

КАФЕДРА МЕДИЦИНСКОЙ ФИЗИКИ,  
МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ

## ЛЕКЦИЯ 3

# БИОПОТЕНЦИАЛЫ ГЕНЕЗ ЭЛЕКТРОГРАММ

# ПЛАН ЛЕКЦИИ

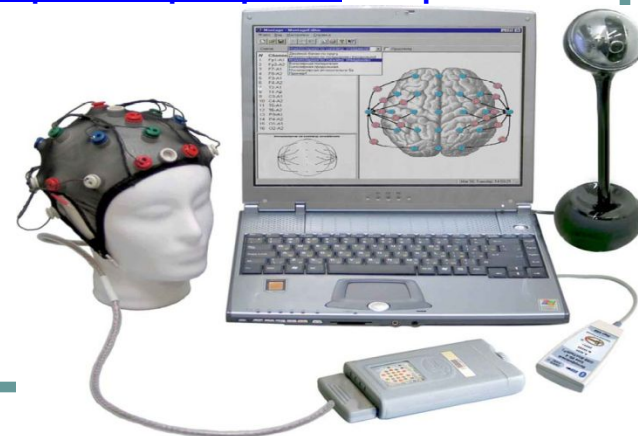
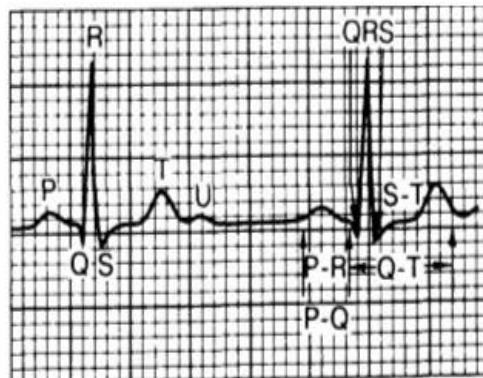
1. Мембранный потенциал.
2. Потенциал покоя в клетках.
3. Уравнение Нернста. Уравнение Гольдмана.
4. Потенциал действия (ПД).
5. Генерация и распространение ПД.
6. Электрографические методы исследования.
7. Схема сердца. Схема проводящей системы сердца.  
Распространение возбуждения по миокарду.
8. Понятие электрического диполя. Его свойства. Токовый диполь.
9. Основные постулаты модели Эйнтховена.
10. Генез зубцов ЭКГ.
11. Электрокардиографические отведения.
12. Основные элементы ЭКГ.
13. Характеристика нормальной ЭКГ.

Генерация БП и его передача – одна из важнейших **функций биомембран**.

Генерация БП лежит в основе **возбудимости** клеток, **регуляции** внутриклеточных процессов, регуляции **мышечного** сокращения, работы **нервной** системы.

**Нарушения** электрических процессов в клетках приводят к ряду серьезных **патологий**.

На исследовании электрических полей, созданных биопотенциалами тканей и органов, основаны **диагностические** методы: электрокардиография, электроэнцефалография и др.



# Биоэлектрические потенциалы

**БП** - это **разность потенциалов** между **двумя** точками живой ткани, определяющая ее **биоэлектрическую активность**.

**БП**



**Мембранная  
природа**

**БП**, регистрируемые в организме, в основном, **мембранные**

**окислительно-  
восстановительные  
процессы**

вследствие переноса электронов от одних молекул к другим

Вопрос о происхождении биопотенциалов **очень сложен**, и в настоящее время **не существует** единой теории, которая бы полностью все объясняла.

# Биоэлектрические потенциалы

## **В организме различают биопотенциалы :**

- потенциал покоя (ПП) - мембранный потенциал (МП)
- локальный ответ (ЛО)
- потенциал действия (ПД) - возбуждение
- постсинаптический потенциал возбуждения (ВПСП)
- тормозной постсинаптический потенциал (ТПСП)
- рецепторный потенциал
- вызванный потенциал

# Мембранный потенциал

**Мембранный потенциал** ( $\varphi_M$ ) = трансмембранный потенциал – это разность потенциалов между **внутренней** ! и **наружной** ! поверхностями мембраны

$$\varphi_M = \varphi_i - \varphi_o$$

in

out

$C_{in}$

$C_{out}$

$\varphi_i$

$\varphi_o$

БМ

## Ионная природа $\varphi_M$

**1. C - различна**

**Неодинаковая концентрация** ионов по обе стороны мембраны

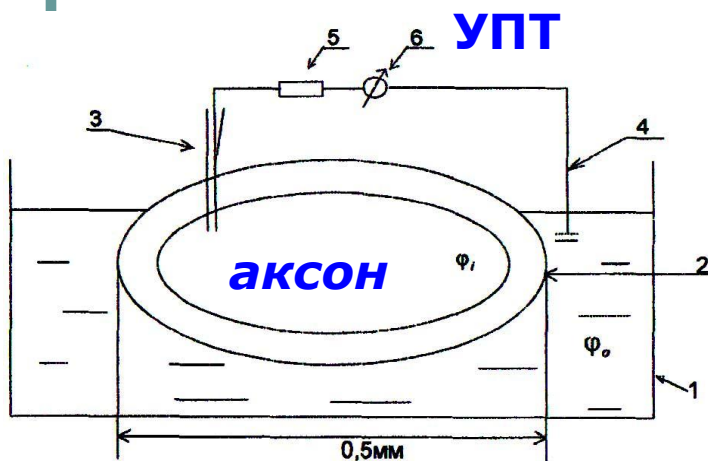
**2. P - различна**

**Неодинаковая проницаемость** мембраны для анионов и катионов

# Методы исследования мембранного потенциала

**Объект исследования:** *гигантский аксон кальмара*. Диаметр от **0,5 до 2 мм**. Это в **100-1000** раз больше, чем у человека.

**Любимая** модель в биофизике

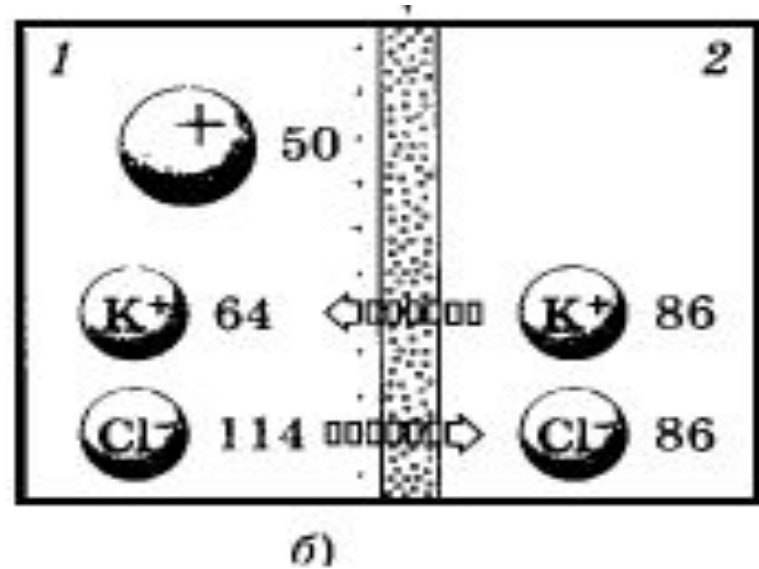
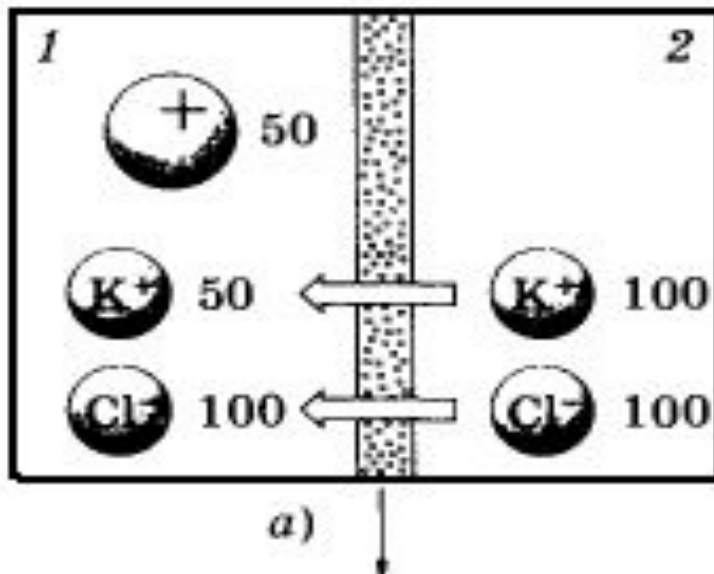


УПТ – усилитель постоянного тока.

**Микроэлектрод:** Стеклянная пипетка с оттянутым кончиком диаметром **0,5 мкм**. Внутри серебряная проволока AgCl и раствор KCl или NaCl. Подвижность ионов  $K^+$  и  $Cl^-$  **одинакова** и **не вносит дополнительной** разности потенциалов. 2-й электрод – электрод сравнения.

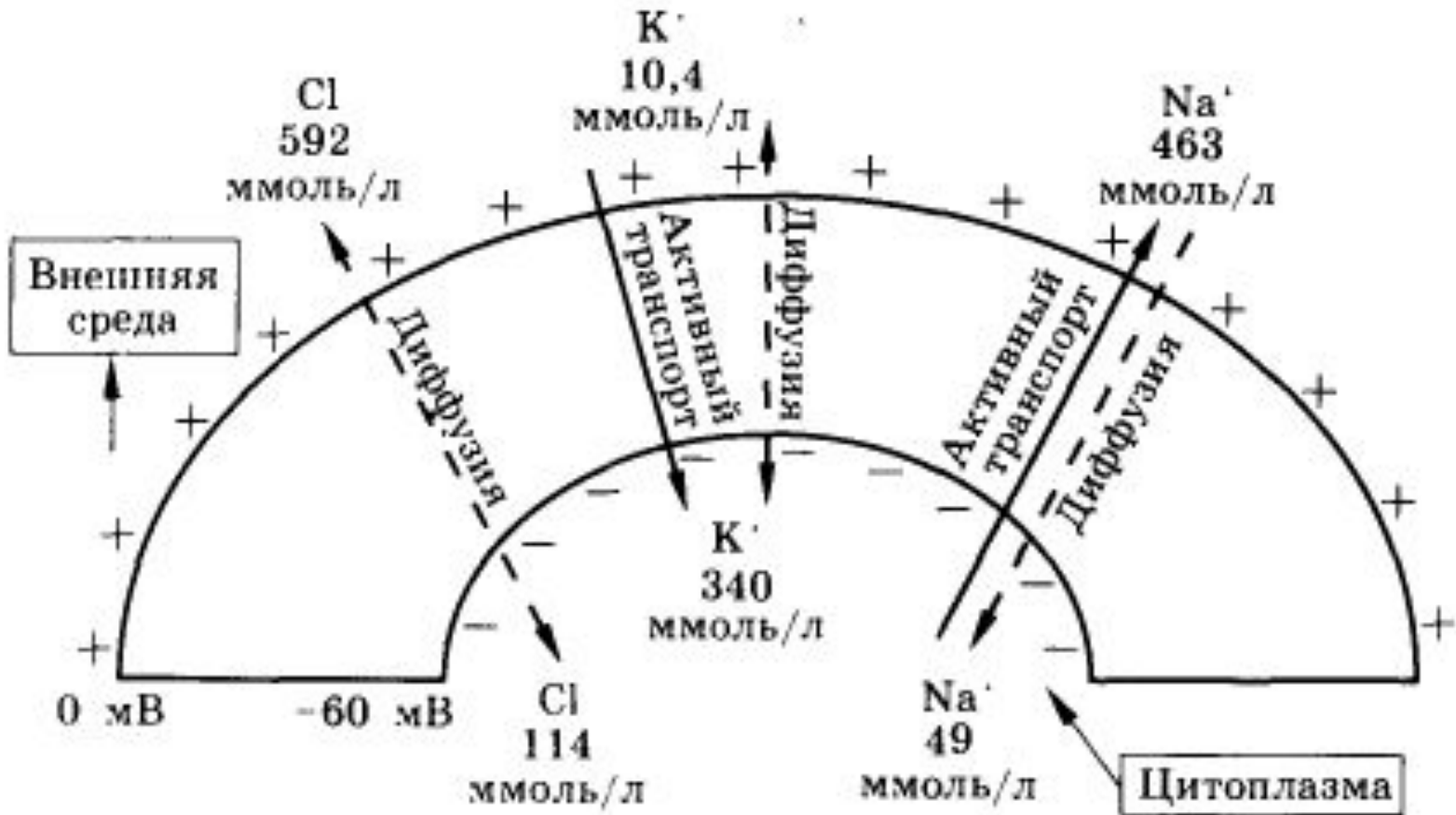
# РАВНОВЕСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

## Механизм формирования равновесного потенциала на мембранах





# СХЕМА ИОННЫХ ПОТОКОВ В СОСТОЯНИИ ПОКОЯ НА МЕМБРАНЕ



# АКТИВНЫЙ ТРАНСПОРТ ВЕЩЕСТВ

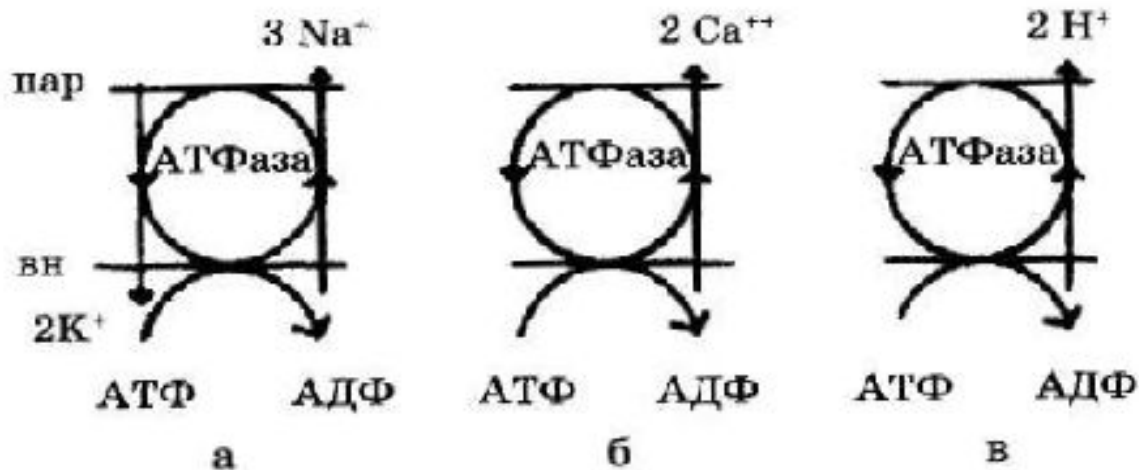
**Активный транспорт** - это перенос вещества из мест с меньшим значением электрохимического потенциала в места с его большим значением.



Активный транспорт в мембране сопровождается ростом энергии Гиббса, он не может идти самопроизвольно, а только в сопряжении с **процессом гидролиза** аденозинтрифосфорной кислоты (**АТФ**), то есть за счет затраты энергии, запасенной в макроэргических связях АТФ.

