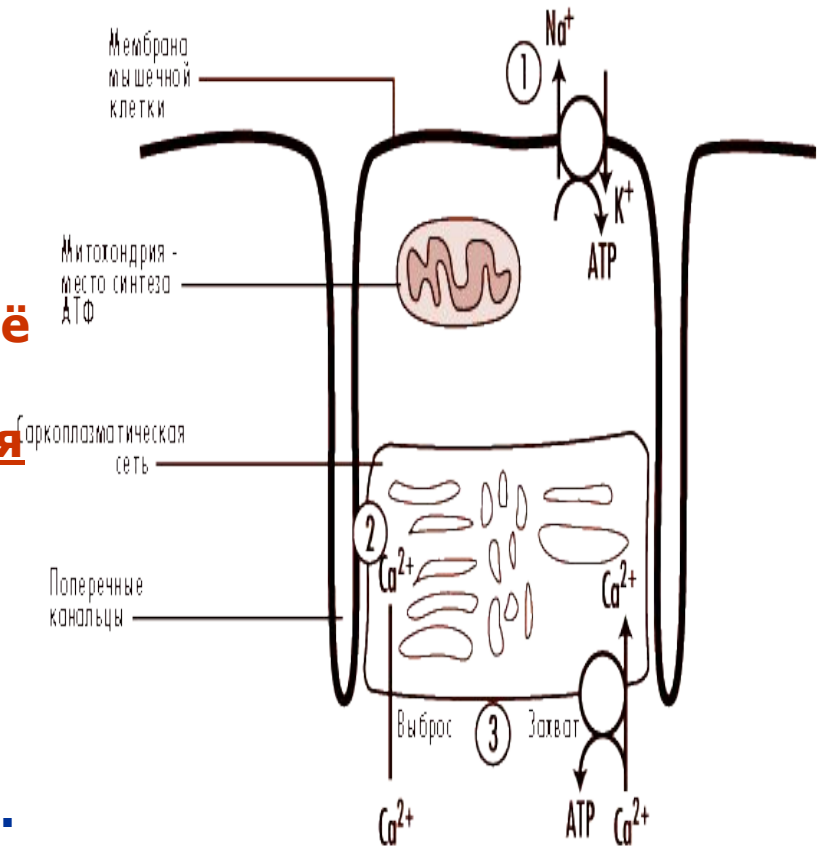


# МЕХАНИЗМ МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

1. Потенциал действия от мотонейрона поступает через аксон к мышечному волокну, передаётся через концевую пластинку на мембрану мышечной клетки (сарколему).

2. Возникает деполяризация сарколемы. Её механизм такой же, как и в нервном волокне – результат резкого увеличения проницаемости мембраны для ионов натрия.

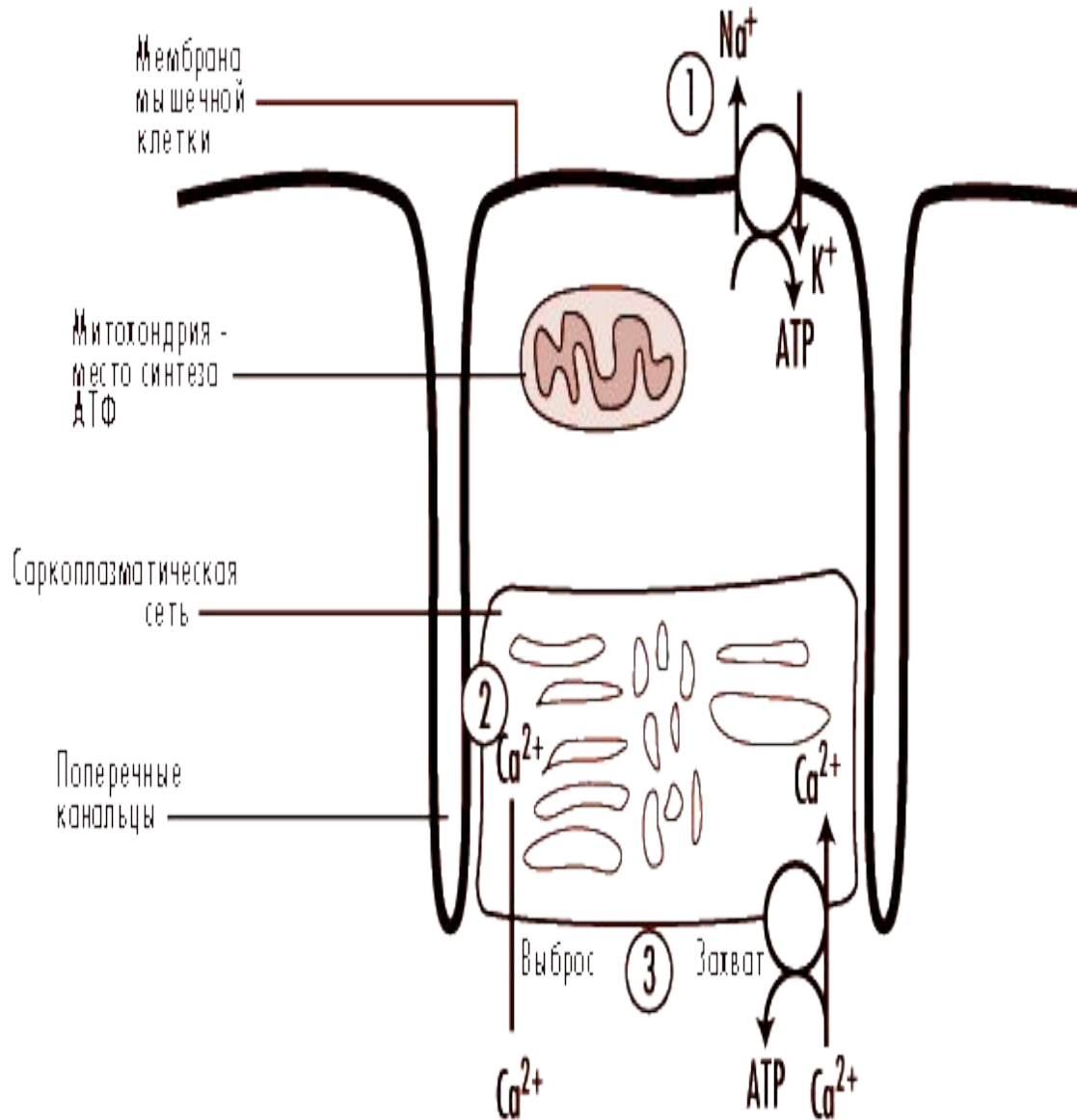
3. По Т-системе деполяризация распространяется вглубь волокна и передаётся на мембрану саркоплазматического ретикулума, СПР.



