

БИОФИЗИКА МЫШЕЧНОГО СОКРАЩЕНИЯ

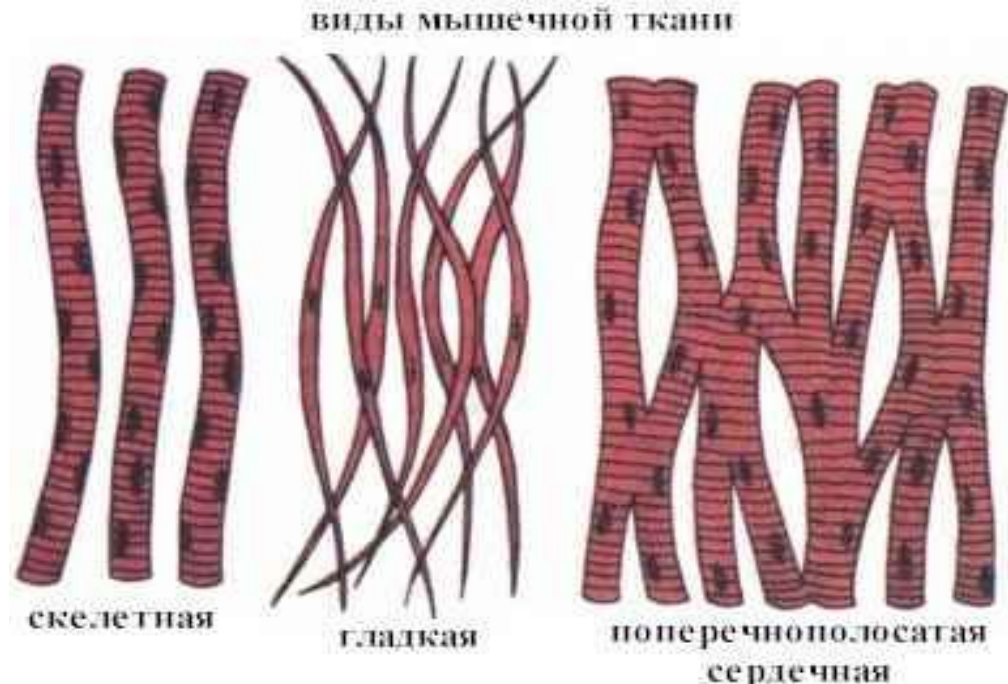


1. В каждой клетке организма на мембране существует разность потенциалов, которая называется мембранным потенциалом покоя. Он служит основой для возникновения потенциалов действия (ПД) в возбудимых тканях организма.

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.

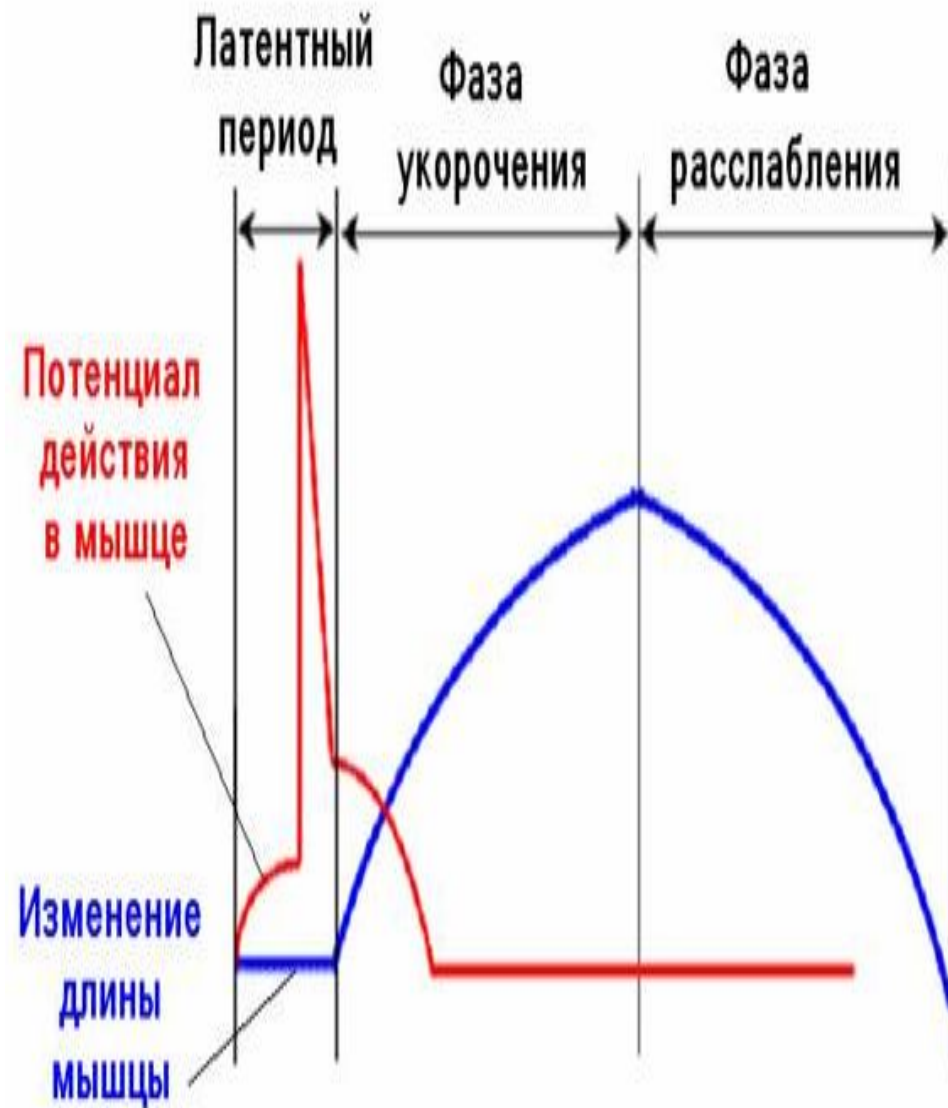
Регуляция мышечного сокращения осуществляется путём изменения числа активных двигательных единиц и частоты приходящих из ЦНС нервных импульсов.



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

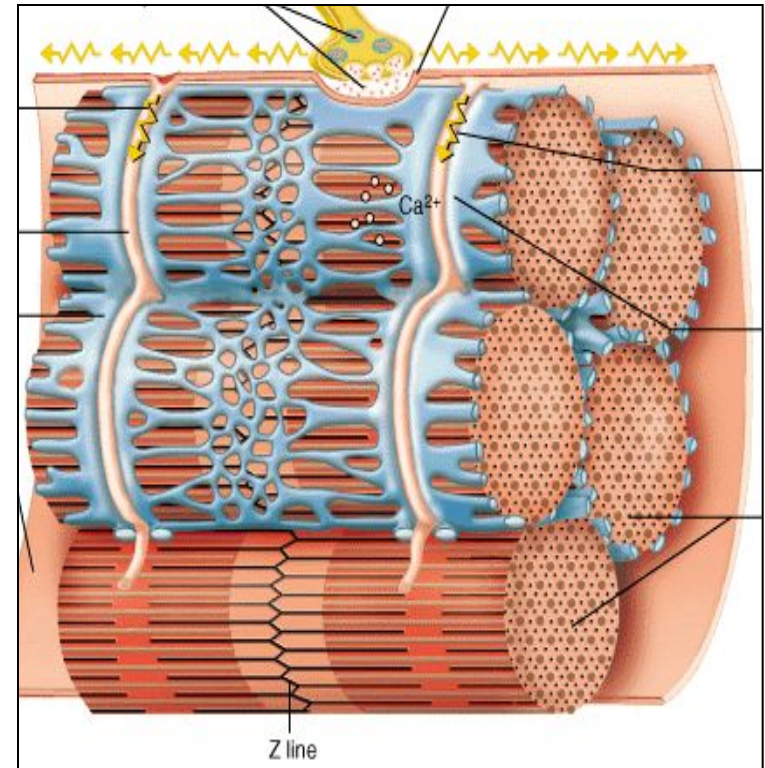
ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ МЫШЕЧНОЙ КЛЕТКИ