# ЭЛЕКТРОГЕННЫЕ ИОННЫЕ НАСОСЫ

В настоящее время известны **три типа электрогенных ионных насосов**, осуществляющих активный перенос ионов через мембрану:



- **а** -  $\text{K}^+$ - $\text{Na}^+$ -АТФ-аза в цитоплазматических мембранах ( $\text{K}^+$ - $\text{Na}^+$ -насос);
- **б** -  $\text{Ca}^{2+}$ -АТФ-аза ( $\text{Ca}^{2+}$ -насос);
- **в** -  $\text{H}^+$  - АТФ-аза в энергосопрягающих мембранах митохондрий, хлоропластов ( $\text{H}^+$  - насос, или протонная помпа)

# РАВНОВЕСНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ НЕРНСТА

$$\varphi_m = - \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

В основном,  
концентрация  
ионов **калия**

Это уравнение для равновесного мембранного потенциала.

Равновесный -изменение электрохимического потенциала = 0

**R**- универсальная газовая постоянная (1,9869 кал/моль °K) ,  
**T** – термодинамическая температура, **C** – молярная концентрация,  
**F** – число Фарадея 96500 Кл/моль, **Z** – валентность.

Равновесные калиевые потенциалы, рассчитанные по уравнению Нернста, близки к измеряемым величинам.

# СТАЦИОНАРНЫЙ МЕМБРАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

Для живой клетки характерно не равновесное распределение веществ, но существование потоков ионов в обе стороны через мембрану. Такое состояние, при котором число различных ионов, проходящих в единицу времени через мембрану внутрь клетки, равно числу выходящих из клетки ионов, называют стационарным. Ясно, что в стационарном состоянии суммарная плотность потока ионов через мембрану равна нулю:  $J = 0$ .

Мембранный потенциал для ионов К (рассчитанный по уравнению Нернста) составляет - **120 мВ**. Это значительно больше, чем потенциал устанавливаемый экспериментально (**-70-90 мВ**). Причины расхождения в том, что не учтена проницаемость мембраны для других ионов.

Одновременная диффузия через мембрану ионов  $K^+$ ,  $Na^+$  и  $Cl^-$  учитывается **уравнением Гольдмана**.

# МОДЕЛЬ СТАЦИОНАРНОГО МЕМБРАННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Это уравнение для стационарного мембранного потенциала, при котором **суммарный ток ионов** через мембрану равен нулю.

## Уравнение Гольдмана-Ходжкина-Катца

$$\Phi_{\text{ММ}} = -\frac{RT}{ZF} \ln \frac{P_{K^+} [K^+]_i + P_{Na^+} [Na^+]_i + P_{Cl^-} [Cl^-]_o}{P_{K^+} [K^+]_o + P_{Na^+} [Na^+]_o + P_{Cl^-} [Cl^-]_i}$$

пп

пд

**R**- универсальная газовая постоянная,  
**P**- проницаемость мембраны, **Z** – валентность,  
**T** – термодинамическая температура,  
**F**-число Фарадея 96500 Кл/моль,

# ПОТЕНЦИАЛ ПОКОЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ МЕМБРАНЫ

**ПП** – это разность потенциалов между цитоплазмой и окружающей средой в нормально функционирующей невозбужденной клетке.

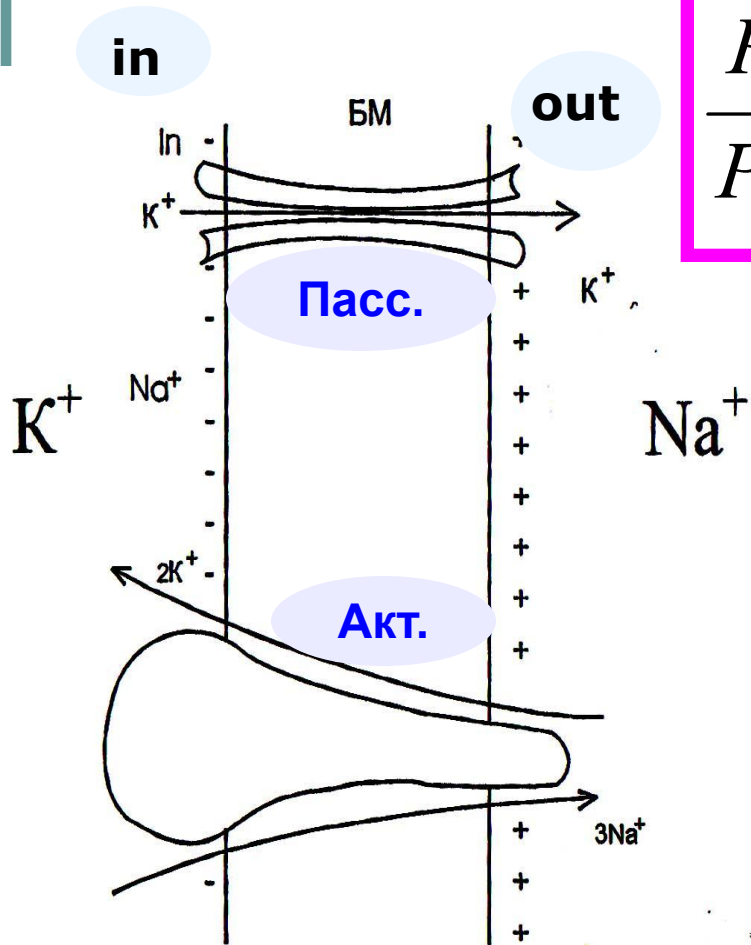
**ПП-** это **неизменяемый во времени** мембранный потенциал  $\varphi_M$ , при котором суммарный ток ионов через мембрану равен нулю, причем мембрана находится в невозбужденном состоянии.

## Причина ПП

1. **Разная концентрация ионов  $K^+$**  по разные стороны мембраны

2. **Неодинаковая скорость диффузии** через БМ  $K^+$  и анионов высокомолекулярных органических вещества, находящихся в цитозоле.

# ПП- в основном, калиевый диффузионный потенциал.

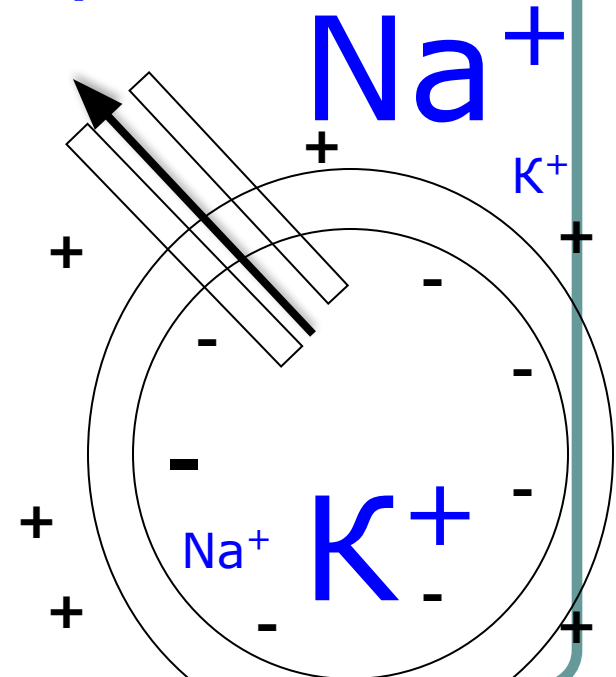


$$\frac{P_{K^+}}{P_{Na^+}} = \frac{1}{0,04}$$

**ПП = -90 мВ**

Внутренняя  
поверхность клетки  
заряжена  
отрицательно!

КОЛИЧЕСТВО  
Na<sup>+</sup> КАНАЛОВ В  
10 РАЗ  
ПРЕВЫШАЕТ  
КОЛИЧЕСТВО K<sup>+</sup>  
КАНАЛОВ



**Активный транспорт поддерживает gradC**

**мембрана поляризована**



# ПОТЕНЦИАЛ ПОКОЯ

Мембранный потенциал, рассчитанный по уравнению Гольдмана, оказался по абсолютной величине меньше мембранного потенциала, рассчитанного по формуле Нернста, ближе к экспериментальным его значениям в крупных клетках. И формула Нернста, и уравнение Гольдмана не учитывают активного транспорта ионов через мембрану, наличия в мембранах электрогенных (вызывающих разделение зарядов, а следовательно и возникновение разности потенциалов) ионных насосов, играющих важную роль в поддержании ионного равновесия в мелких клетках.

# ПОТЕНЦИАЛ ПОКОЯ

В цитоплазматической мембране работают  $K^+$ - $Na^+$ -АТФазы, перекачивающие калий внутрь клетки, а натрий из клетки. С учетом работы электрогенных ионных насосов для мембранного потенциала было получено **уравнение Томаса**:

$$\varphi_M = -\frac{RT}{F} \ln \frac{mP_K [K^+]_{вн} + P_{Na} [Na^+]_{вн}}{mP_K [K^+]_{нар} + P_{Na} [Na^+]_{нар}}$$

- где  $m$  — отношение количества ионов натрия к количеству ионов калия, перекачиваемых ионными насосами через мембрану ( $3/2 > 1$ )

Повреждение клеточной мембраны приводит к повышению проницаемости клеточных мембран для всех ионов: к повышению  $P_K$ ,  $P_{Na}$ , и  $P_{Cl}$ . Вследствие уменьшения различия проницаемостей абсолютное значение мембранного потенциала снижается.

# Механизмы формирования потенциала действия

**ПД (возбуждение)** – это быстрое, кратковременное (1 мс) изменение ПП в ответ на раздражение достаточной силы, длительности и градиента силы. Величина ПД обычно равна в среднем 120 мВ и состоит из полного исчезновения ПП (80 мВ) до “0” и образование обратной поляризации (-40 мВ)

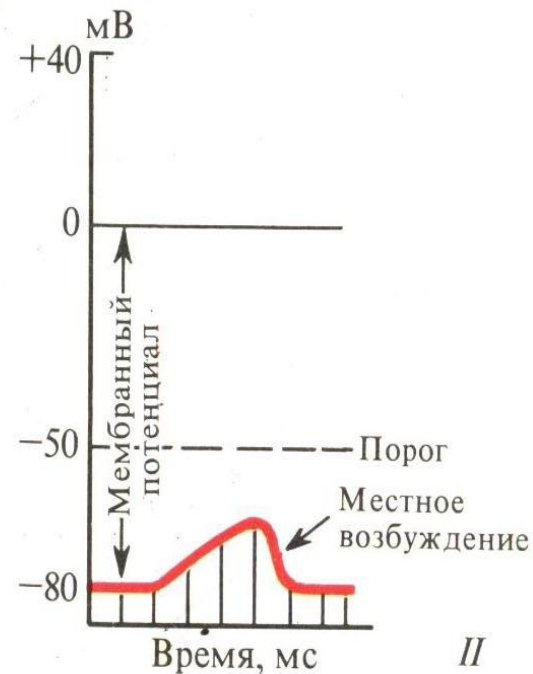
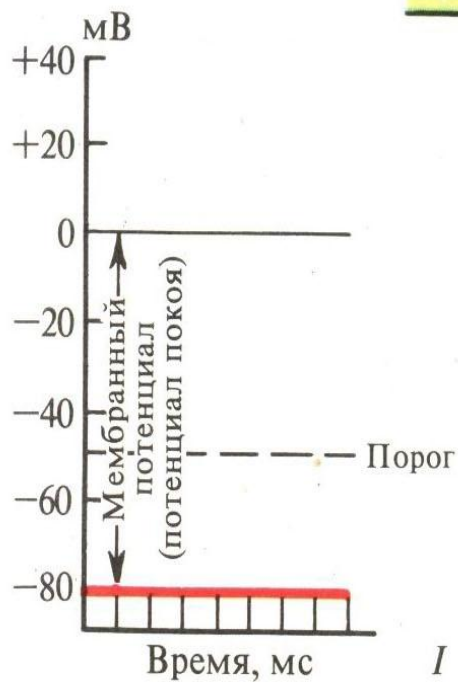
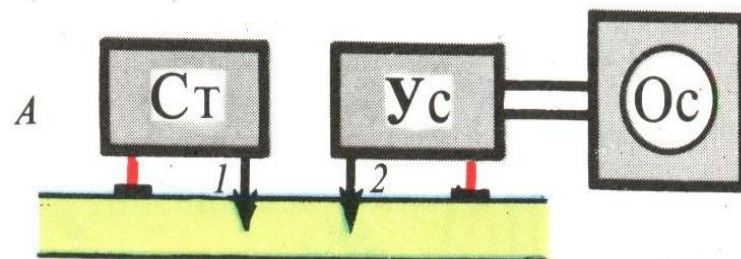
Амплитуда ПД не зависит от силы раздражителя, а имеет зависимость от вида возбудимой ткани.

# ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

При воздействии на мембрану раздражения происходит повышение её проницаемости (р) для  $\text{Na}^+$  во внутрь клетки и **Потенциал покоя (ПП)** уменьшается, происходит деполяризация.

При под пороговой силе раздражения происходит уменьшение **ПП** (на 10 – 20мв), в виде **локального ответа (ЛО)**, который не имеет латентного периода, зависит от силы, не распространяется, суммируется, затухает.

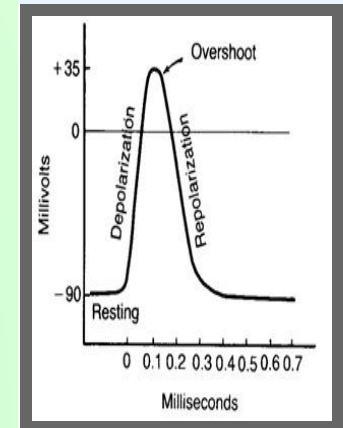
# ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ



# ХАРАКТЕРИСТИКА ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

**Потенциал действия (ПД)** - это изменение мембранного потенциала при **возбуждении** нервных клеток, напоминающее затухающее колебание.

**ПД** - это электрический импульс, обусловленный **изменением ионной проницаемости БМ** и связанный с **распространением** по нервам и мышцам волны возбуждения.



Резко **падает сопротивление** мембраны для ионов **Na<sup>±</sup>** на 2-3 порядка.

**ПД** разовьется, если амплитуда стимула больше порогового значения

# КРИТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ (КУД)

При воздействии выше пороговой силы раздражения **ПП** снижается до **критического уровня деполяризации (КУД)** и в результате **ПП** быстро достигает “0” уровня (**уравновешивание поляризации**) и далее происходит обратная поляризация на 20 – 40мв (**реверсия ПП**) т.е. поверхность мембраны заряжается “-”, а аксоплазма “+” и в итоге возникает **ПД** - возбуждение.