4. Из мембраны СПР через потенциалзависимые кальциевые каналы в саркоплазму освобождаются ионы кальция. Они инициируют взаимодействие между актиновыми и миозиновыми протофибриллами, что вызывает сокращение мышечной клетки.

5. Ионы кальция откачиваются кальциевым насосом внутрь саркоплазматического ретикулума, в результате чего мышечная клетка расслабляется.

# СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СВЯЗИ



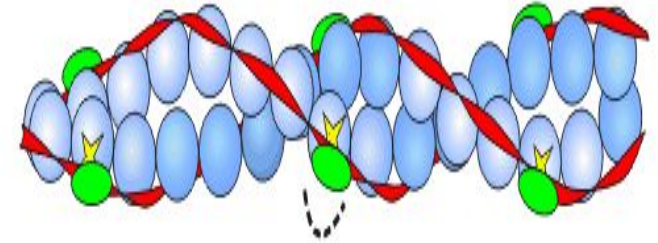
1. Плазматическая мембрана (сарколемма)
2. Т-система
3. Саркоплазматический ретикулум
4. Регуляторные белки актиновой протофибриллы (тропонин и тропомизин). Их роль - обеспечение взаимодействия между миозиновыми и актиновыми протофибриллами.



# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МИОЗИНА И АКТИНА В ПРОЦЕССЕ МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

**1. Ионы кальция связываются с центрами своего связывания (их 4: 2 с большим сродством и 2 с малым) в молекуле тропонина. В результате он меняет конформацию и способствует смещению молекул тропомиозина так, что активные центры в спирали актиновой протофибриллы оказываются открытыми и к ним могут прикрепляться поперечные мостики миозина.**

**Классическая гипотеза изменения конформации тропонин-тропомиозинового комплекса способствуют «вталкиванию» тропомиозина в желобок спирали актиновой**

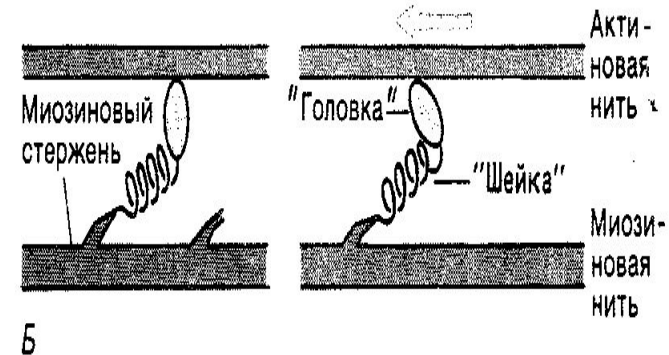
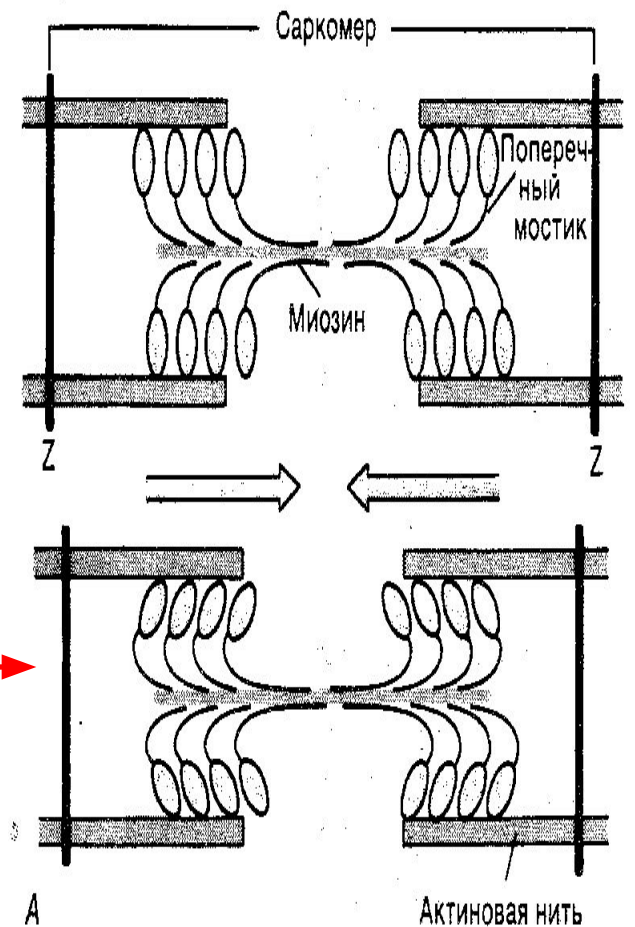


Также возможно, что меняется конформация всей актиновой протофибриллы (то есть она реагирует целиком на связывание тропонина с кальцием).