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

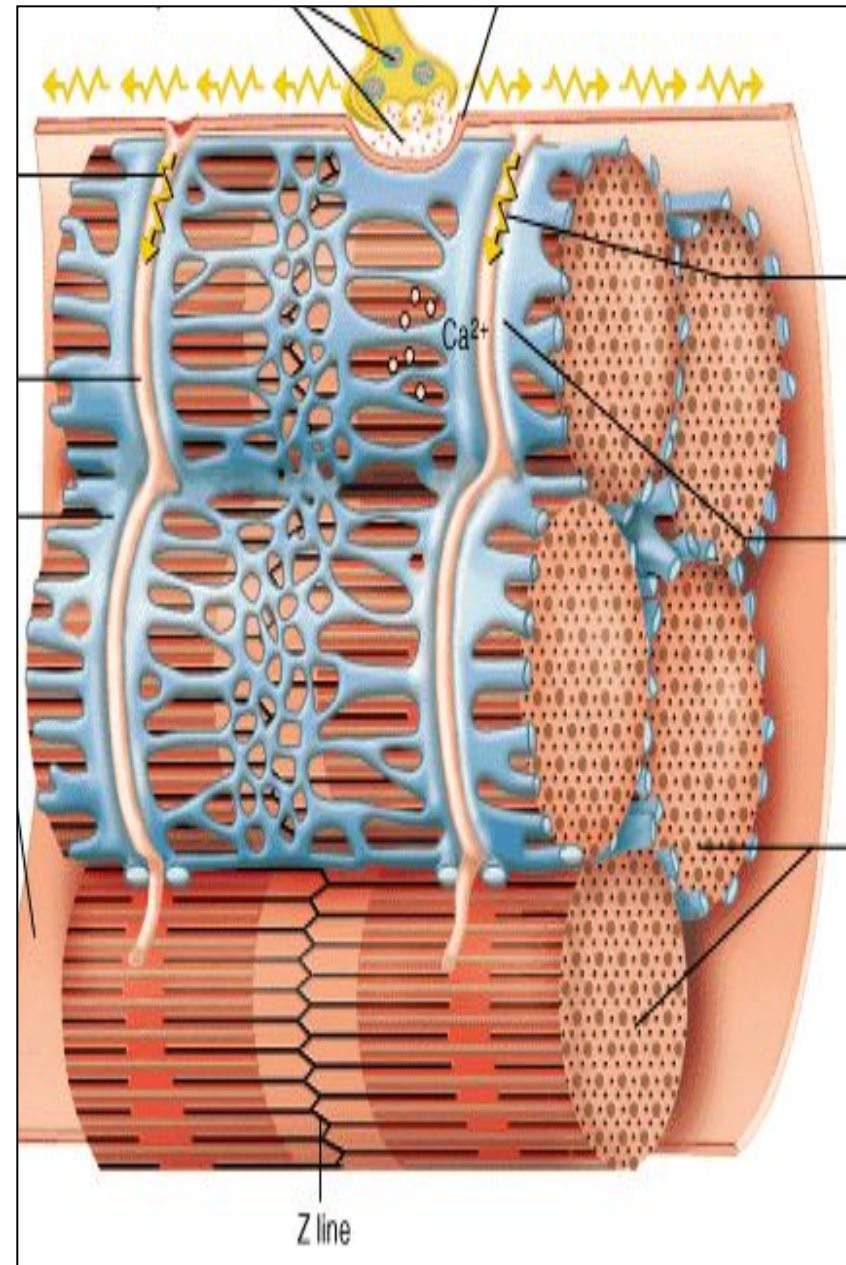
2. Содержит большое количество митохондрий, обеспечивающих энергией мышечные сокращения.

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.

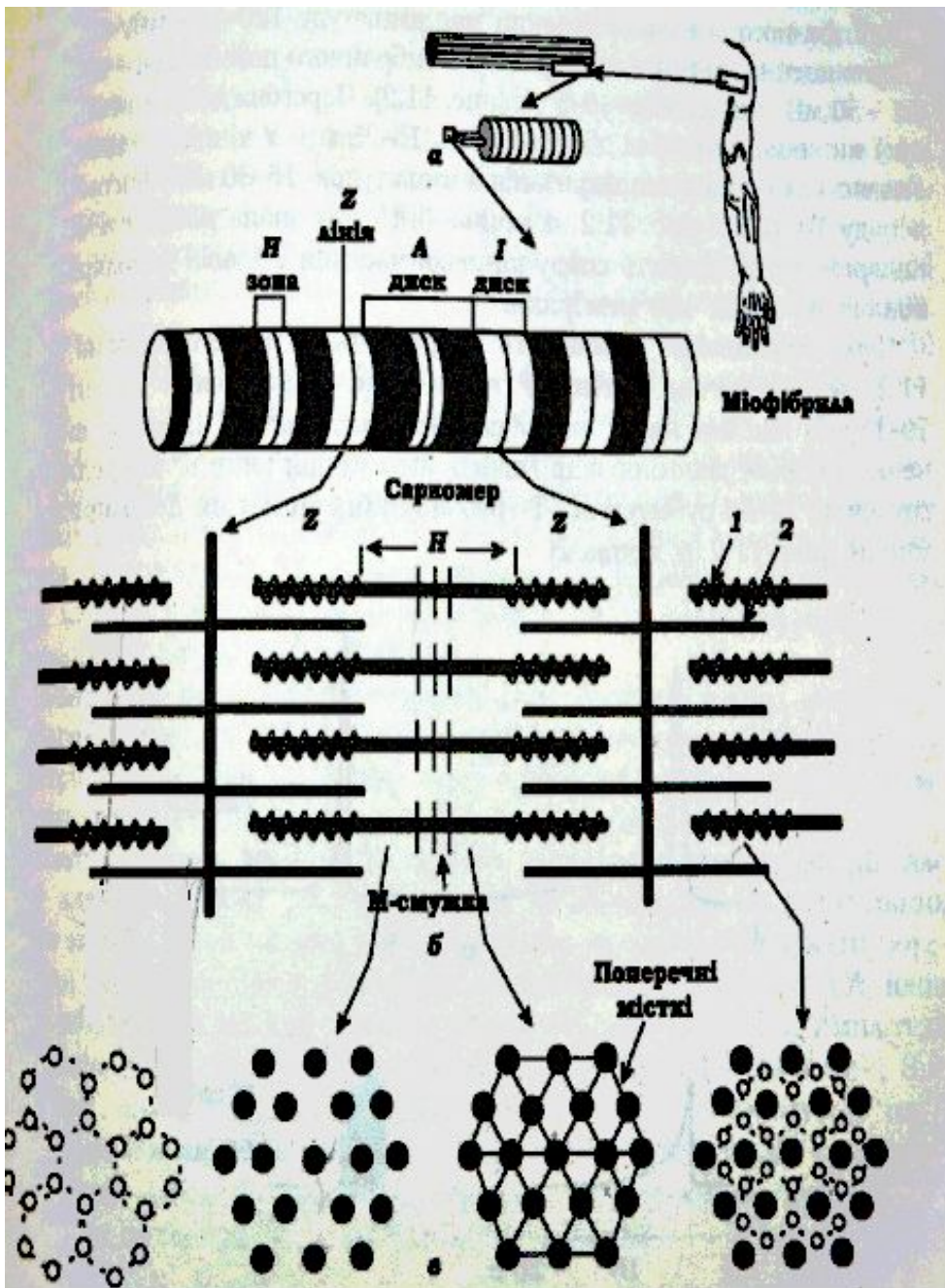


3. Плазматическая мембрана (сарколемма) образует внутри волокна «впячивания» - трубочки Т-системы, которые пронизывают мышечную клетку, обеспечивая распространение возбуждения не только на поверхности, но и внутри мышечного волокна.