**КУД** - это минимальный уровень поляризованности мембраны, при котором деполяризация дает начало потенциалу действия.

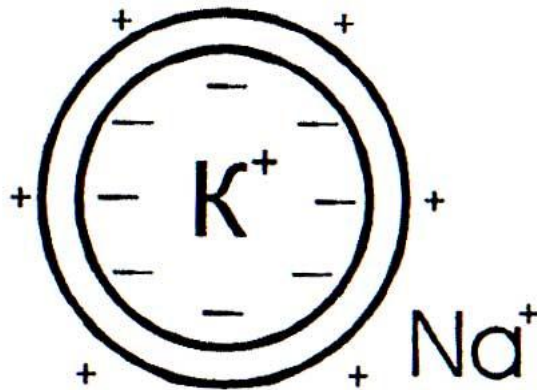
# ПД разовьется, если амплитуда стимула больше порогового значения

## Особенности $\text{Na}^+$ каналов

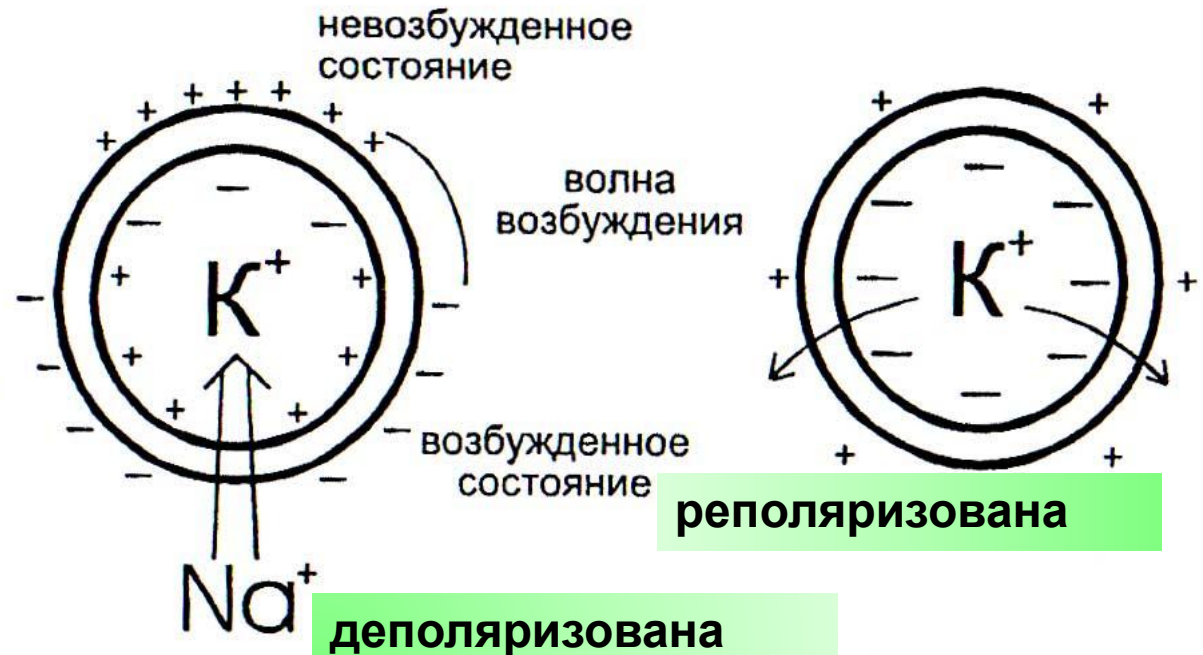
1. **Потенциалозависимые:** открываются лишь при возбуждении БМ
2. Открываются на **очень малый** промежуток времени от 0,1-10 мс.

На мгновение!

$$\frac{P_{K^+}}{P_{Na^+}} = \frac{1}{20}$$



Клетка поляризована



реполяризована

деполяризована

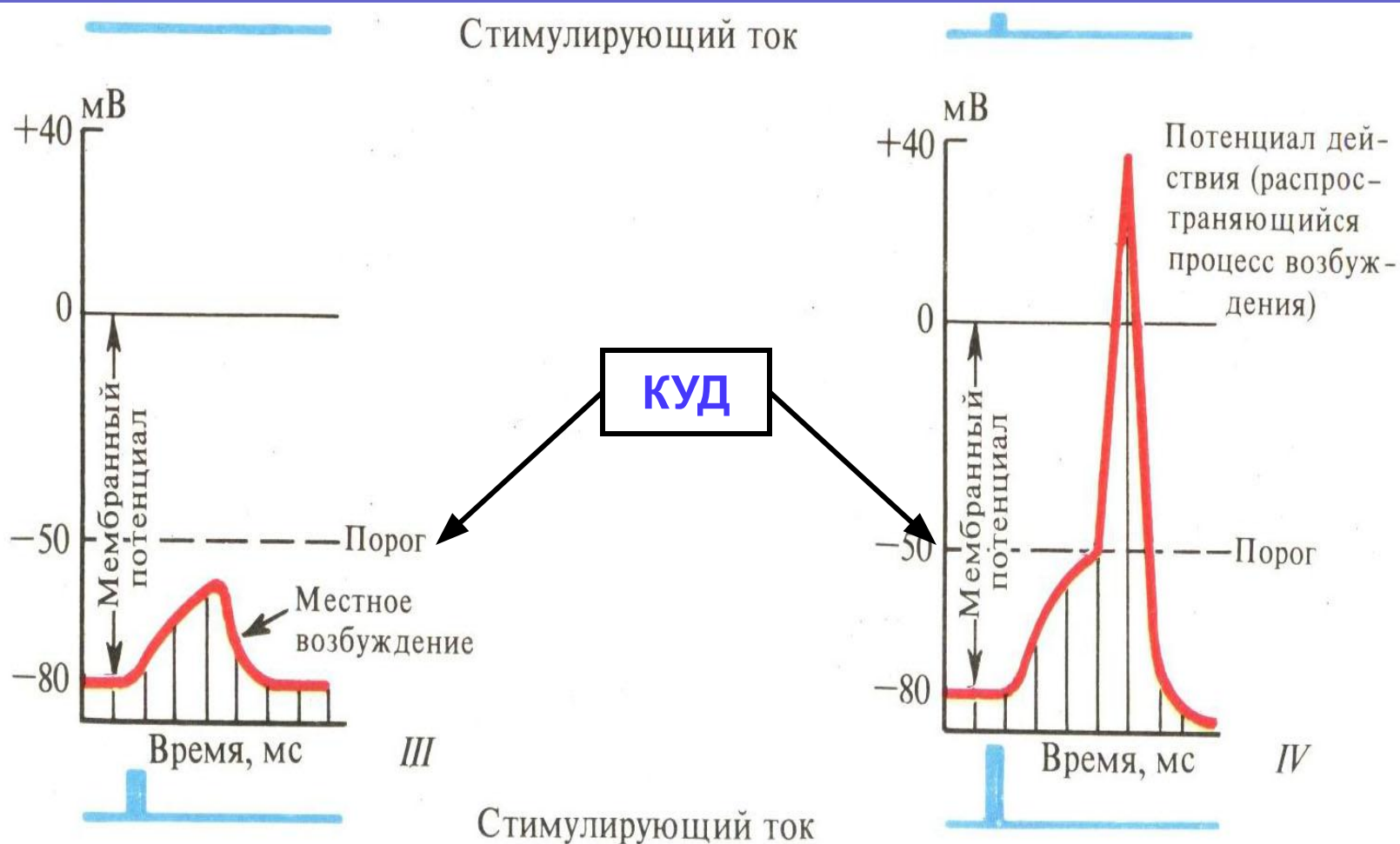


# ЗАКОНЫ РАЗДРАЖЕНИЯ ВОЗБУДИМЫХ ТКАНЕЙ

Для того, чтобы раздражитель вызвал возбуждение, он должен быть:

- 1 - достаточно сильным (закон силы)
- 2 - достаточно длительным (закон времени)
- 3 - достаточно быстро нарастать (закон градиента)

# КРИТИЧЕСКИЙ УРОВЕНЬ ДЕПОЛЯРИЗАЦИИ (КУД)



# ЗАКОНЫ РАЗДРАЖЕНИЯ ВОЗБУДИМЫХ ТКАНЕЙ

1. Чтобы вызвать возбуждение, раздражитель должен быть достаточно сильным - **пороговым или выше порогового.**

**Порог** - это минимальная сила раздражителя, способная вызвать возбуждение. Раздражитель должен деполяризовать мембрану до - 50 мВ. В дальнейшем процесс деполяризации будет продолжаться самостоятельно.

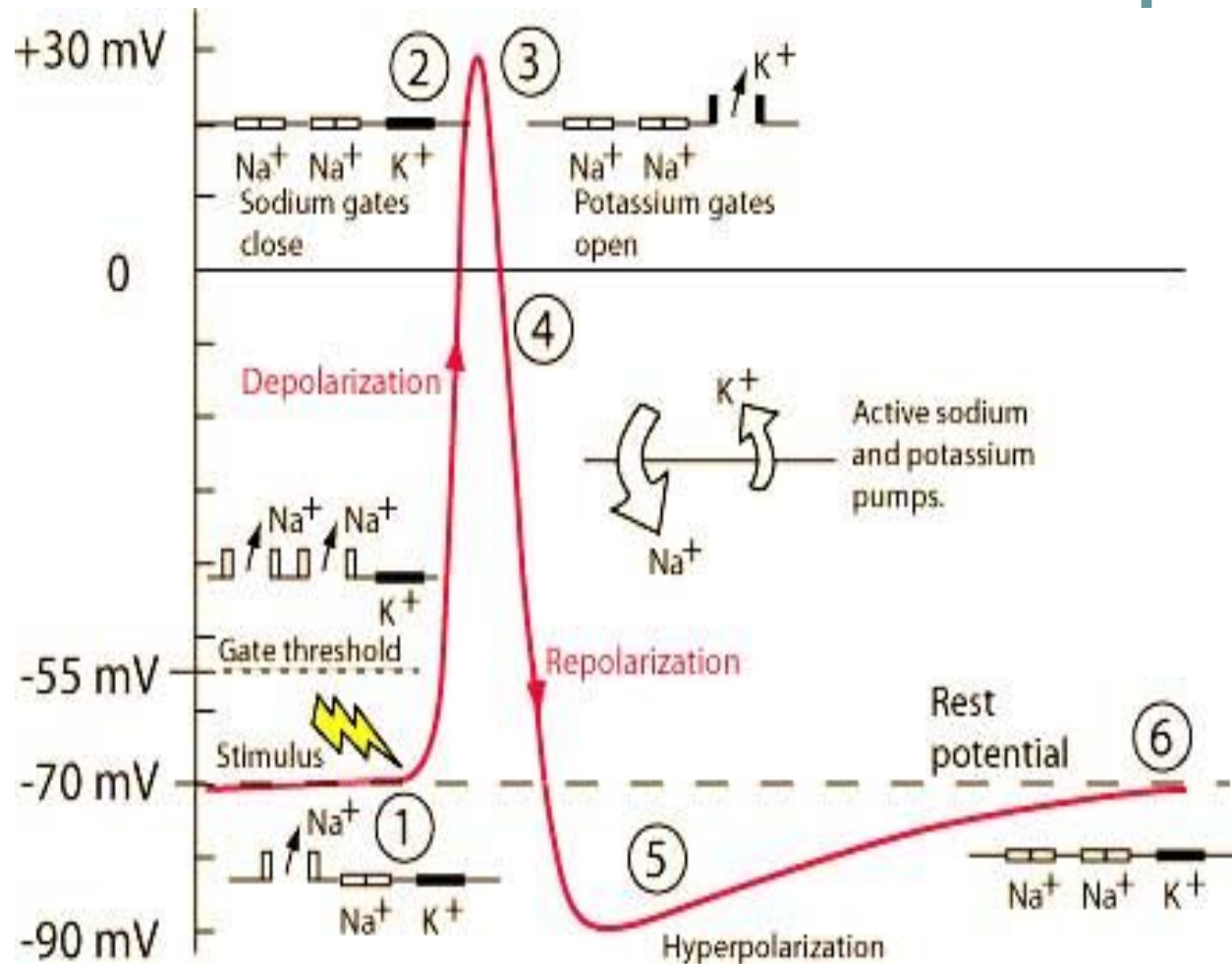
2. Для того, чтобы вызвать возбуждение, раздражитель должен действовать на ткань некоторое время (зависимость силы раздражителя от времени его действия).

3. Для того, чтобы раздражитель вызвал возбуждение, он должен нарастать достаточно быстро. При медленном увеличении силы раздражителя развивается **аккомодация** (инактивация натриевых каналов), повышается порог раздражения либо порог вообще не достигается.

# ФАЗЫ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

В ПД выделяют следующие фазы:

- 1 - **локальный ответ**  
(начальный этап деполяризации)
- 2 - **фаза деполяризации**  
(снижение величины МПТ)
- 3 - **овершут** - перезарядка мембраны
- 4 - **фаза реполяризации**  
(восстановление исходного уровня МПТ)
- 5 - **следовая гиперполяризация**  
(временное увеличение поляризованности мембраны)
- 6 - **восстановление** ППТ



# СВОЙСТВА ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

Наличие **порогового**

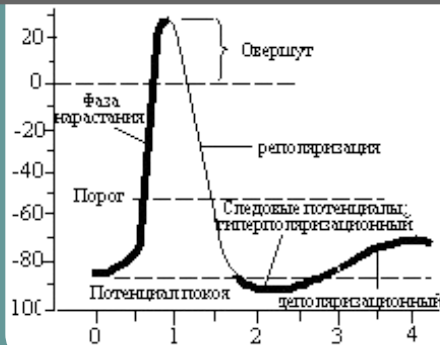
$\Phi_{\text{Пор}}$   
деполяризирующего  
потенциала

Характерен период  
**рефрактерности**  
= **невозбудимости**

Закон «**все или ничего**»

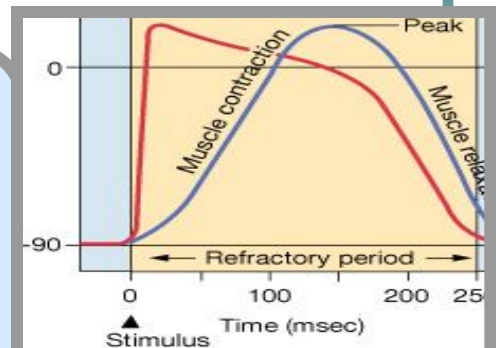
**"All or none"**

В момент возбуждения  
**резко падает**  
(на 3 порядка)  
сопротивление **БМ**  
для ионов **Na<sup>+</sup>**



Нервная клетка

**пд**  
– это короткий импульс:  
до 3 мс – для аксона  
до 400 мс  
для кардиомиоцита



Мышечная клетка

# СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПП И ПД

Сравниваемые параметры	Потенциал покоя	Потенциал действия
Заряд на поверхности мембраны	снаружи «+» внутри «-»	снаружи «-» внутри «+»
Концентрация ионов	ионов ( $K^+$ ) внутри больше, снаружи меньше	ионов ( $Na^+$ ) снаружи больше, внутри меньше
Проницаемость мембраны	мембрана проницаема для ионов калия ( $K^+$ )	мембрана проницаема для ионов ( $Na^+$ )
Ионные токи	калиевый и натриевый токи уравновешивают друг друга (состояние устойчивого равновесия)	калиевый и натриевый токи не уравновешивают друг друга (состояние неустойчивого равновесия)

# СВОЙСТВА ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

При образовании ПД через  $1\text{мм}^2$  поверхности мембраны в клетку проникает **20000 ионов**  $\text{Na}^+$  и столько  $\text{K}^+$  покидает клетку. (Это  **$1/10^6$**  доля запаса ионов клетки)

Запас ионов  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$  хватит на  **$5 \cdot 10^5$  ПД** без подзарядки. Работа “ $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$  насоса” постоянно поддерживает градиент ионов  $\text{Na}^+$   $\text{K}^+$  внутри и вне клетки.