**Важен результат – открытие активных центров актинового волокна.**

2. К активному центру актиновой протофибриллы присоединяется головка поперечного мостика молекулы миозина под углом 90 градусов.

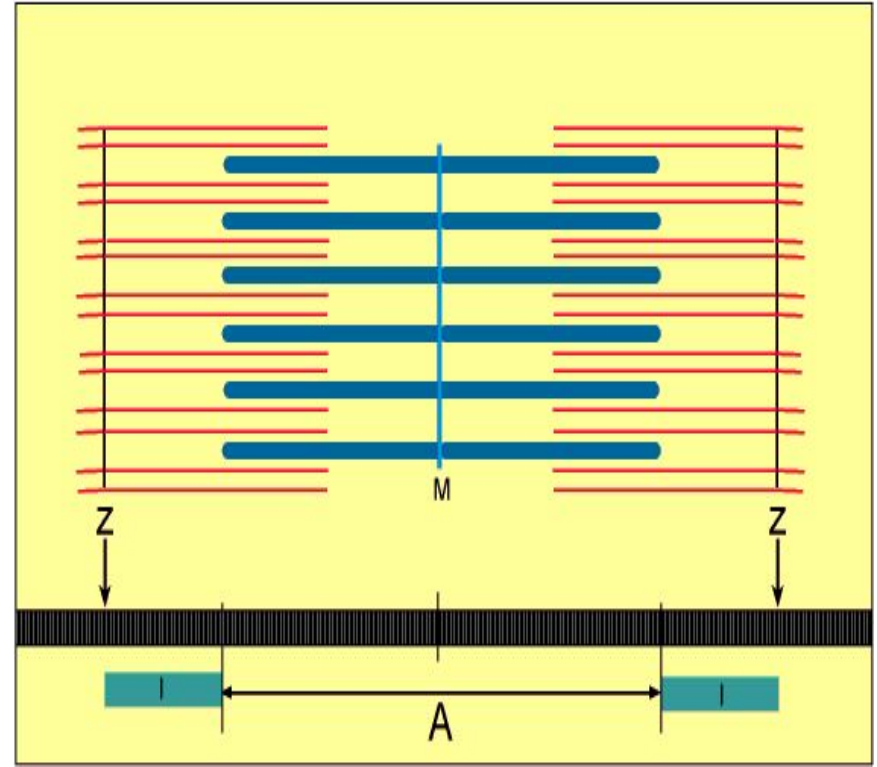
3. В присутствии актина головка миозина проявляет АТФазную активность. Головка при этом образует комплекс с появившимися АДФ и остатком фосфорной кислоты. Этот комплекс содержит большое количество энергии, в результате чего он стремится перейти в состояние с меньшей энергией. Это осуществляется путём конформационного поворота головки в положение прикрепления её - 45 градусов. Это создаёт тянущую силу, которая смещает актиновую протофибриллу к центру саркомера, после чего головка поперечного мостика отсоединяется от актиновой нити. Этот процесс повторяется, пока в саркоплазме находятся ионы кальция.



# МОДЕЛЬ СКОЛЬЗЯЩИХ НИТЕЙ (ХАКСЛИ)

1. В результате циклической работы поперечных мостиков (1 «шаг» : присоединение - изменение конформации – отсоединение) актиновые протофибриллы скользят по миозиновым к центру саркомера, что приводит к его укорочению (сокращению).

2. Степень укорочения саркомера зависит от числа активных поперечных мостиков, что определяется концентрацией ионов кальция в саркоплазме.



3. Длина миозиновых и актиновых протофибрилл при сокращении не меняется – актиновые протофибриллы «втягиваются» между миозиновыми. Z-мембраны подтягиваются друг к другу. При этом уменьшается ширина I- и H-диска, а ширина A-диска саркомера не изменяется.