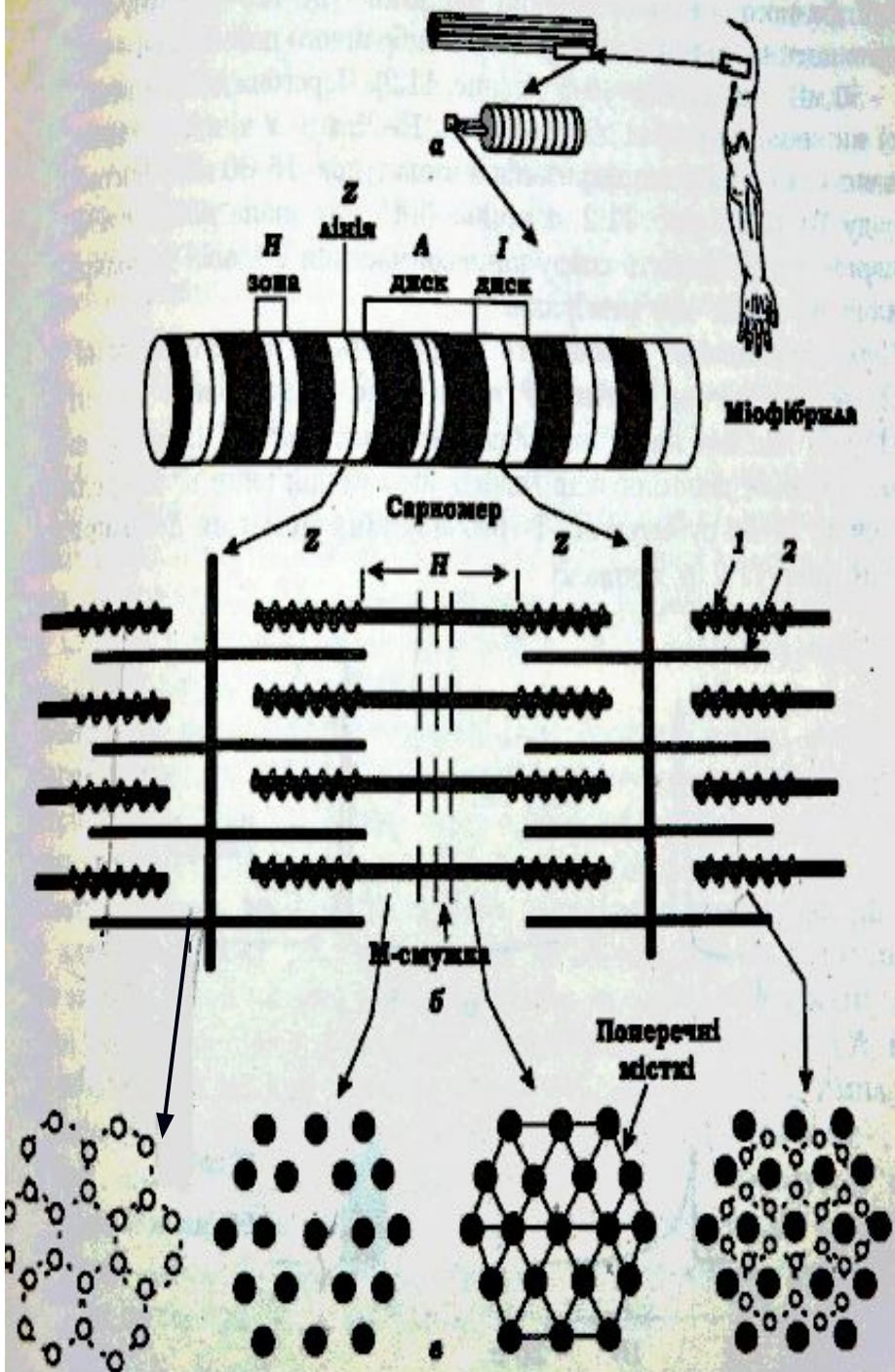
4. Имеет хорошо развитый эндоплазматический ретикулум (10-15% объёма мышечной клетки, а площадь которого в 100 раз больше, чем площадь сарколеммы). СПР является хранилищем (депо) ионов кальция. СПР имеет специфическое строение: в начале саркомера – терминальные цистерны, потом система продольных каналов,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

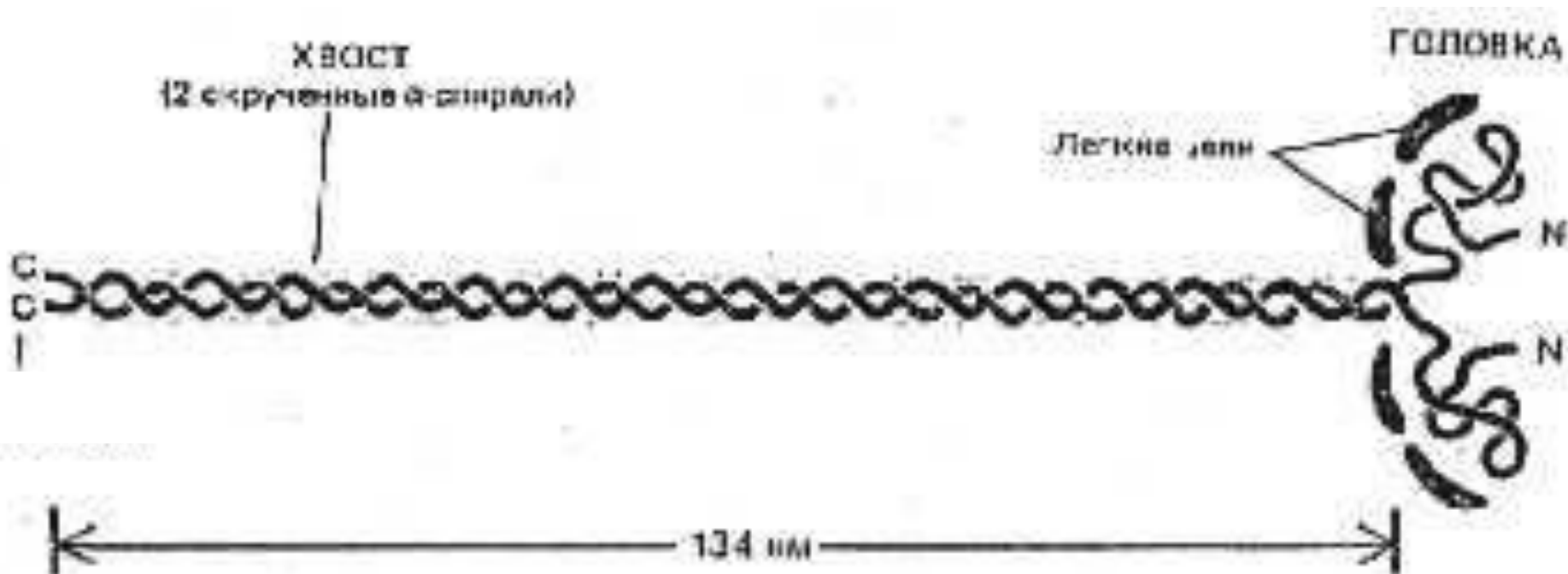
5. В поперечном разрезе: актиновые нити (I-зона); миозиновые волокна (Н-зона); миозиновые волокна, фиксированные М-мостиками (М-полоска); **каждое актиновое волокно окружено тремя миозиновыми, каждое миозиновое – шестью актиновыми (А-зона).**

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.