# ФАЗЫ РЕФРАКТЕРНОСТИ

## **Рефрактерность (невосприимчивость)**

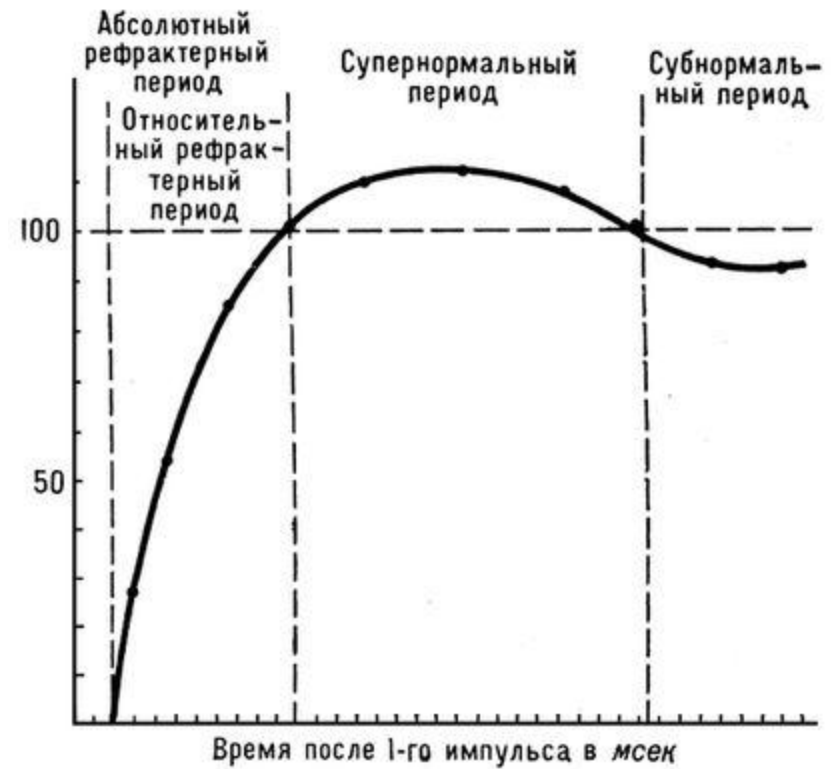
кратковременное полное или частичное исчезновение возбудимости нервной или мышечной ткани вслед за развитием потенциала действия.

## Рефрактерность (P) протекает в 4 фазы:

- Фаза абсолютной рефрактерности
- Фаза относительной рефрактерности
- Фаза экзальтации (супернормальный период)
- Фаза экзальтации (субнормальный период)



# ФАЗЫ РЕФРАКТЕРНОСТИ



# РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ

Нервные волокна разделяют на **безмякотные** (немиелинизированные) и **мякотные** (миелинизированные)

1. **Безмякотные** лишь погружены в толщу глиальных клеток – леммоцитов. Безмякотные принадлежат, в основном, к симпатической нервной системе.
2. **Мякотные** покрыты оболочками особых клеток глии – швановских клеток. Мякотные входят в состав нервов, снабжающих органы чувств и скелетную мускулатуру.

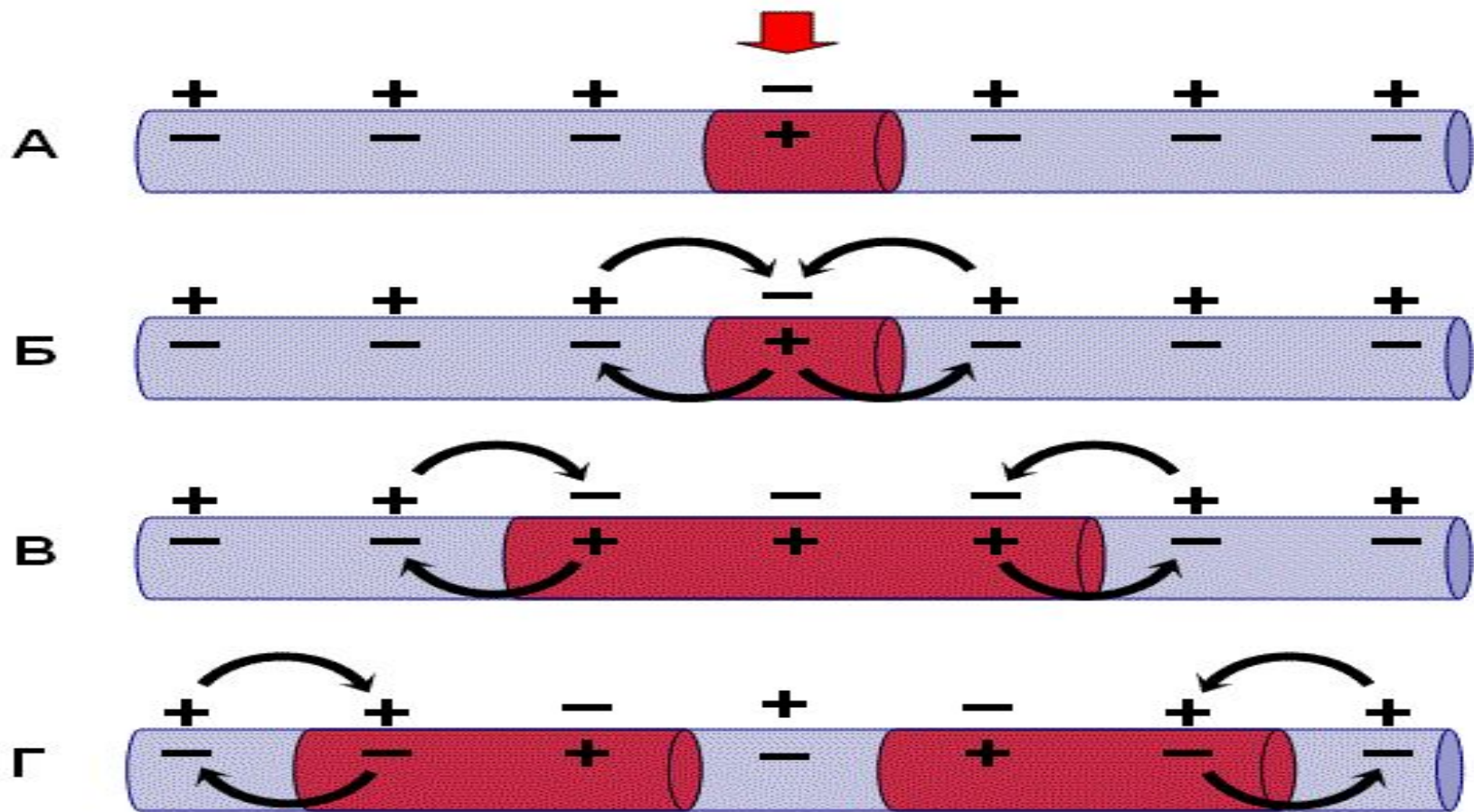
Функции миелиновой оболочки:

- питание нервного волокна
- изоляция.

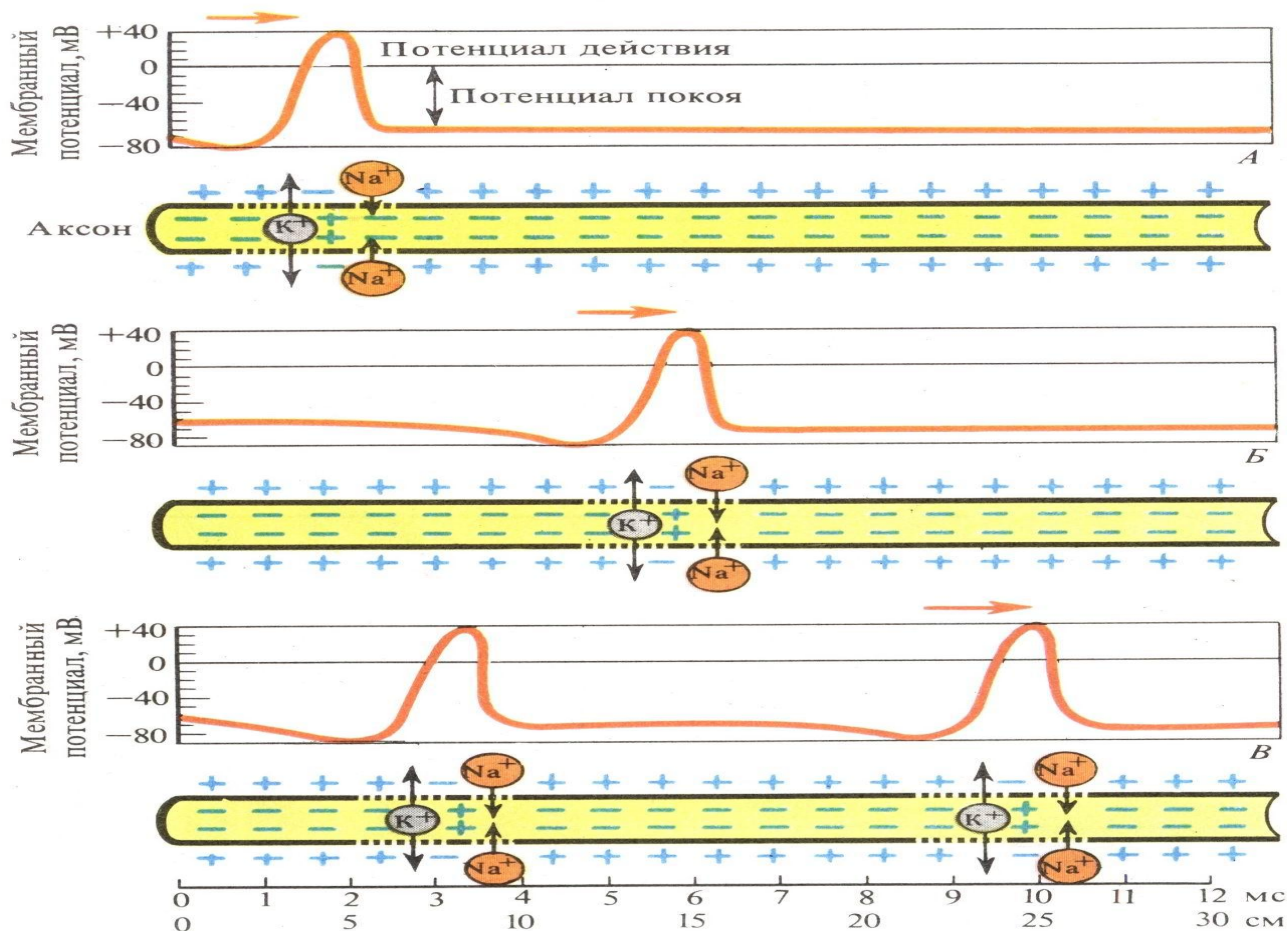
# Скорость проведения возбуждения по нервным волокнам

- Нервные волокна по скорости проведения возбуждения делятся на три типа: **A**, **B**, **C**
- **Волокна типа A** - покрыты миелином, толстые, проводят возбуждение к скелетным мышцам. Скорость - **70 - 120 м/сек.**
- **Волокна типа B** - покрыты миелином, тонкие, преганглионарные волокна вегетативной нервной системы - **3 - 18 м/сек**
- **Волокна типа C** - безмякотные - волокна симпатической нервной системы - **до 3 м/сек**

# Проведение возбуждения (ПД) по безмиелиновому (безмякотному) нервному волокну – «эстафетный»

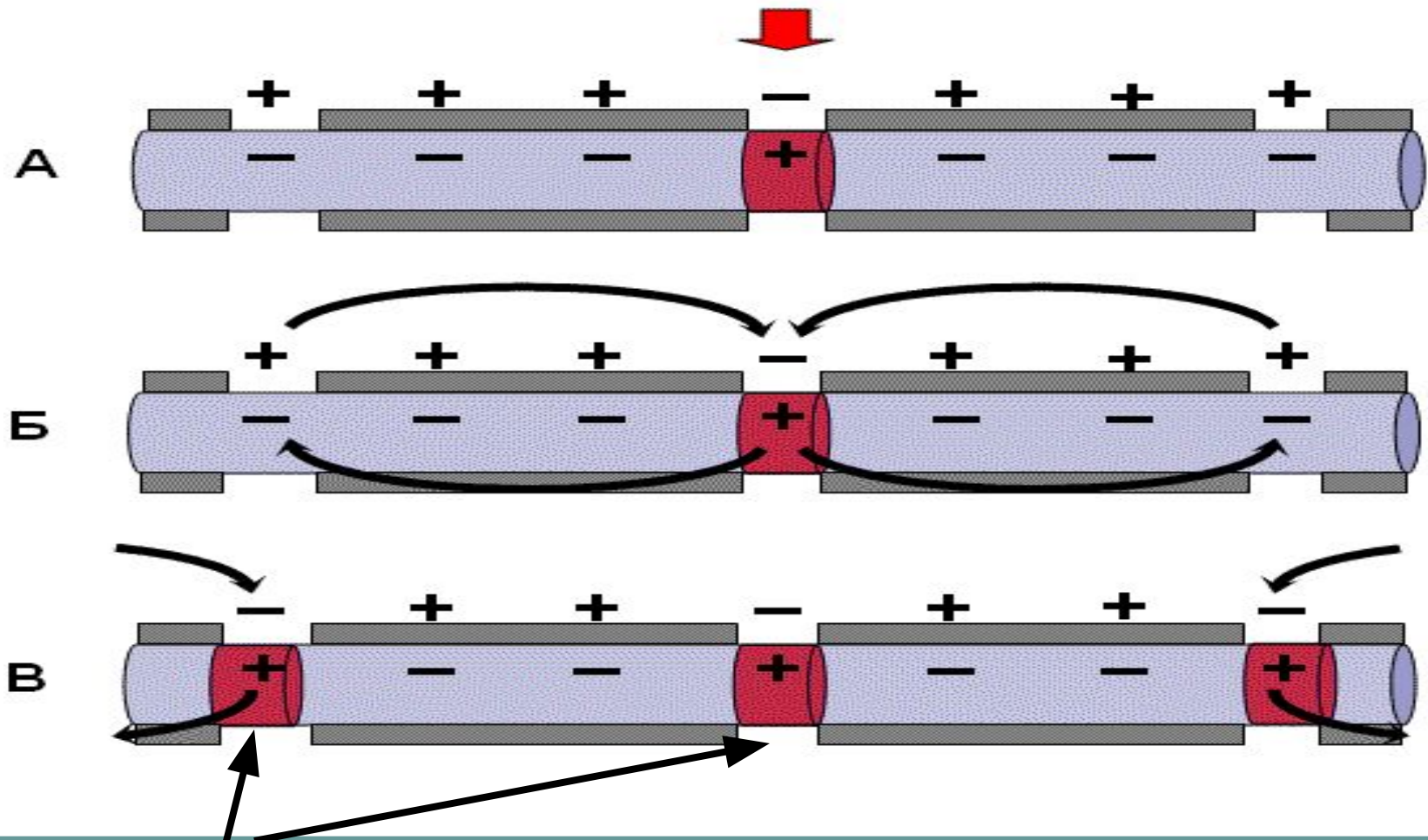


# Проведение ПД по безмиелиновому нервному волокну, мембране мышцы



ПД проводится от «точки» возникновения к каждому следующему участку мембраны.

Проведение возбуждения(ПД) по миелинизированному (мякотному) нервному волокну – «сальтаторно»- прыжками от возбужденного участка к невозбужденному



В **перехватах Ранвье** высокая плотность натриевых и калиевых каналов

# ГЕНЕЗ ЭЛЕКТРОГРАММ

# ЭЛЕКТРОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Функционирование живых клеток сопровождается возникновением мембранных потенциалов. Состояние клеток, тканей и органов связано с их электрической активностью.

Электрография (ЭГ) – регистрация БП тканей и органов с диагностической целью.

Электрограмма – это график зависимости изменения разности потенциалов от времени.