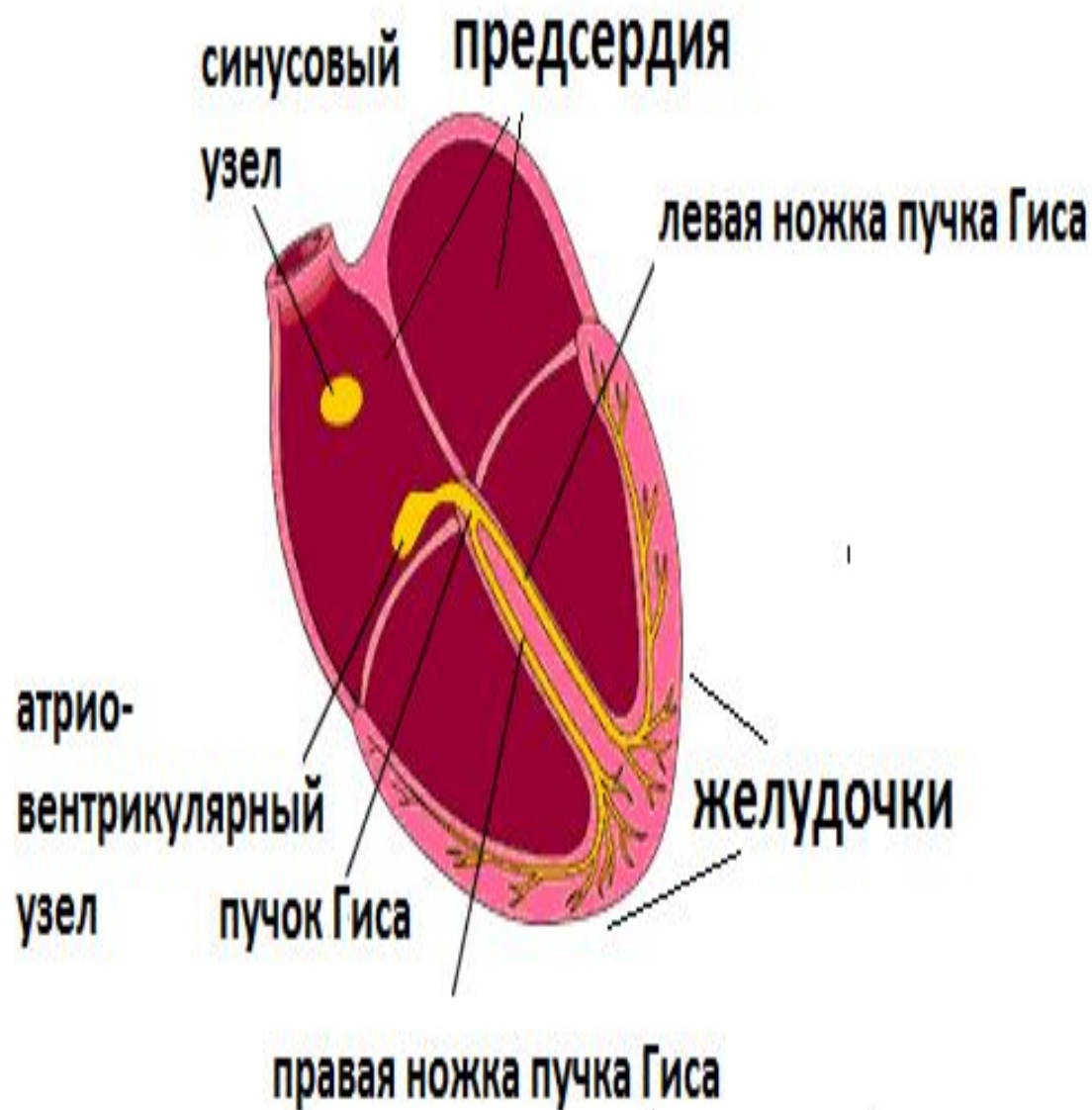
# СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ (МИОКАРДА)