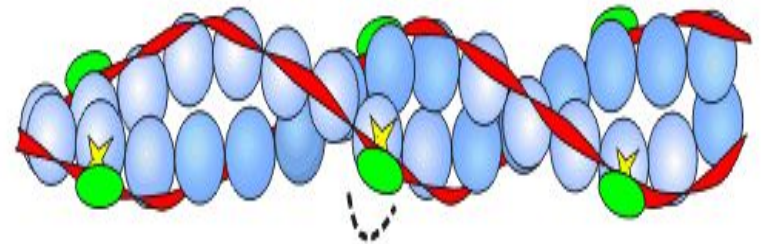
4. В центре миозиновой протофибриллы молекулы миозина ориентированы друг к другу «хвостом к хвосту», в результате чего образуется «голая зона», не содержащая поперечных мостиков. На периферии молекулы миозина ориентированы «хвост к головке».



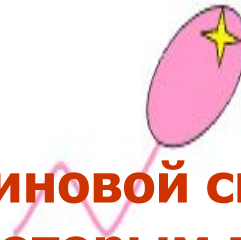
СТРОЕНИЕ АКТИНОВОЙ ПРОТОФИБРИЛЛЫ

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.



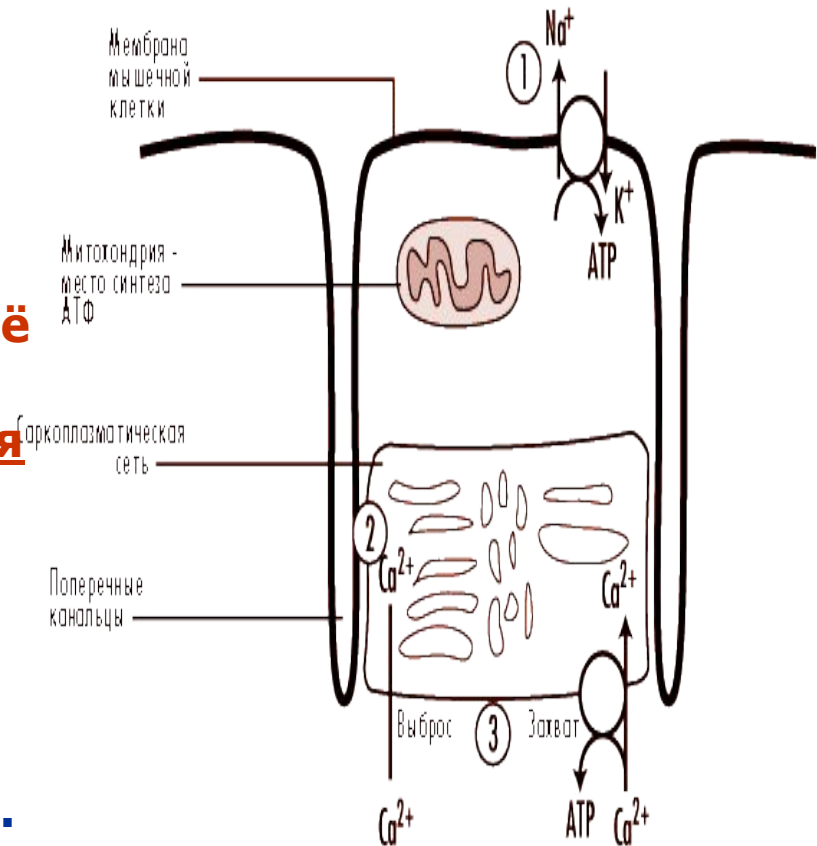
4. Молекула тропонина - сложный регуляторный комплекс, который может взаимодействовать с тропомиозином и обладает сродством к ионам кальция (4 центра связывания).

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.

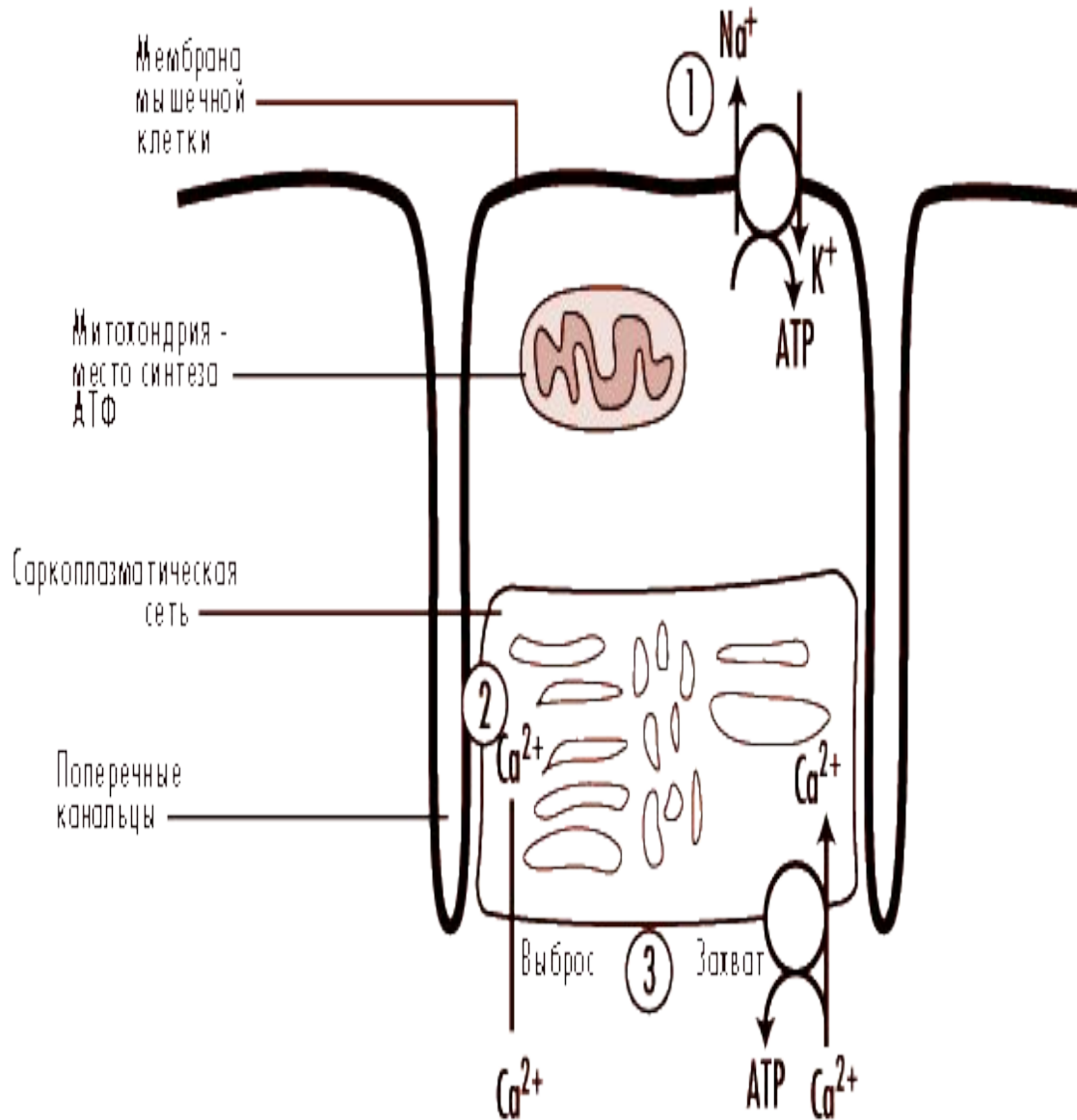
3. По Т-системе деполяризация распространяется вглубь волокна и передаётся на мембрану саркоплазматического ретикулума, СПР.