# Задачи электрографии

```
graph TD; A[Задачи электрографии] --> B[ПРЯМАЯ  
Выяснение механизма возникновения электрограммы]; A --> C[ОБРАТНАЯ  
(диагностическая)  
Определение характеристик электрической активности органа по измеренным потенциалам на поверхности тела];
```

## ПРЯМАЯ

Выяснение механизма возникновения электрограммы

## ОБРАТНАЯ

(диагностическая)

Определение характеристик электрической активности органа по измеренным потенциалам на поверхности тела

# Электрографические диагностические методы

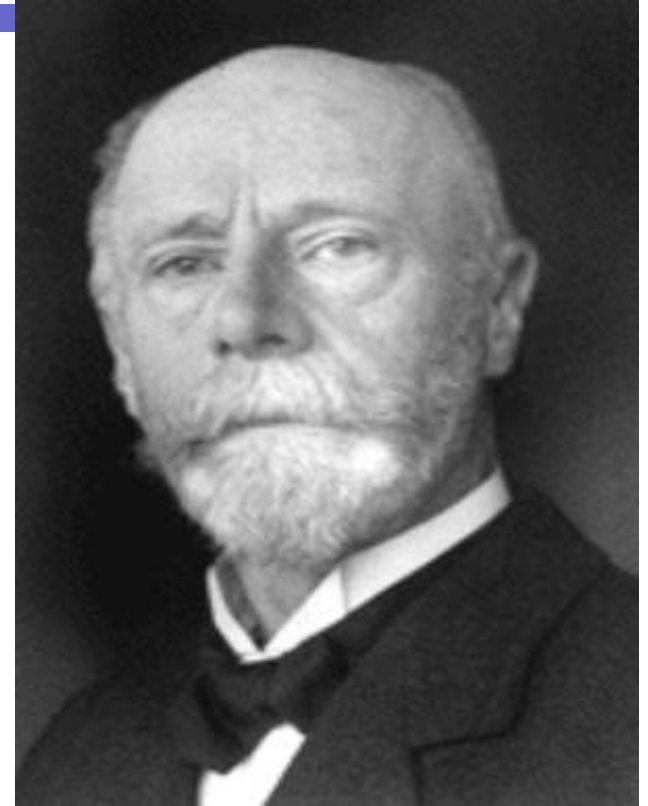
- **ЭКГ** – электрокардиография – регистрация на поверхности тела биопотенциалов, возникающих в сердечной мышце при ее возбуждении;
- **ЭРГ** – электроретинография – регистрация биопотенциалов сетчатки глаза, возникающих в результате воздействия на глаз;
- **ЭЭГ** – электроэнцефалография – регистрация биоэлектрической активности головного мозга;
- **ЭМГ** – электромиография – регистрация биоэлектрической активности мышц

# Характеристики биопотенциалов

Биопотенциал	Интервал частот, Гц	Амплитуда сигналов, отводимых с поверхности кожных покровов, мВ
ЭКГ	0,2 – 120	0,3 – 3,0
ЭЭГ	1 – 300	0,005 – 0,3
ЭМГ	3 – 600	0,03 – 1,5
ЭРГ	0,05 – 0,2	0,2 – 1,0

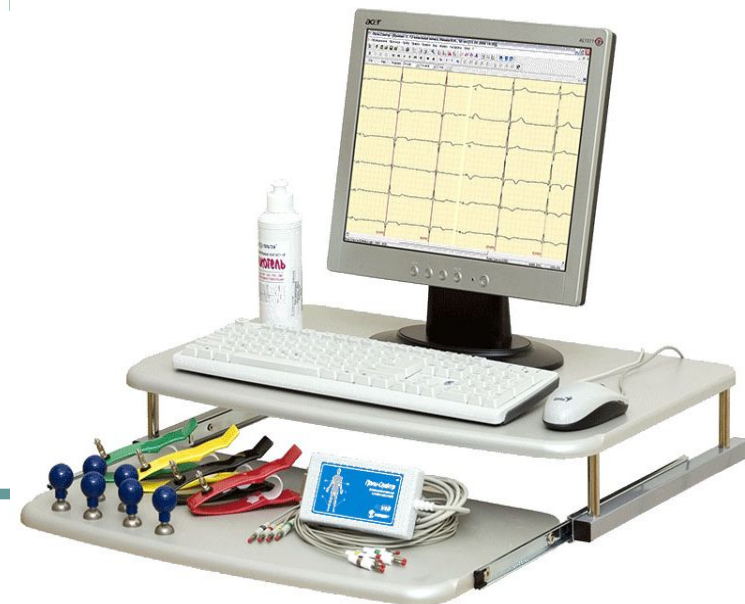
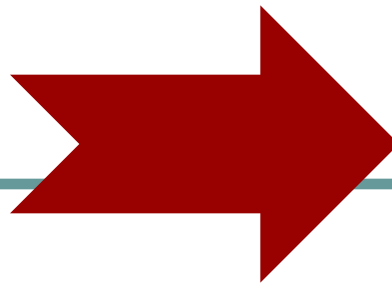
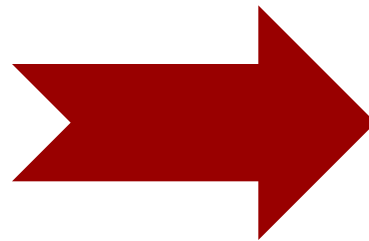
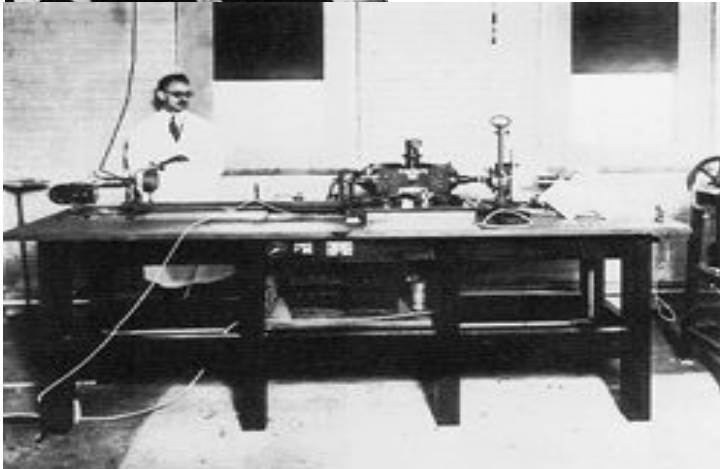
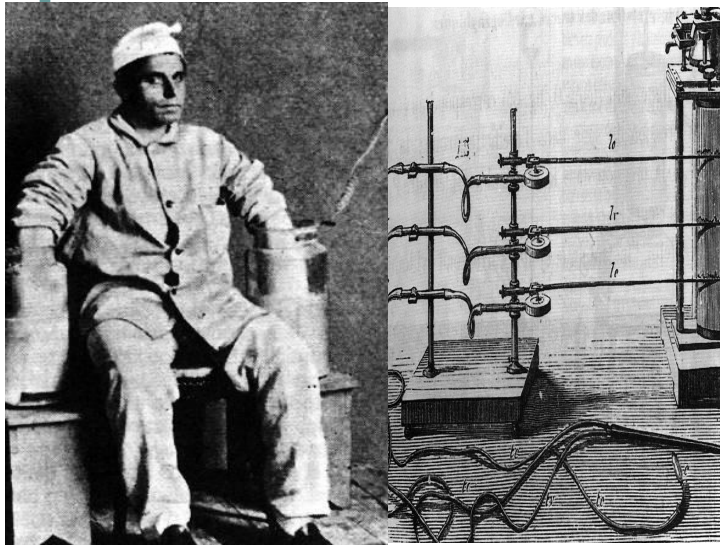
# ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ЭКГ

•Наличие электрических явлений в сердечной мышце впервые обнаружили два немецких ученых: **Р. Келликер** и **И. Мюллер** в **1856** г. В **1873** английский физиолог **А. Уоллер** впервые получил запись электрической активности миокарда человека. Он впервые сформулировал основные положения электрофизиологических понятий ЭКГ, предположив, что сердце является диполем. Первым, кто вывел ЭКГ из стен лабораторий во врачебную практику, был голландский физиолог **Виллем Эйнтховен**. После 7 лет упорного труда, он создал первый электрокардиограф, правда он был очень громоздким сооружением и весил около 270 кг. Его обслуживанием было занято 5 сотрудников. Однако, результаты, полученные Эйтховеном, были революционными. Впервые в руках врача оказался прибор, который так много говорит о состоянии сердца. Схема размещения электродов на руках и ногах предложенная Эйтховеном, используется и по сей день. В 1924 ему была присвоена **Нобелевская премия**.