**Сердце образовано несколькими типами клеток, которые различаются по структуре и функциям:**

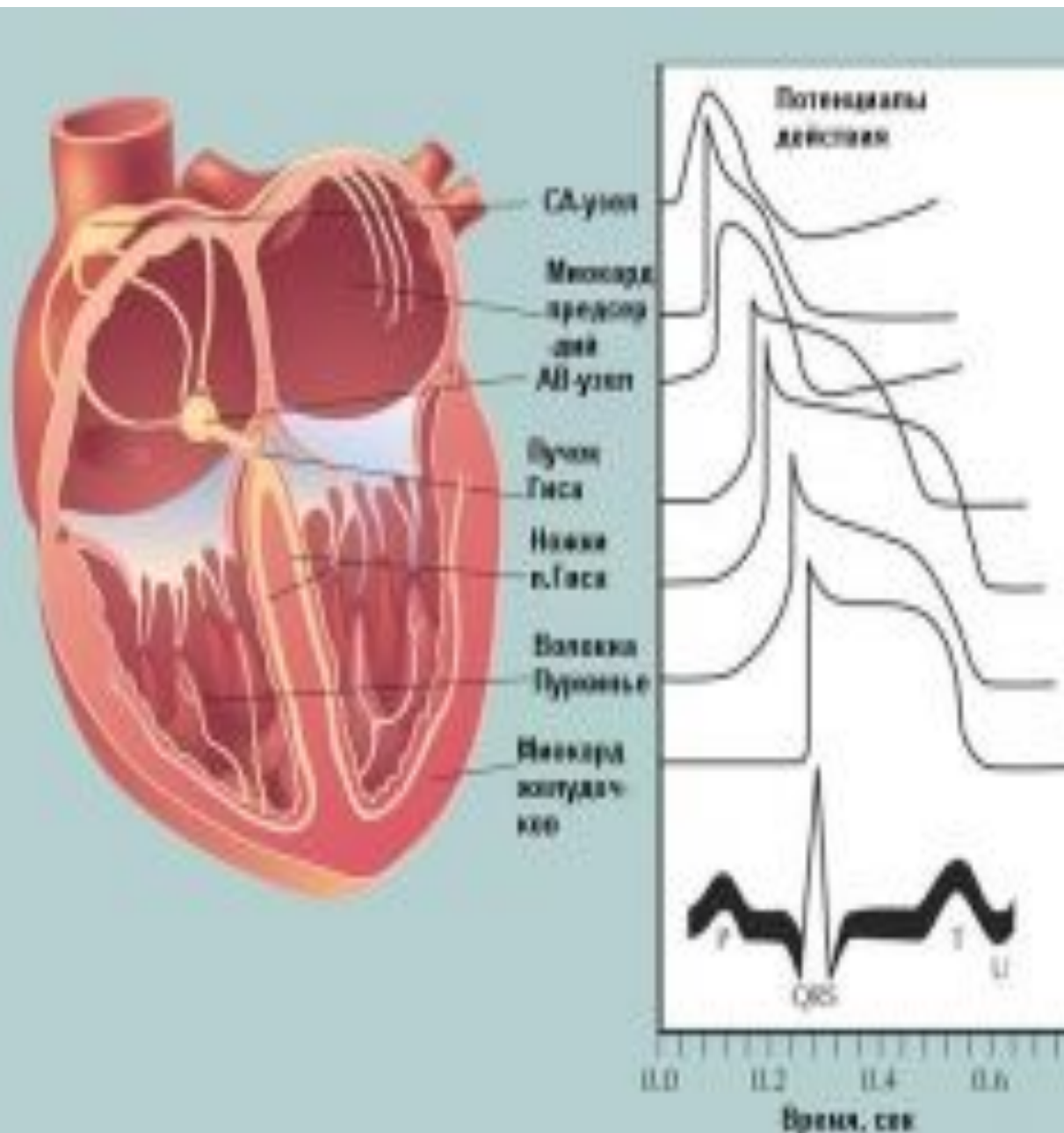
- **клетки предсердного и предсердно-желудочкового узлов.** Их роль – автоматически генерировать потенциалы действия. В норме это происходит в синусовом узле.
- **волокна проводящей системы** обеспечивают распространение возбуждения у рабочему миокарду.
- **мышечные клетки предсердий и желудочков** сокращаются после распространения возбуждения по их мембранам, обеспечивая сердечные сокращения и насосную функцию сердца в целом .

# РАСПРОСТРАНЕНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ В СЕРДЦЕ



1. Возбуждение генерируется автоматически в синусовом узле правого предсердия.
2. Постепенно охватывает рабочий миокард предсердий.
3. Передаётся к атрио-вентрикулярному (предсердно-желудочковому) узлу.
4. После короткой атрио-вентрикулярной задержки по ножкам пучка Гиса, которые заканчиваются волокнами Пуркинье охватывает рабочий миокард желудочков.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИОКАРДА