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

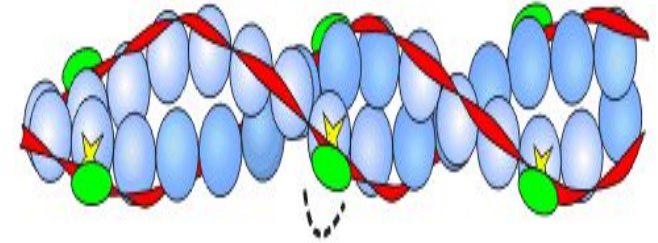


1. Плазматическая мембрана (сарколемма)
2. Т-система
3. Саркоплазматический ретикулум
4. Регуляторные белки актиновой протофибриллы (тропонин и тропомизин). Их роль-обеспечение взаимодействия между миозиновыми и актиновыми протофибриллами.

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

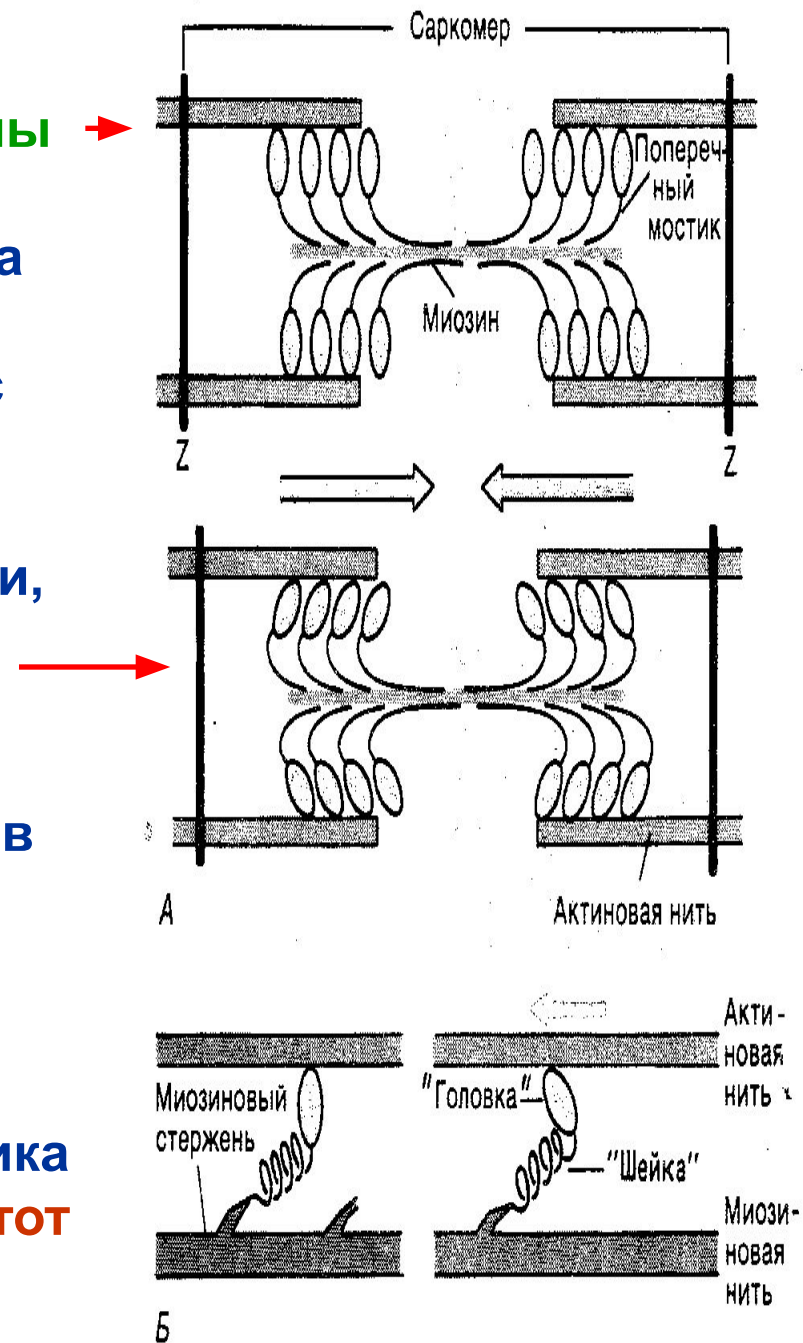


Также возможно, что меняется конформация всей актиновой протофибриллы (то есть она реагирует целиком на связывание тропонина с кальцием).

Важен результат – открытие активных центров актинового волокна.

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

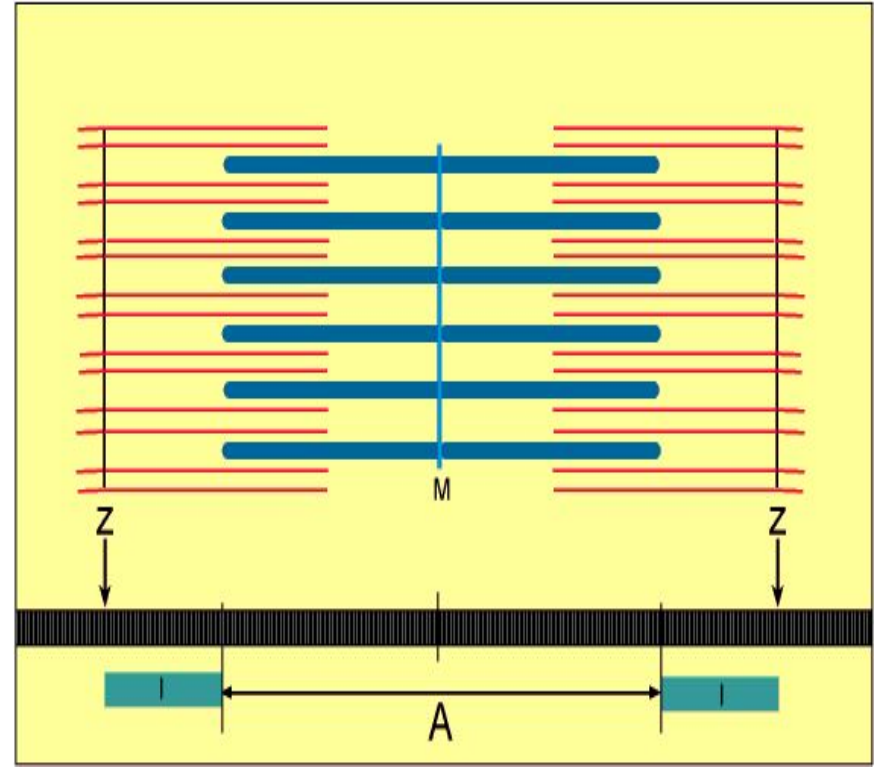
3. В присутствии актина головка миозина проявляет АТФазную активность. Головка при этом образует комплекс с появившимися АДФ и остатком фосфорной кислоты. Этот комплекс содержит большое количество энергии, в результате чего он стремится перейти в состояние с меньшей энергией. Это осуществляется путём 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.