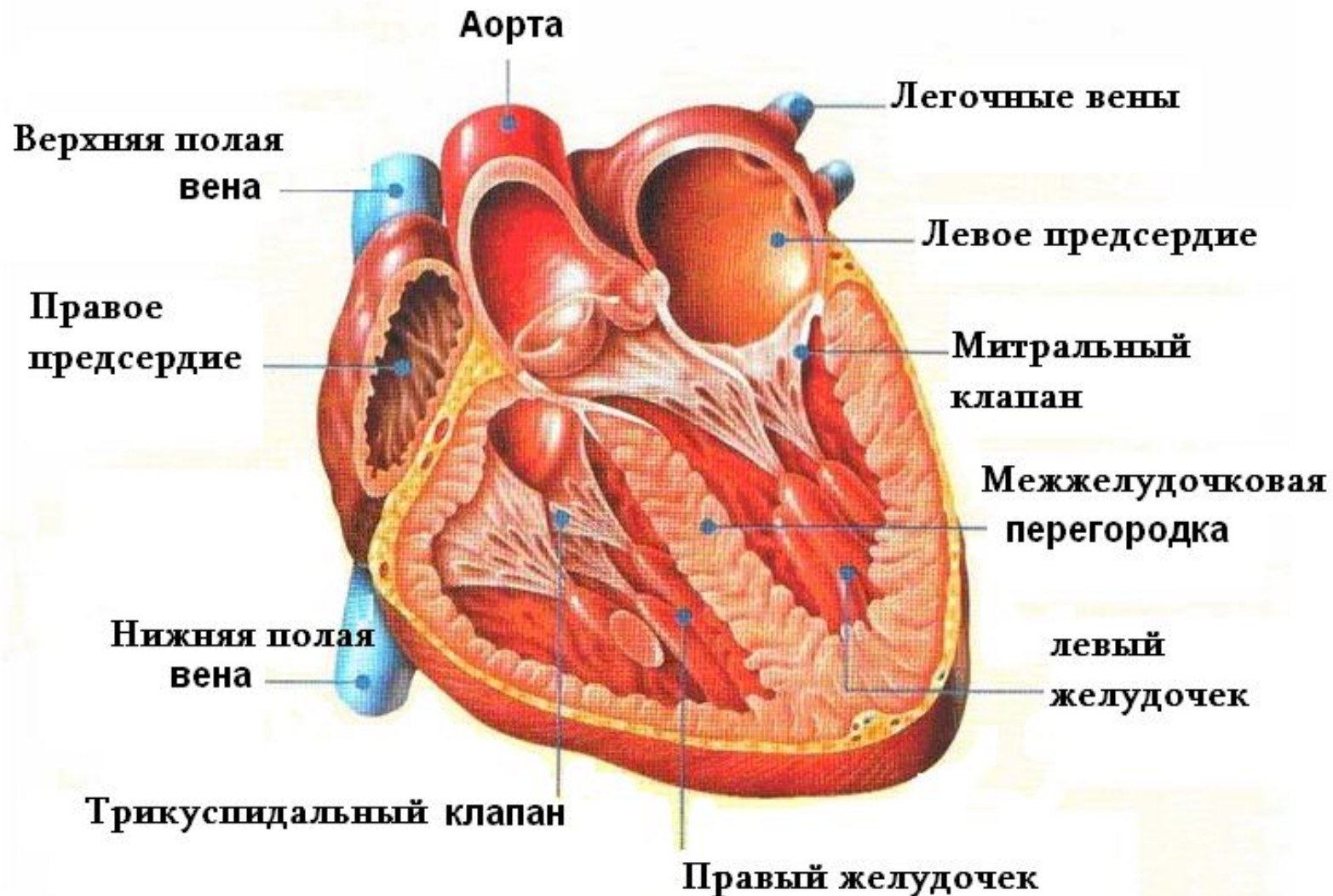


**Виллем Эйнтховен**  
(1860 -1927)

# ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИИ

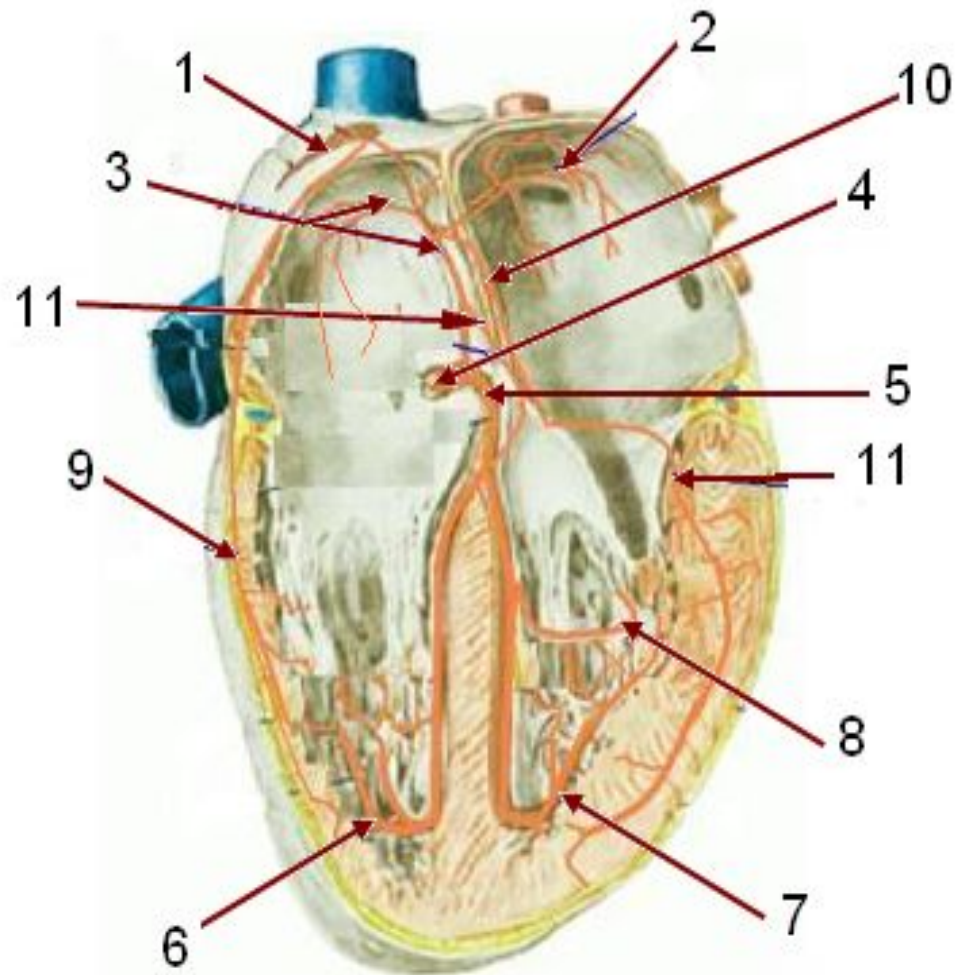


# СТРОЕНИЕ СЕРДЦА

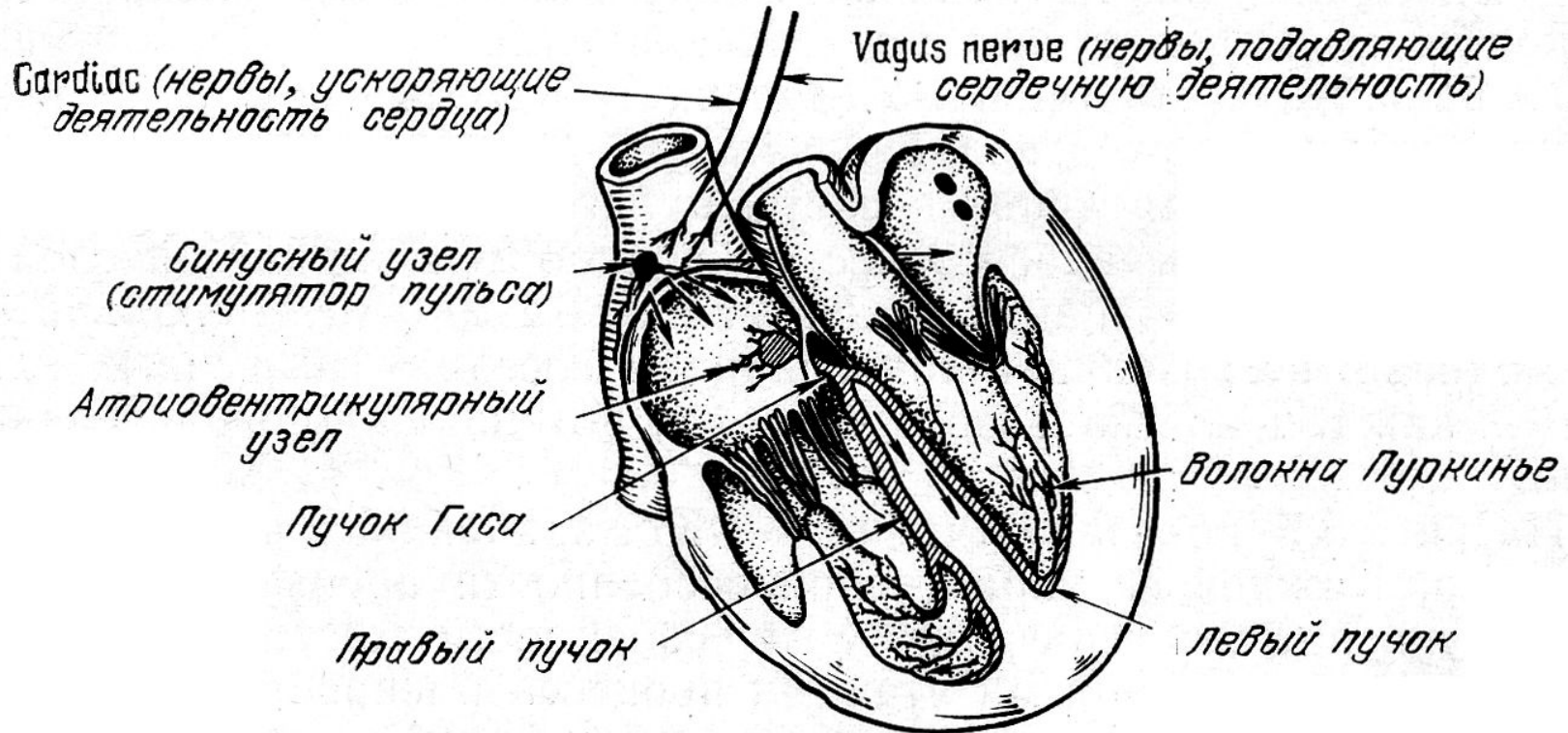


# Схема проводящей системы сердца

- 1 - синусно-предсердный узел;
- 2 - межпредсердный пучок Бахмана;
- 3 - межузловые проводящие тракты (Бахмана, Венкебаха, Тореля);
- 4 - предсердно-желудочковый узел;
- 5 - пучок Гиса;
- 6 - правая ножка пучка Гиса;
- 7 - передняя ветвь левой ножки пучка Гиса;
- 8 - задняя ветвь левой ножки пучка Гиса;
- 9 - пучок Кента;
- 10 - пучок Джеймса;
- 11 - пучок Махейма



# Распространение возбуждения по миокарду



Процесс распространения возбуждения по миокарду имеет сложную пространственную и временную зависимость.

Синусовый узел → по миокарду предсердий → атриовентрикулярный узел → по ножкам пучка Гиса → волокна Пуркинье → сократительный миокард желудочков



# ПРОВОДЯЩАЯ СИСТЕМА СЕРДЦА

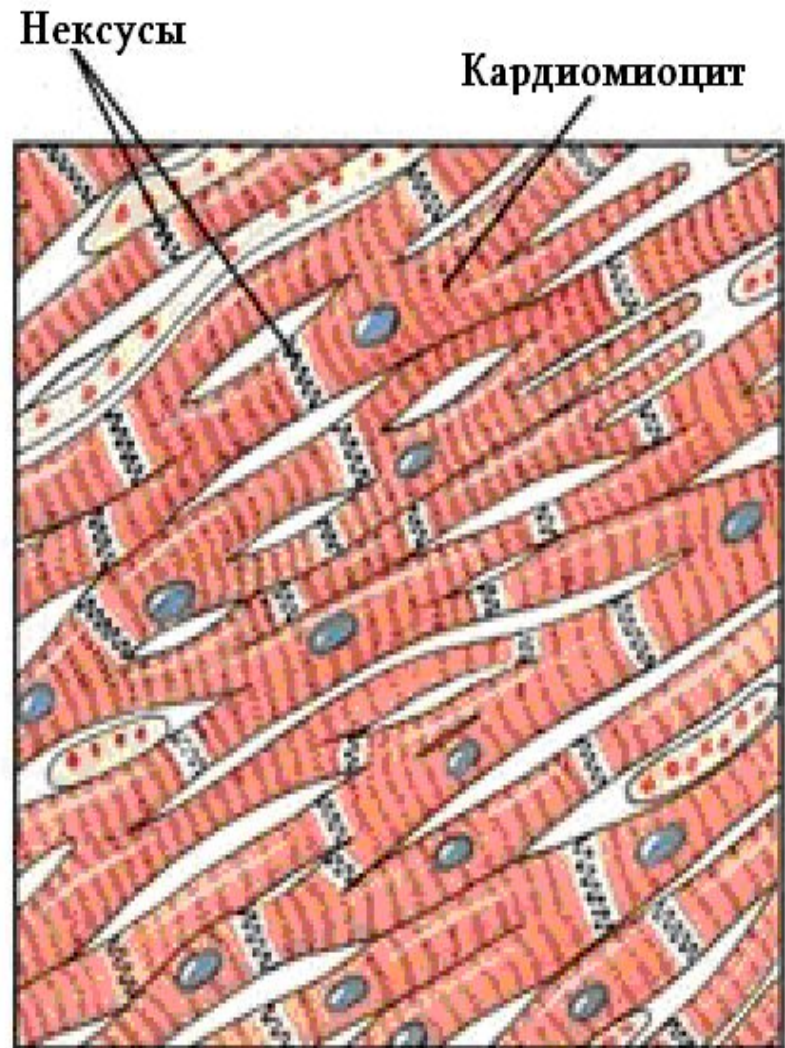
- **В состав проводящей системы входят:**
- синусный узел (синусно-предсердный, синоатриальный), который находится возле места впадения полых вен в правое предсердие. От синусного узла к ушку левого предсердия идет межпредсердный пучок Бахмана. А ко второму узлу проводниковой системы - предсердно-желудочкового (атриовентрикулярного) - идут междуузловые ведущие тракты (пучки Бахмана, Венкебаха и Тореля). От атриовентрикулярного узла идет межжелудочковой перегородкой пучок Гиса (предсердно-желудочковый пучок), который делится на две ножки правую и левую. Левая ножка в свою очередь делится на переднюю и заднюю ветви. Правая ножка и ветви левой ножки переходят в волокна Пуркинье.
- Кроме основных элементов ведущей системы есть дополнительные ее элементы: пучок Кента, пучок Джеймса и пучок Махейма. Эти пучки могут проводить возбуждение из предсердий к желудочкам. Пучок Кента может проводить возбуждение от предсердий, в обход атриовентрикулярного узла, к правому желудочку. Пучок Джеймса может импульсы из предсердий проводить к пучку Гиса в обход атриовентрикулярного узла. Пучок Махейма может импульсы от атриовентрикулярного узла, обходя пучок Гиса и ниже лежащие отделы, нести к левому желудочку.

# МОРФО- ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ СЕРДЦА

Стенка сердца состоит из трех слоев:

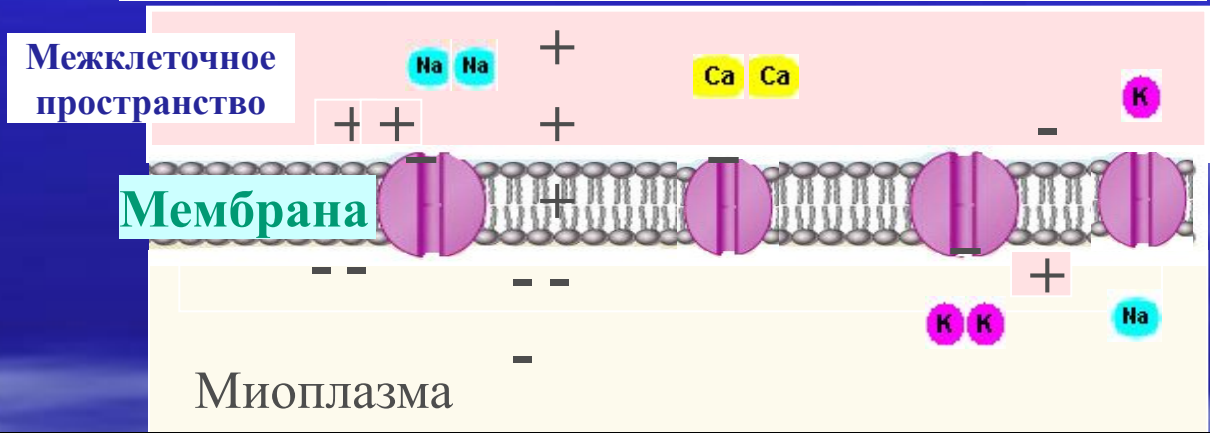
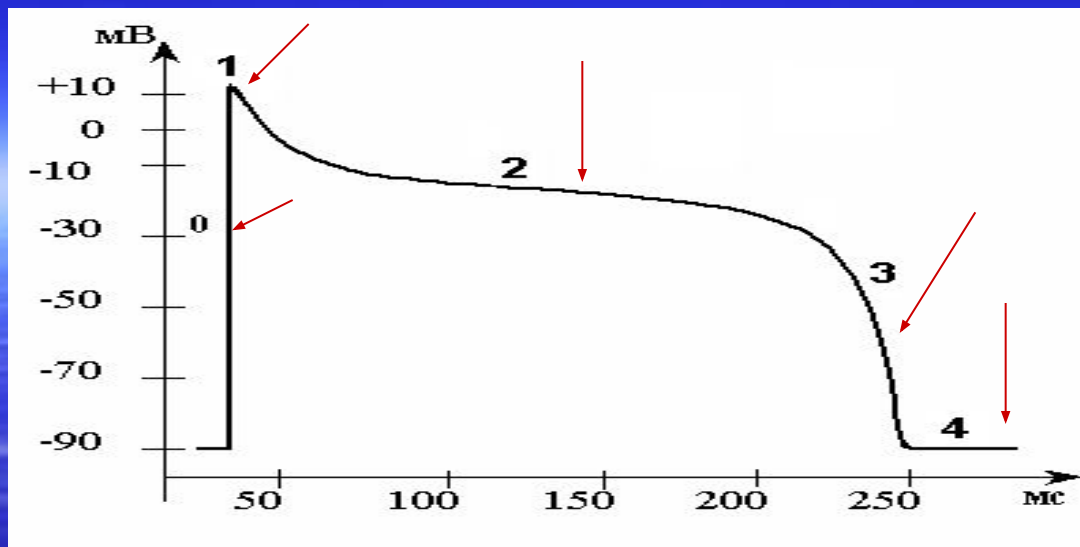
- эндокарда
- миокарда
- Эпикарда

Миокард образуется из отдельных мышечных волокон, которые состоят из последовательно соединенных (конец в конец) клеток-кардиомиоцитов, которые имеют общую мембрану, это так называемые нексусы. Нексусы обеспечивают функциональную однородность (функциональный синцитий).



# Электрофизиологические свойства клеток сократительного миокарда

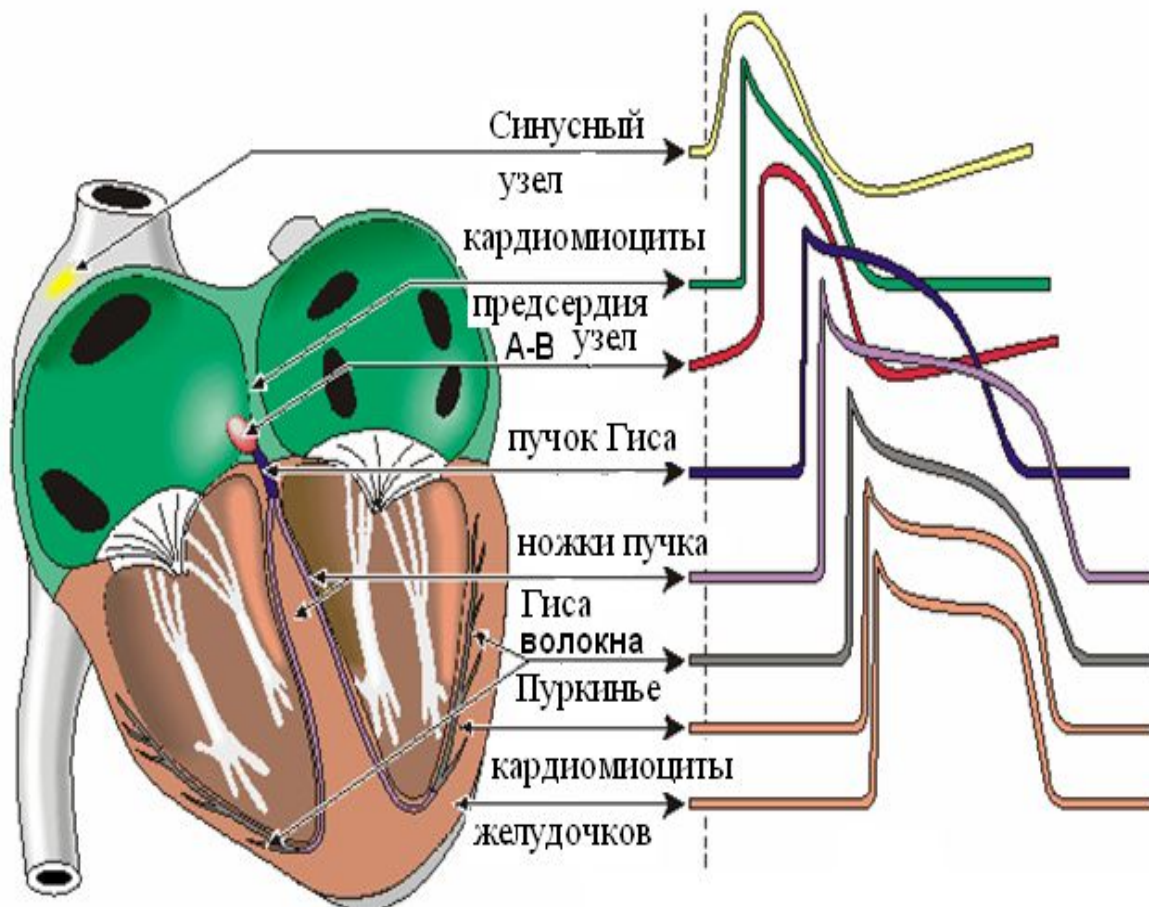
- **Уровень потенциала покоя у сократительных кардиомиоцитов находится в границах  $-90$  -  $-95$  мВ и является стабильным. Потенциал покоя клеток сократительного миокарда создается ионами  $K^+$  и  $Cl^-$ , однако в отличие от фазных поперечно-полосатых мышц, хлорная проницаемость мембраны сравнительно с калиевой очень мала.**
- **Потенциал действия сократительных кардиомиоцитов разделяют на такие фазы: быстрой деполяризации, начальной реполяризации, медленной реполяризации (плато) и быстрой конечной реполяризации.**