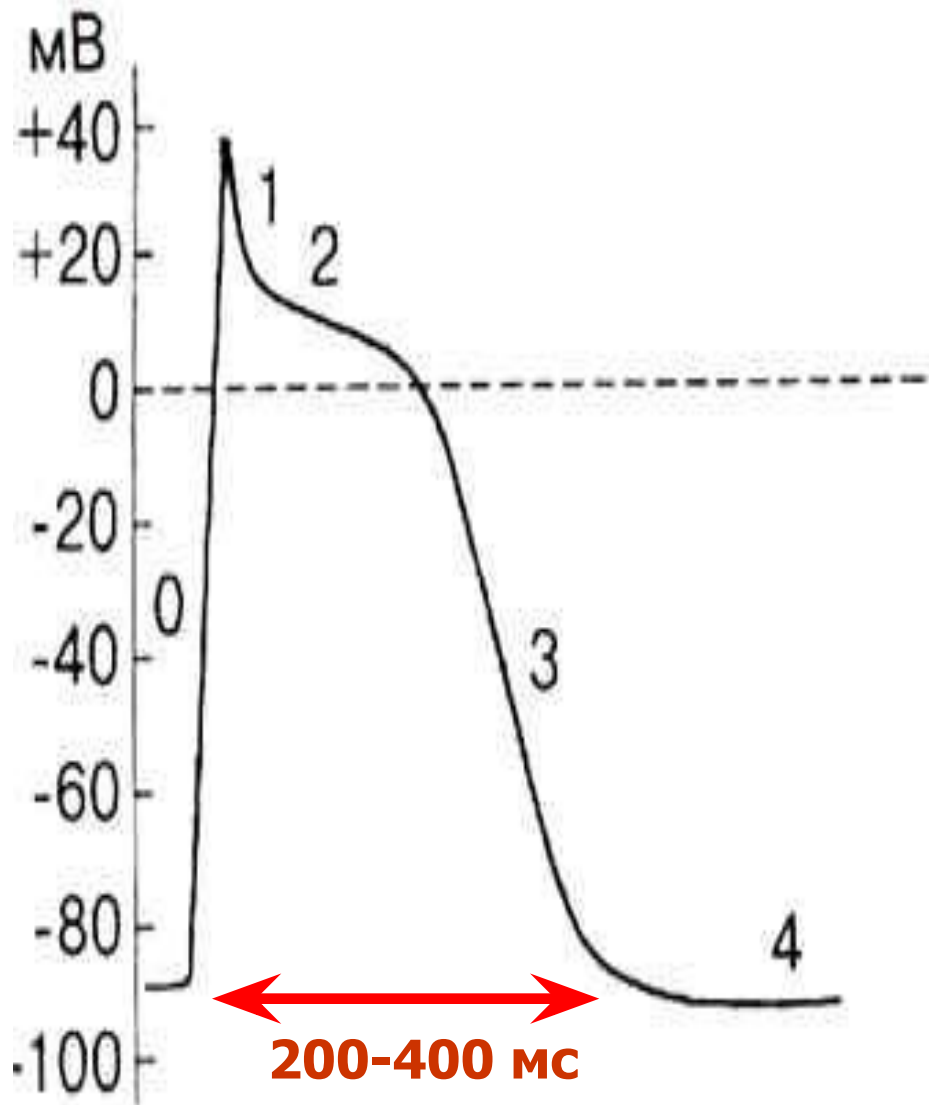


Сердце представляет собой электрический синцитий.

Во всех типах клеток сердца последовательно возникают потенциалы действия – различной формы и амплитуды в зависимости от того, какой клетке принадлежат.

Типичным считается – потенциал действия волокон Пуркинье.





**0 – фаза деполяризации**  
(входящий ток натрия)

**1 – быстрая**  
**реполяризация**  
(выходящий ток калия)

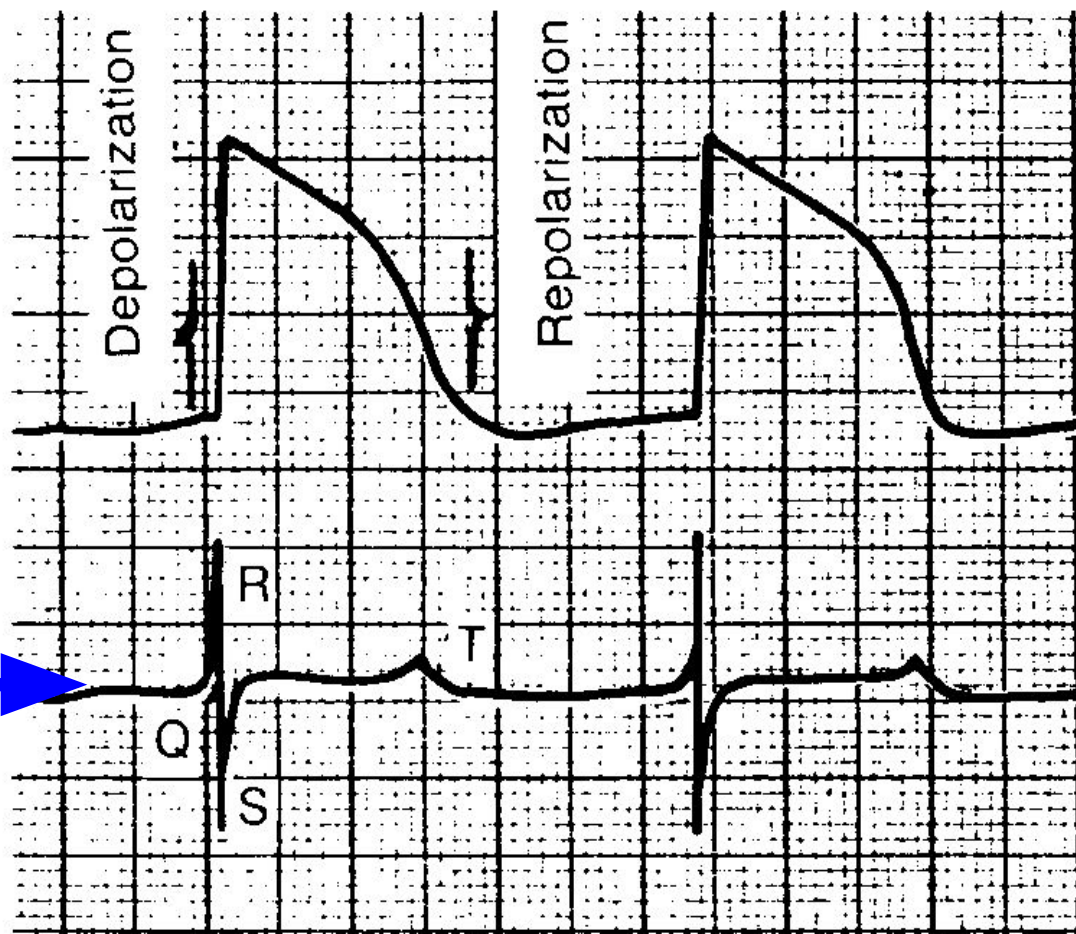
**2- плато, медленная**  
**реполяризация**  
(входящий ток кальция)

**3 – конечная быстрая**  
**реполяризация**  
(выходящий ток калия)

**Скорость**  
**деполяризации**  
**больше, чем скорость**  
**реполяризации**

**ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЯ (ЭКГ) – метод функциональной диагностики состояния сердца, основанный на регистрации с поверхности тела изменений электрического поля, которые возникают при распространении возбуждения в сердечной мышце.**