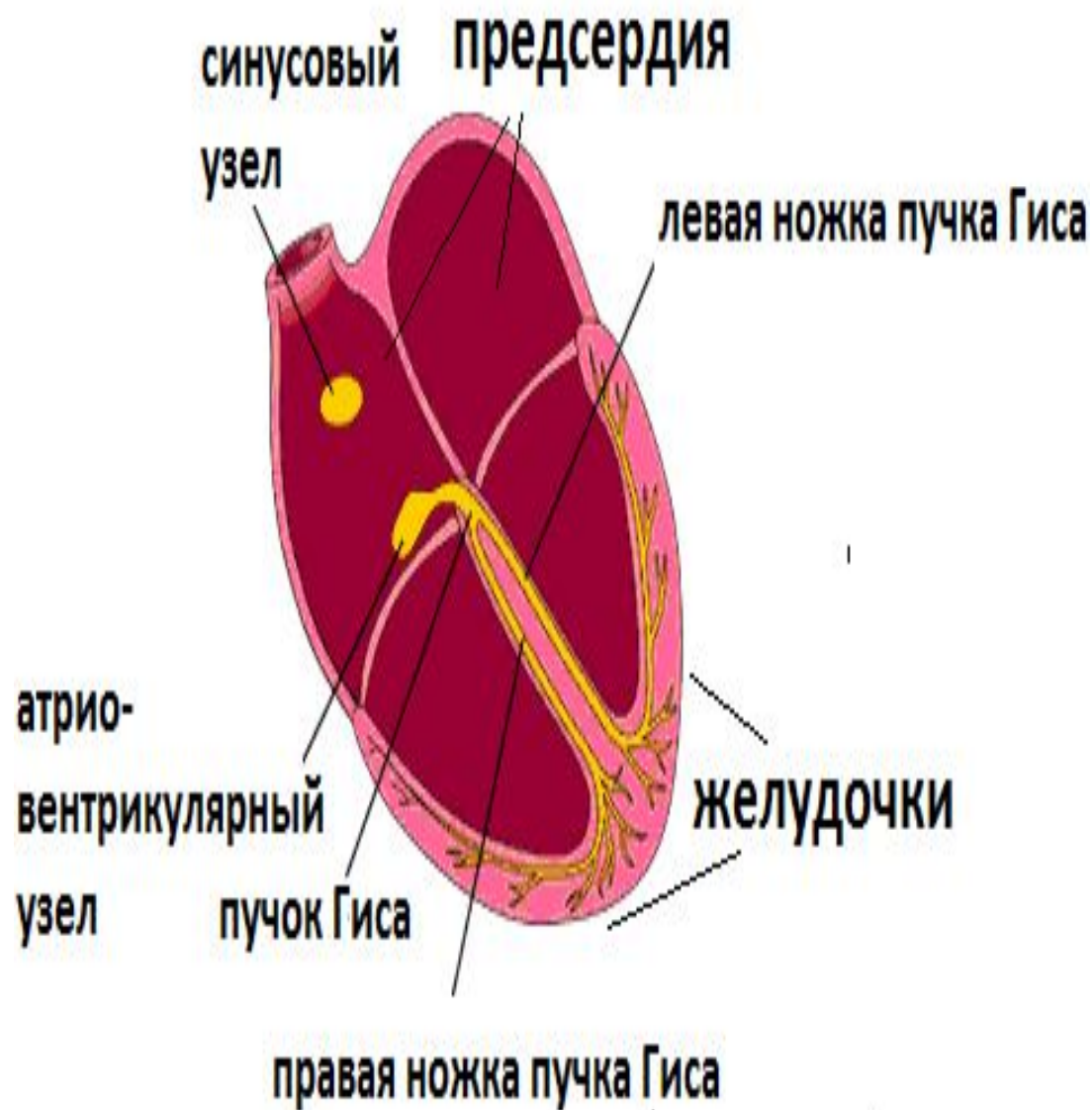
СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СЕРДЕЧНОЙ МЫШЦЫ (МИОКАРДА)



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

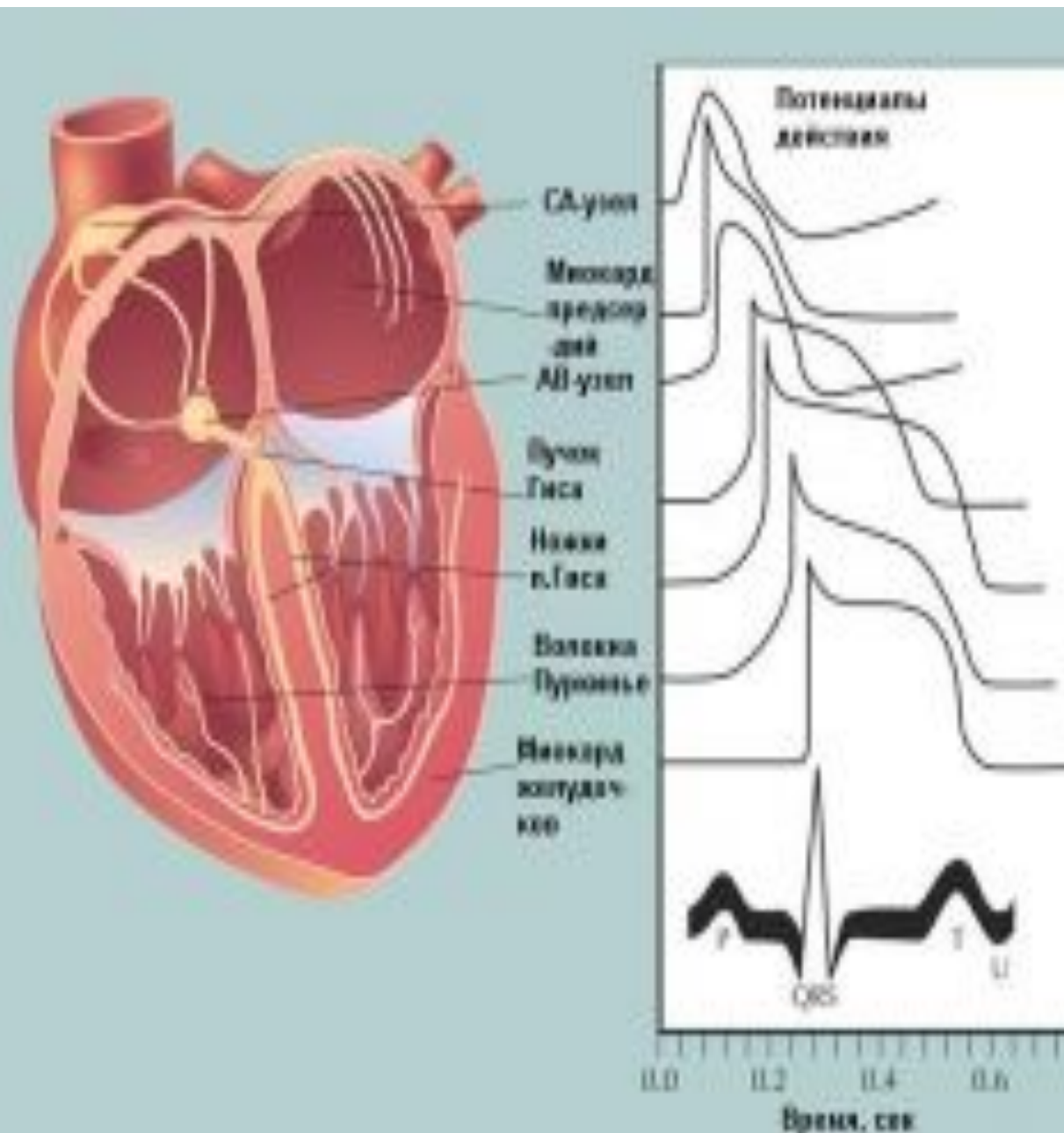
- **клетки предсердного и предсердно-желудочкового узлов.** Их роль – автоматически генерировать потенциалы действия. В норме это происходит в синусовом узле.
- **волокна проводящей системы** обеспечивают распространение возбуждения у рабочему миокарду.
- **мышечные клетки предсердий и желудочков** сокращаются 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.