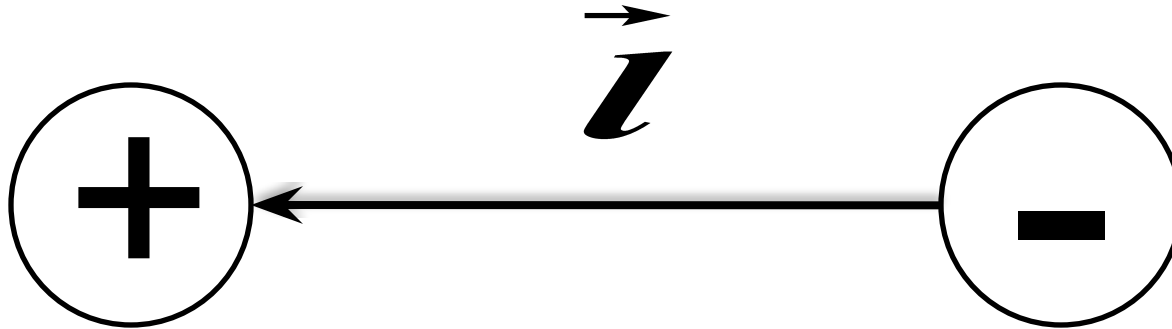
фаза 0 - быстрое открытие Na<sup>+</sup> -каналов, лавинообразный вход Na<sup>+</sup> в клетку;  
 фаза 1 - уменьшение проницаемости для Na<sup>+</sup>, с одновременным ее повышением для K<sup>+</sup> и Cl<sup>-</sup>. фаза 2 - в клетку входит Ca<sup>2+</sup> через медленные Ca<sup>2+</sup>-каналы, что предопределяет длительную реполяризацию, фаза 3 - постепенное закрытие Ca<sup>2+</sup>-каналов, при открытии кальцийвозбудимых K<sup>+</sup>-каналов, что предопределяет выход K<sup>+</sup> из клетки, фаза 4 - происходит возобновление исходных концентраций ионов в клетке и вне ее.

# ПОТЕНЦИАЛЫ ДЕЙСТВИЯ РАЗНЫХ ОТДЕЛОВ СЕРДЦА

Явление, при котором структуры с замедленным ритмом генерации потенциалов действия усваивают более частый ритм других участков проводящей системы называется усвоением ритма.



**Электрический диполь** - это система двух равных по модулю и противоположных по знаку точечных зарядов.



Плечо диполя – расстояние между точечными зарядами

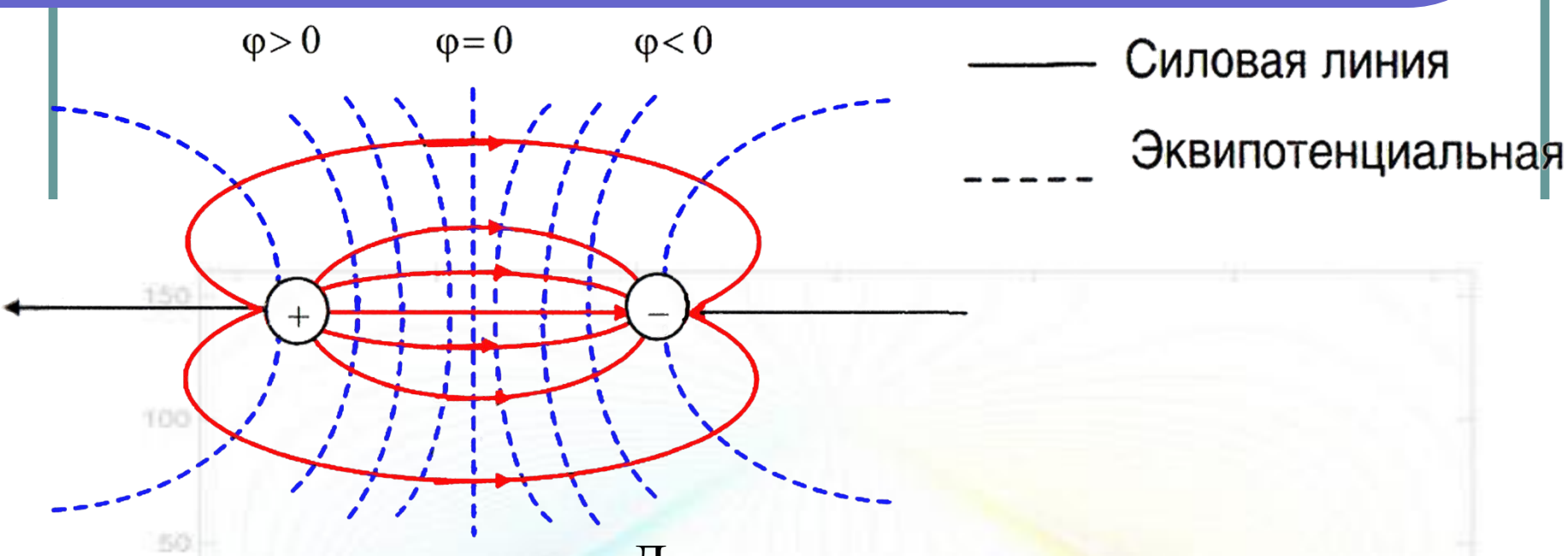
Основная характеристика диполя – дипольный момент:

$$\vec{P} = q \cdot \vec{l}$$

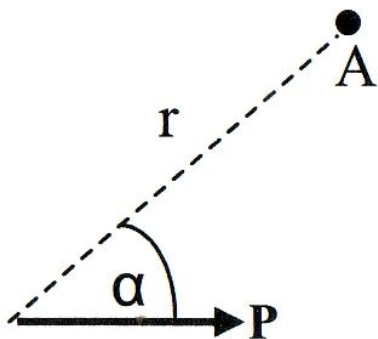
$q$  - величина заряда  
 $l$  - плечо диполя

$$[P] = [Кл \cdot м]$$

# Электрическое поле диполя



Диполь и его электрическое поле

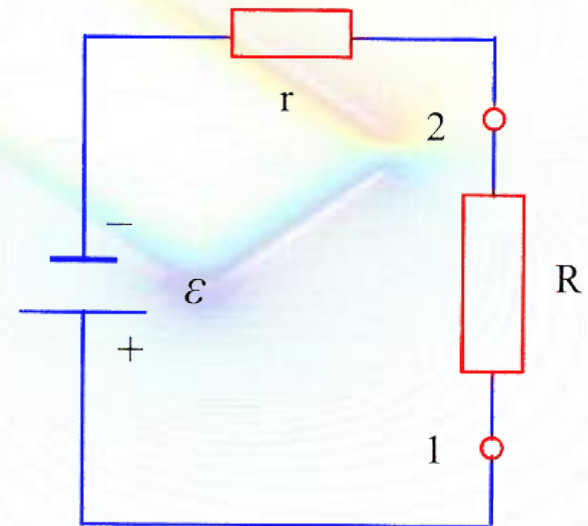
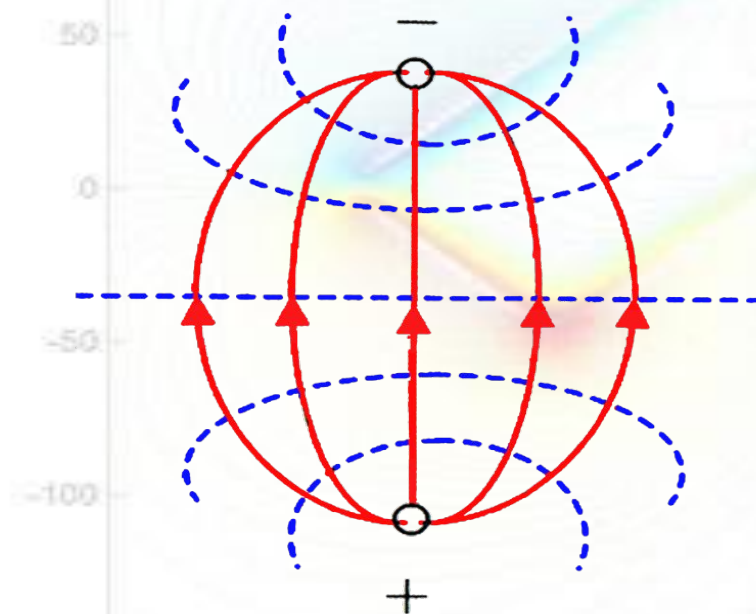
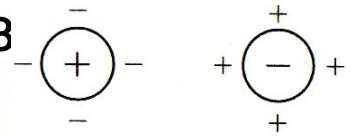


$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \cdot \frac{P \cos \alpha}{r^2}$$

Потенциал электрического поля, созданного диполем

# ТОКОВЫЙ ДИПОЛЬ

- Двухполюсная система в проводящей среде, состоящая из истока и стока тока, называется **дипольным электрическим генератором** или **токовым диполем**.
- Расстояние между истоком и стоком тока наз **плечом токового диполя**.



Токовый диполь и его эквивалентная электрическая схема



$P_T$  Электрический момент токового диполя  
меняется беспрестанно.

**Потенциал** электрического поля **токового** диполя:  
(дипольного электрического генератора).

$$\varphi = \frac{P_T \cdot \cos \alpha}{4\pi\gamma r^2} \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{P_T \cos \alpha}{r^2}$$

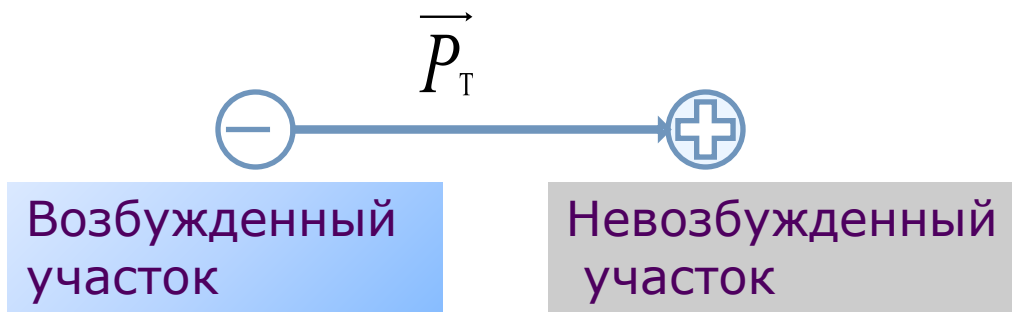
$\rho$ -удельное сопротивление

Где  $\gamma$  удельная электропроводимость,  
характеризует проводящие свойства среды.

Электрический момент ТОКОВОГО ДИПОЛЯ:

$$\vec{P}_T = I \cdot \vec{l} \quad [A \cdot M]$$

Направлен от **минуса к плюсу** –  
**от возбужденного** участка к  
невозбужденному.



# Представление об эквивалентном электрическом генераторе тканей и органов

Биопотенциал органа отличен от биопотенциала клетки, так как

$$\text{БП}_{\text{органа}} = \sum \text{ПД}_{\text{отдельных клеточных элементов}}$$

Очень трудно описать изменения во времени. Надо учитывать не только  $I$  и  $L$  каждого из диполей, но и фазовые сдвиги между биопотенциалами под электродами. Поэтому **для оценки функционального состояния органа по его электрической активности используют принцип эквивалентного генератора.**

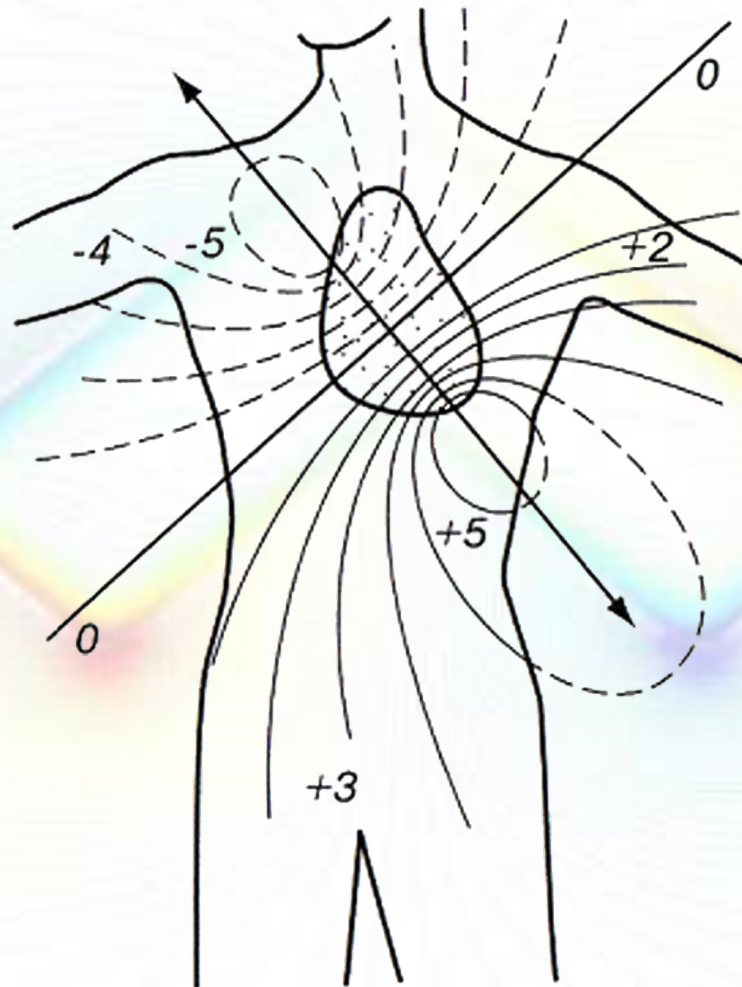
# Принцип эквивалентного генератора

Он состоит в том, что **изучаемый орган**, состоящий из множества клеток, возбуждающихся в различные моменты времени, **представляется моделью единого эквивалентного генератора**, который находится **внутри!** организма. Этот генератор создает на **поверхности!** тела электрическое поле, которое *изменяется в соответствии с изменением электрической активности изучаемого органа.*

# Поле токового диполя сердца

В любую фазу сердечной деятельности в сердце существуют возбужденные (-) и невозбужденные (+) участки, между ними возникают электрические силовые линии, которые распространяются по поверхности грудной клетки.