Потенциал действия кардиомиоцита →

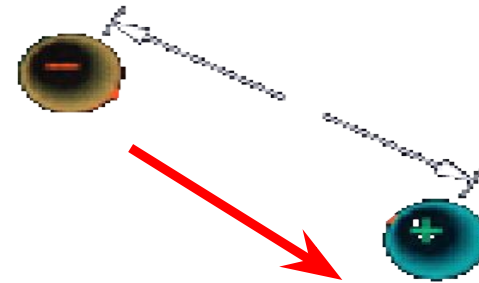
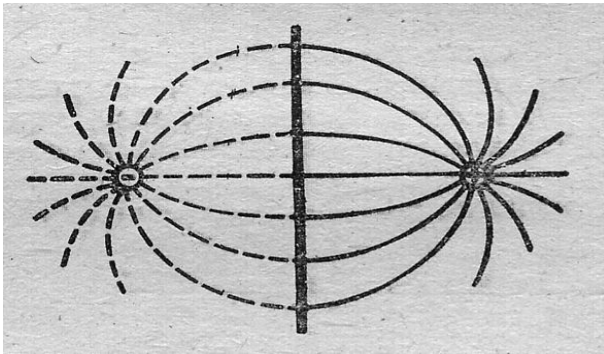


Электрокардиограмма →

**В основе ЭКГ - понятия электрического поля и дипольная теория.**

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ. ДИПОЛЬНЫЙ МОМЕНТ

**ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ** - это система, состоящая из двух равных по величине, но противоположных по знаку зарядов, расположенных на малом расстоянии друг от друга, которое называется плечом диполя.



**Дипольный момент** – основная характеристика диполя, вектор, направленный от отрицательного заряда к положительному и равный произведению заряда на плечо диполя.

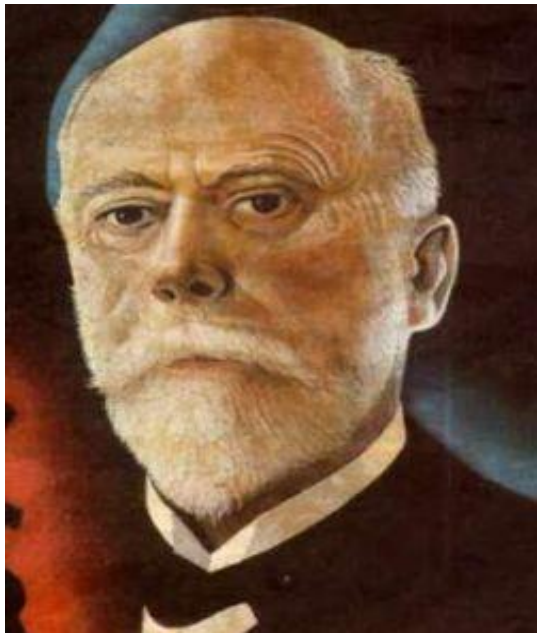
$$\vec{P} = q\vec{l} \quad [Кл \cdot м]$$

Потенциал электрического поля диполя:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{p \cdot \cos\alpha}{r^2}$$

**Токовый диполь** – система, состоящая из истока тока (+ полюса, например, источника питания) и стока тока (- полюса).

В сердце + (исток тока) – невозбуждённая часть, - (сток тока) возбуждённая.



# ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЯ

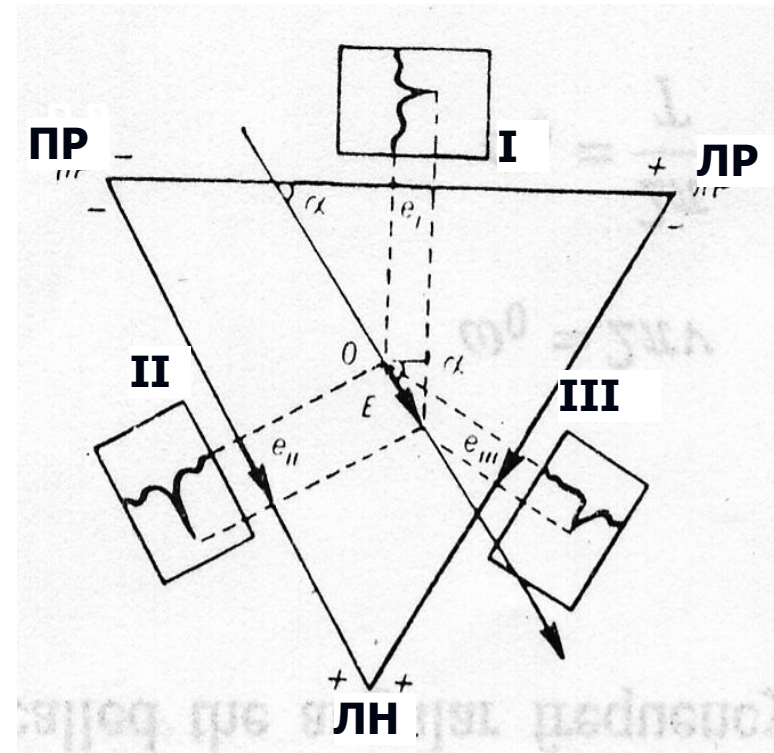
Позволяет регистрировать электрическое поле, которое создаёт сердце в ходе возбуждения путём наложения на поверхность тела электродов.

Первый электрокардиограф после 7 лет упорных трудов создал на основе струнного гальванометра голландский физиолог **Виллем Эйнтховен**.

Первый электрокардиограф весил около 270 кг. Его обслуживанием были заняты пять сотрудников.