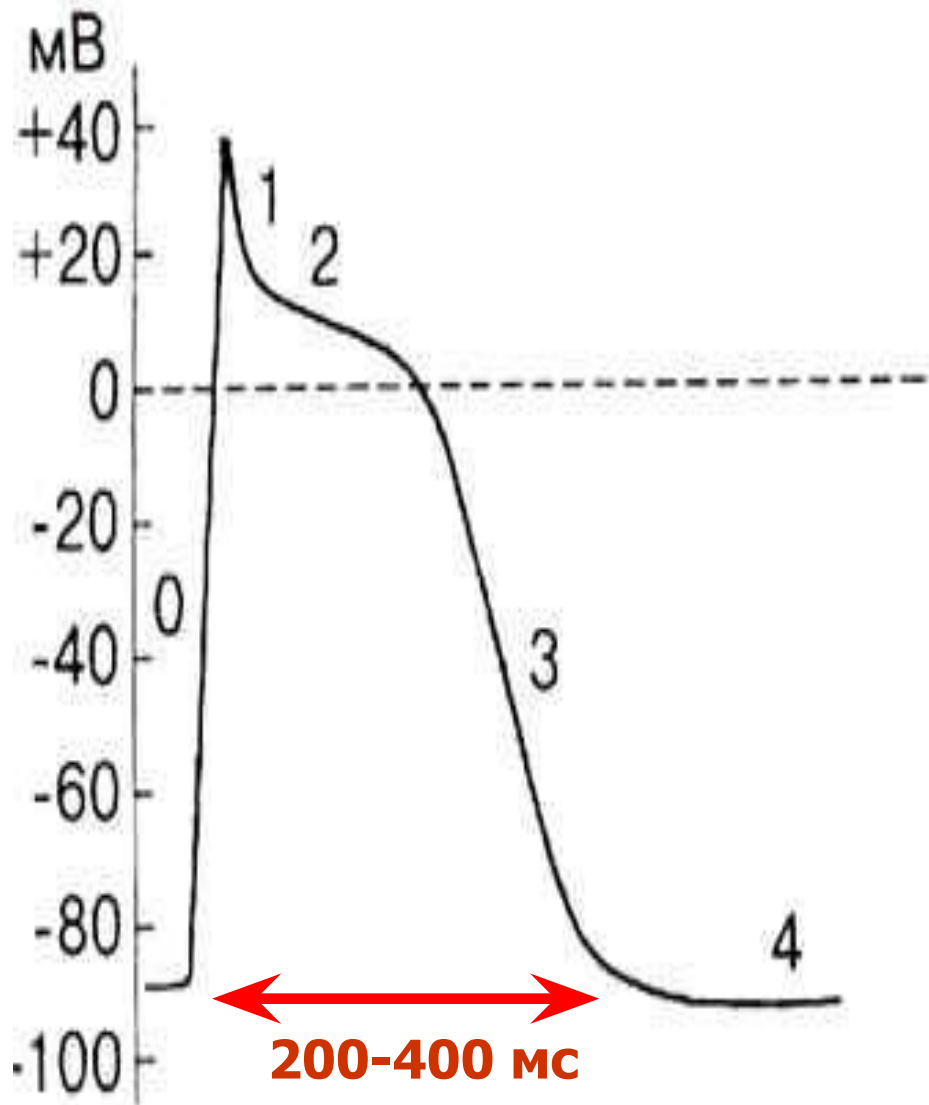
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МИОКАРДА



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)

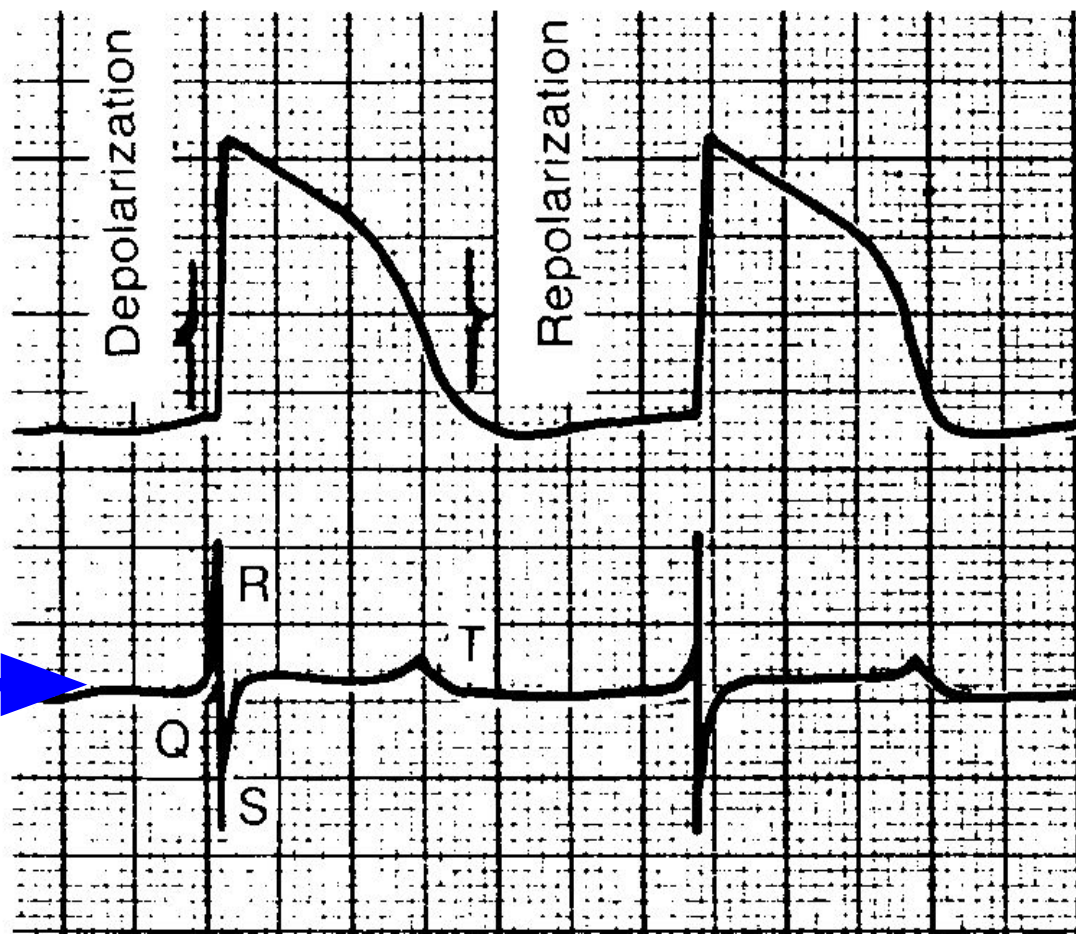
2- плато, медленная
реполяризация
(входящий ток кальция)

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 →

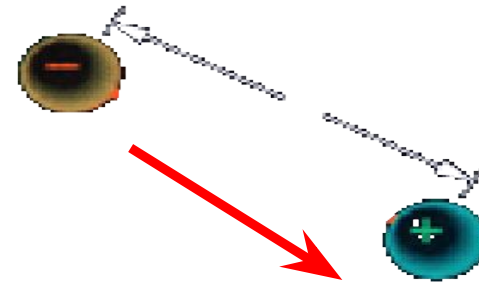
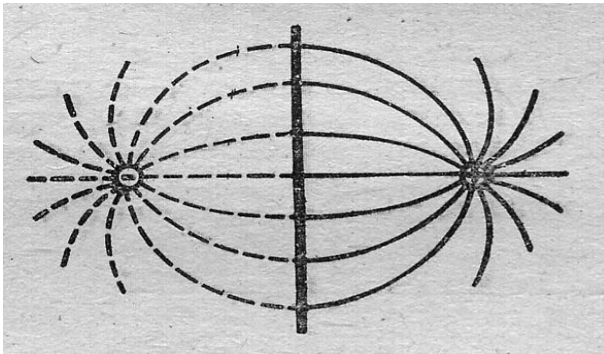


← Электрокардиограмма

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.

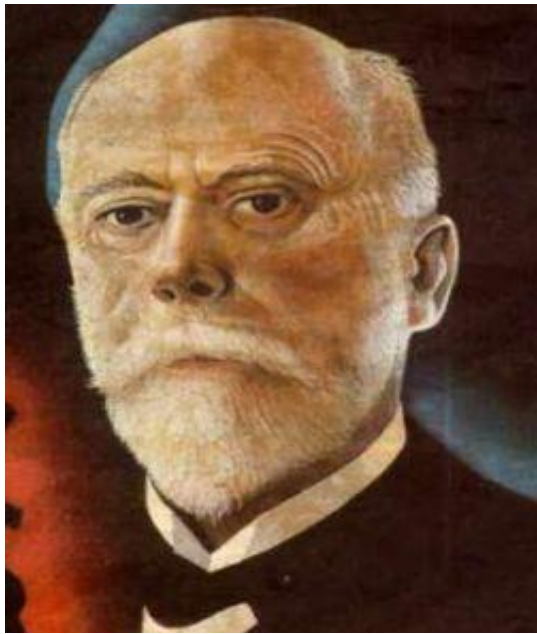
$$\vec{P} = q\vec{l} \quad [Кл \cdot м]$$

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

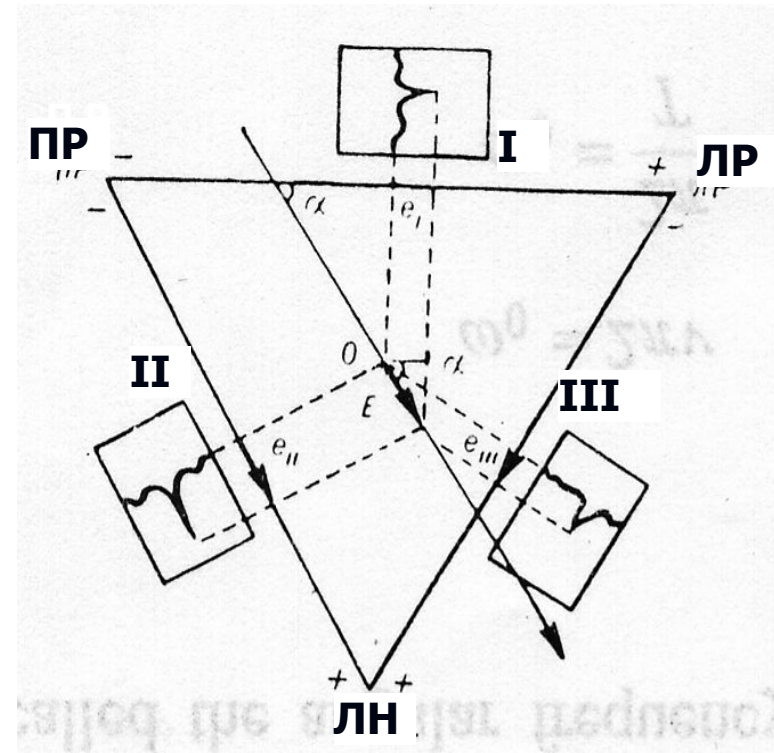
Позволяет регистрировать электрическое поле, которое создаёт сердце в ходе возбуждения путём наложения на поверхность тела электродов.

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

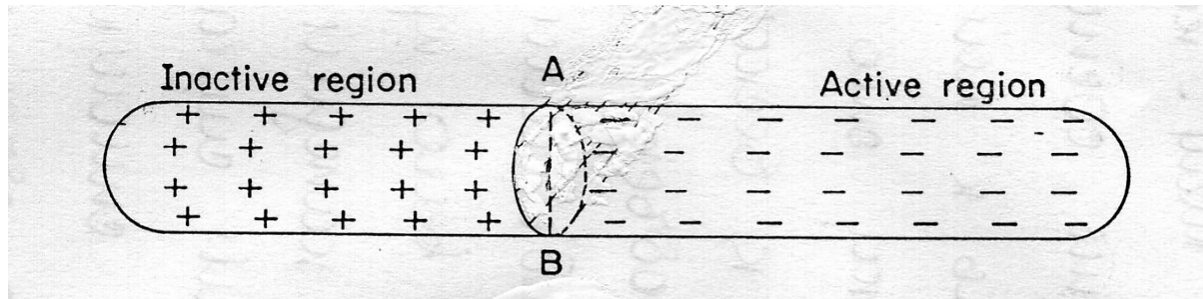
Первый электрокардиограф весил около 270 кг. Его обслуживанием были заняты пять сотрудников.

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.

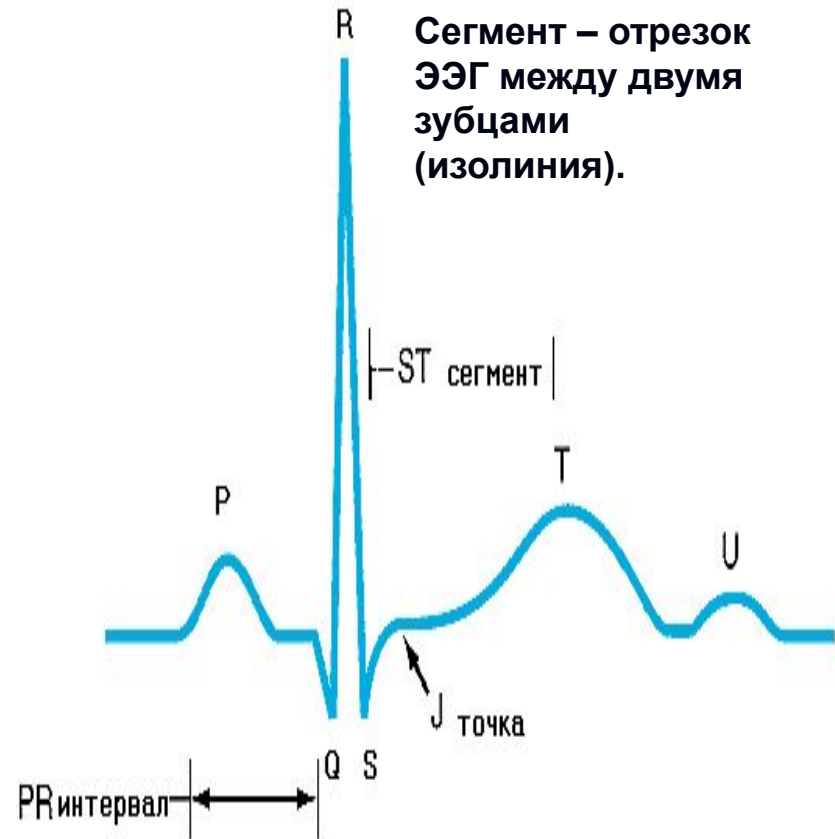
Изолинии регистрируются в том случае, если дипольный момент сердца равен 0.

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!!!