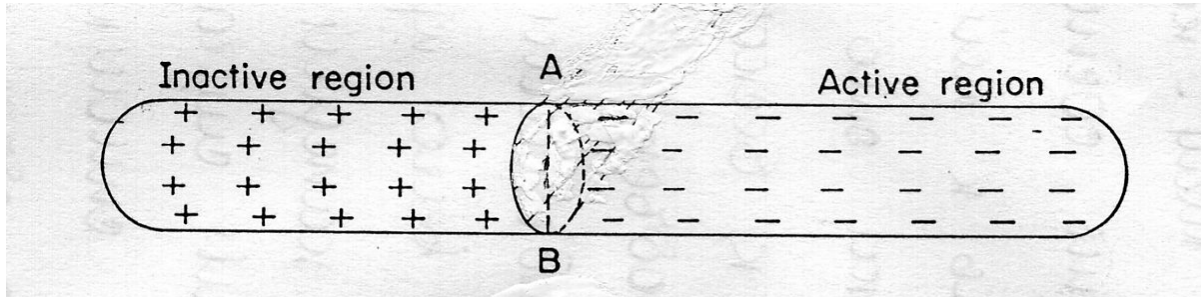
## ТЕОРИЯ ЭЙНТХОВЕНА

1. Эйнтховен предложил располагать электроды на руках и ногах, и, считая их проводниками электрического тока, допустил, что разность потенциалов измеряется между равноудалёнными от сердца точками, образующими **равносторонний треугольник**.
2. Ввёл понятие **отведения** – точки, между которыми измеряется разность потенциалов.





3. Предложил **три стандартных отведения**:
- между левой и правой рукой (I отведение)
  - между правой рукой и левой ногой (II отведение)
  - между левой рукой и левой ногой (III отведение).
4. Каждая клетка сердца в процессе распространения деполяризации и реполяризации представляет собой **элементарный диполь**, обладающий элементарным дипольным моментом.



4. В любой момент времени векторы элементарных дипольных моментов клеток сердца складываются, образуя **вектор интегрального дипольного момента сердца**.
5. Сделав допущение, что все ткани вокруг сердца обладают одинаковой электропроводностью, показал, что **разность потенциалов в отведениях в любой момент времени представляет собой проекцию вектора интегрального дипольного момента сердца на ось отведения**:

$$\Delta\varphi = p \cdot \cos\alpha$$

4. Величина и направление интегрального дипольного момента сердца изменяются в течение сердечного цикла. Поэтому регистрируется сложная кривая.

# ФОРМА ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ

**ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММА** – кривая, отражающая изменение электрического поля сердца в ходе цикла сердечного возбуждения.

**ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММА** – комплекс изолиний и отклонений от изолинии, которые называются зубцами.

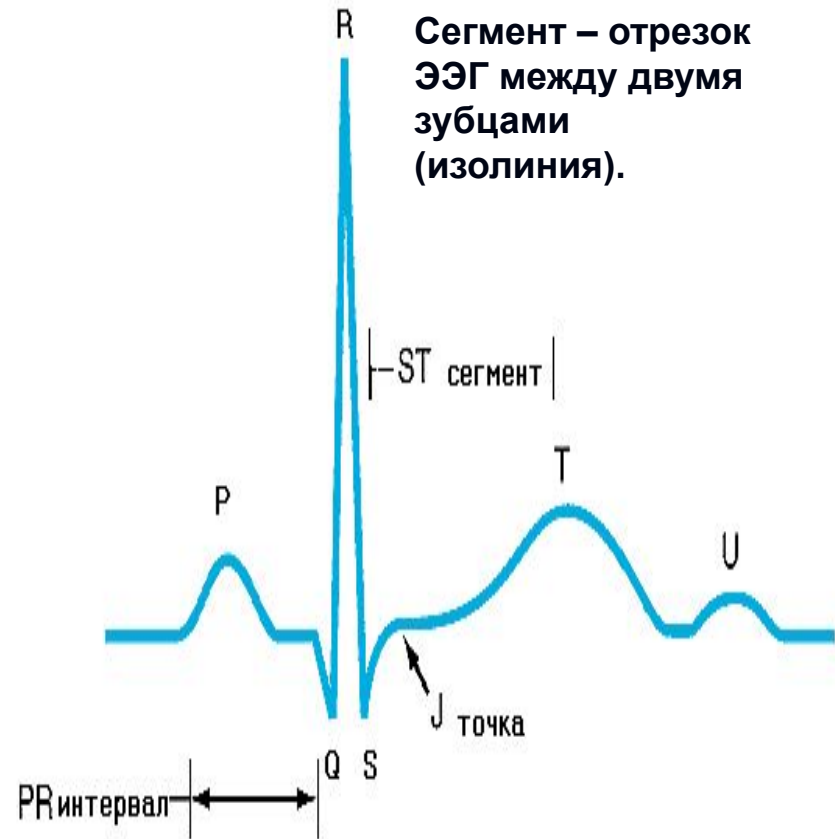
Изолинии регистрируются в том случае, если дипольный момент сердца равен 0.

Зубцы регистрируются в том случае, если дипольный момент сердца не равен 0. Их амплитуда равна проекции вектора дипольного момента на ось отведения.

Зубец P – отражает деполяризацию предсердий

Комплекс QRS – отражает деполяризацию желудочков

Зубец T – отражает реполяризацию желудочков



Сегмент – отрезок ЭЭГ между двумя зубцами (изолиния).

Интервал – отрезок ЭЭГ, включающий зубец и изолинию.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!!!**