При этом разность потенциалов может быть зарегистрирована между отдельными частями тела.

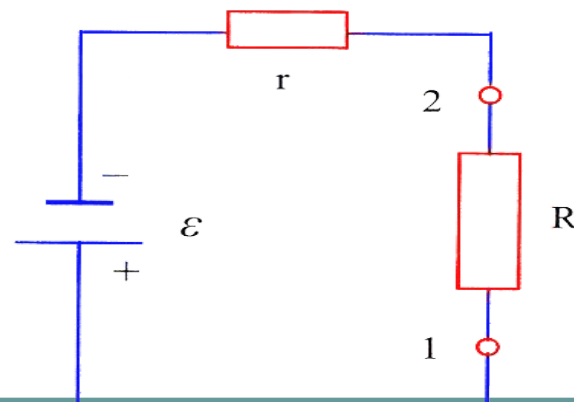
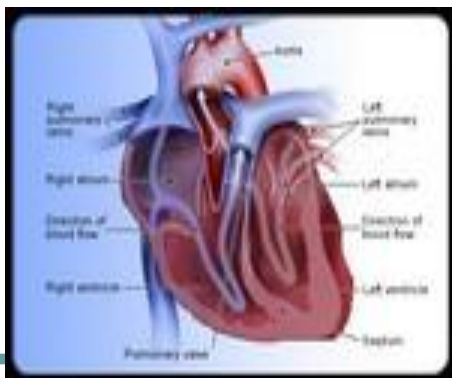


Распределение **силовых (сплошные)** и **эквипотенциальных (прерывистые)** линий на поверхности тела

## Что означает термин «эквивалентный»?

Термин «эквивалентный» означает, что это воображаемый генератор создает на поверхности тела такое распределение биопотенциалов, как и реальный орган.

*ПРИМЕР:* В теории Эйнтховена **сердце**, клетки которого возбуждаются в сложной последовательности, представляется **ТОКОВЫМ ДИПОЛЕМ**. Он и является **ЭКВИВАЛЕНТНЫМ генератором**.

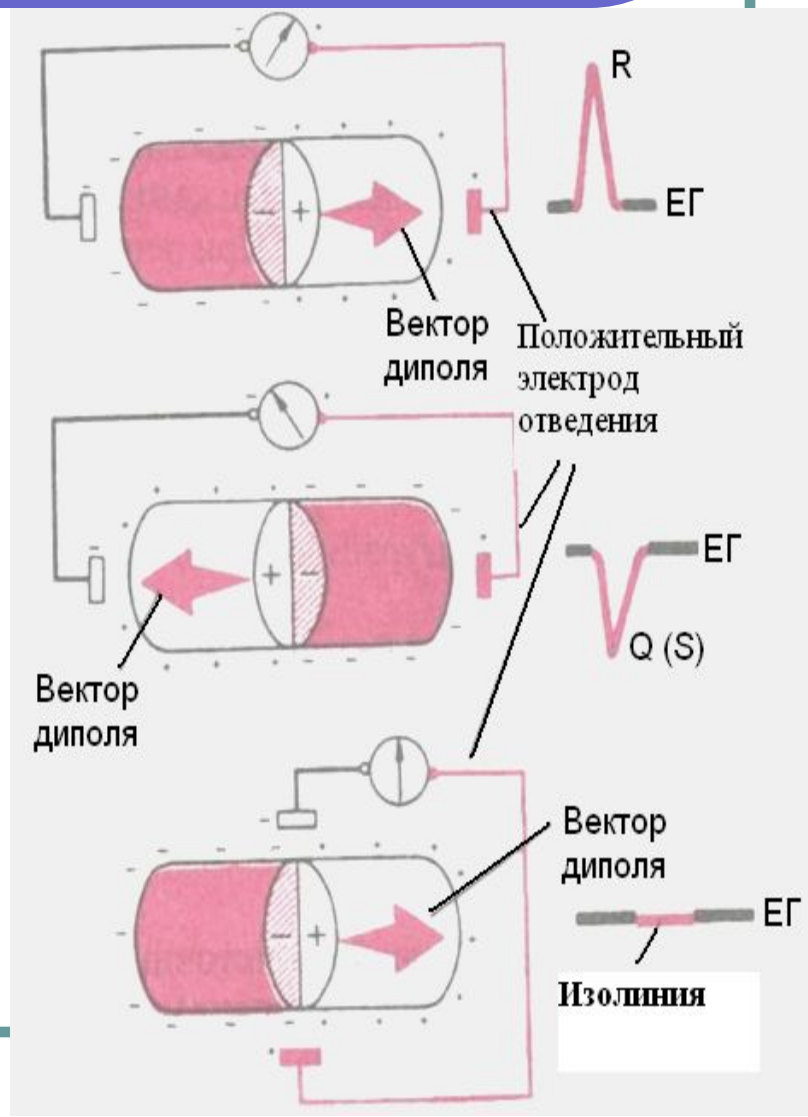


# Основные постулаты модели Эйнтховена

- Сердце есть токовый диполь с дипольным моментом (электрический вектор сердца - ЭВС)
- ЭВС находится в однородной проводящей среде, которой являются ткани организма
- ЭВС меняется по величине и направлению в соответствии с фазами возбуждения
- Существует связь между ЭВС и разностью потенциалов между точками на поверхности тела

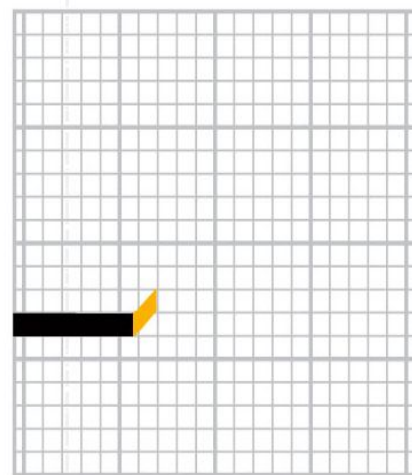
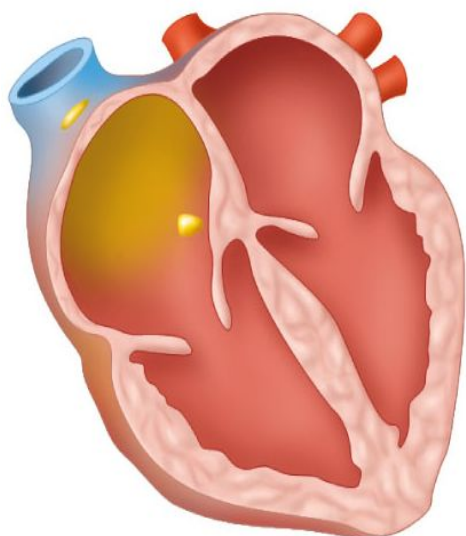
Чтобы описать как будет выглядеть электрограмма при любых направлений движения волны де – и реполяризации надо помнить три правила:

- 1. Если вектор диполя направлен в сторону положительного электрода отведения, то на электрограмме мы получим положительный зубец.
- 2. Если вектор диполя направлен в сторону отрицательного электрода отведения, то на электрограмме получим отрицательный зубец.
- 3. Если вектор диполя расположен перпендикулярно оси отведения, то на электрограмме записывается изолиния.





# ФОРМИРОВАНИЕ ЭКГ

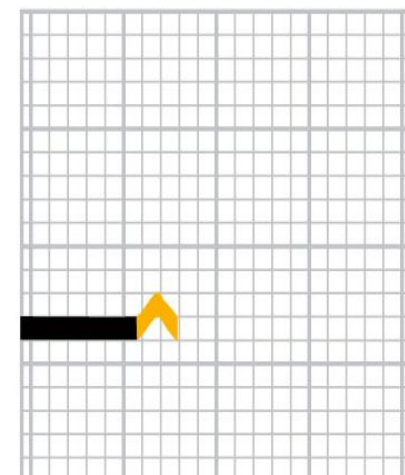
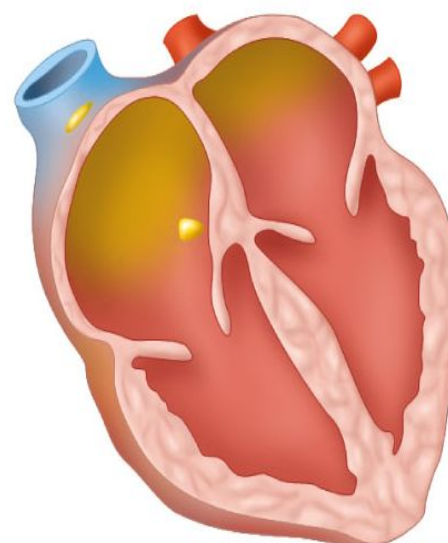


(a)

 Деполяризация

 Реполяризация

**Деполяризация правого  
предсердия (восходящее  
колесо зубца P) (a)**



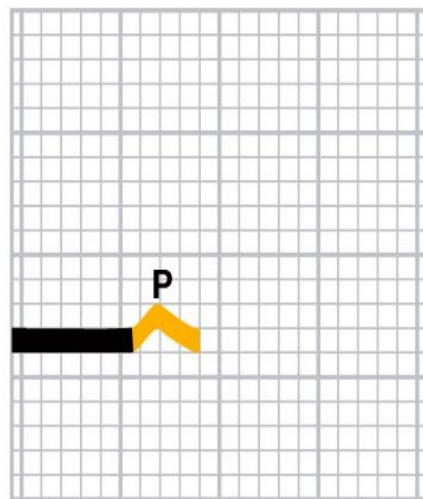
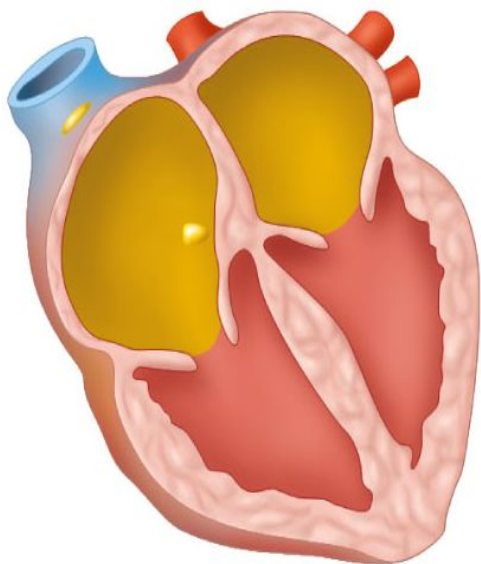
(b)

 Деполяризация

 Реполяризация

**Деполяризация левого  
предсердия (нисходящее колесо  
зубца P) (b)**

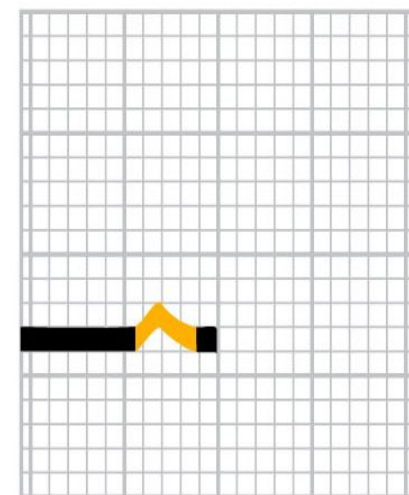
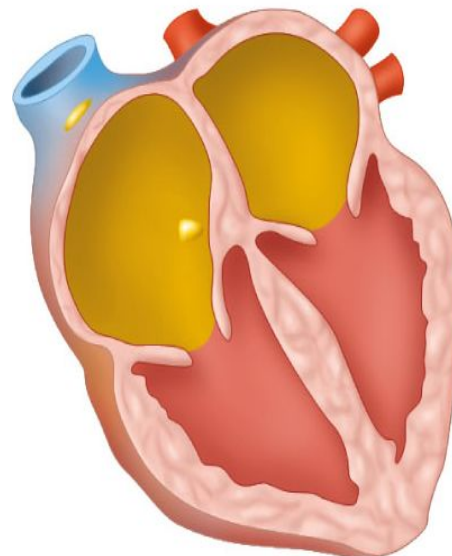
# ФОРМИРОВАНИЕ ЭКГ



(c)

 Деполяризация

 Реполяризация



(d)

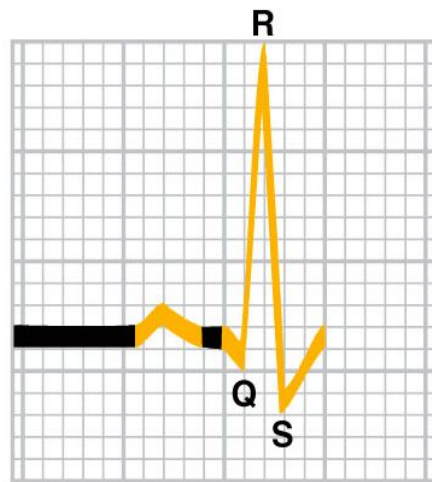
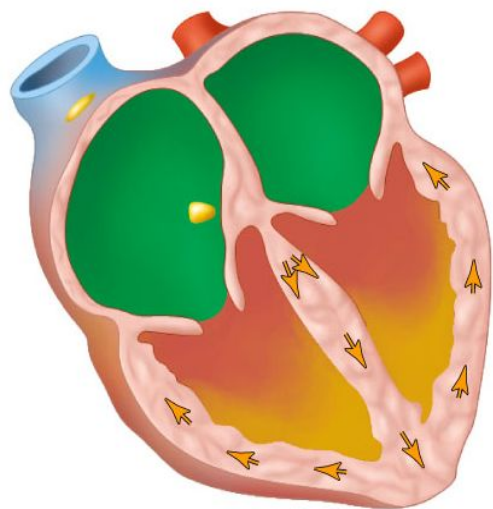
 Деполяризация

 Реполяризация

**Завершение деполяризации  
предсердий (c)**

**Задержка проведения  
возбуждения в А-В-узле (d)**

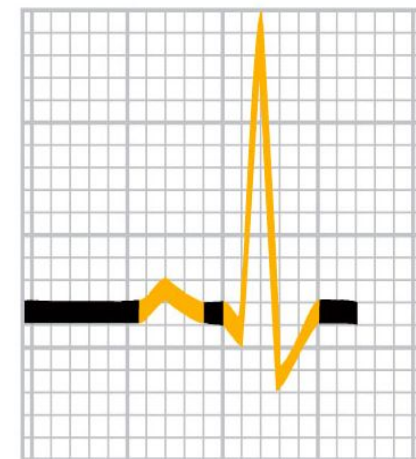
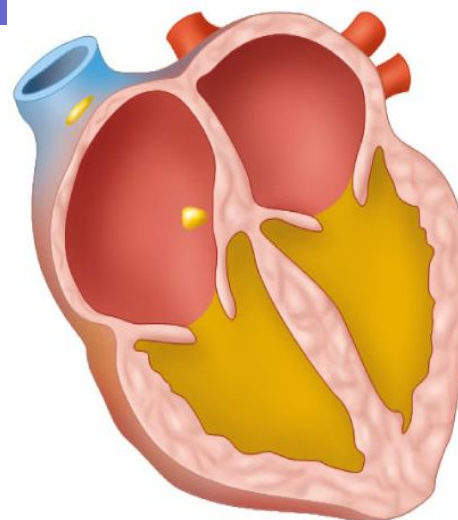
# ФОРМИРОВАНИЕ ЭКГ



(e)

 Деполяризация

 Реполяризация



(f)

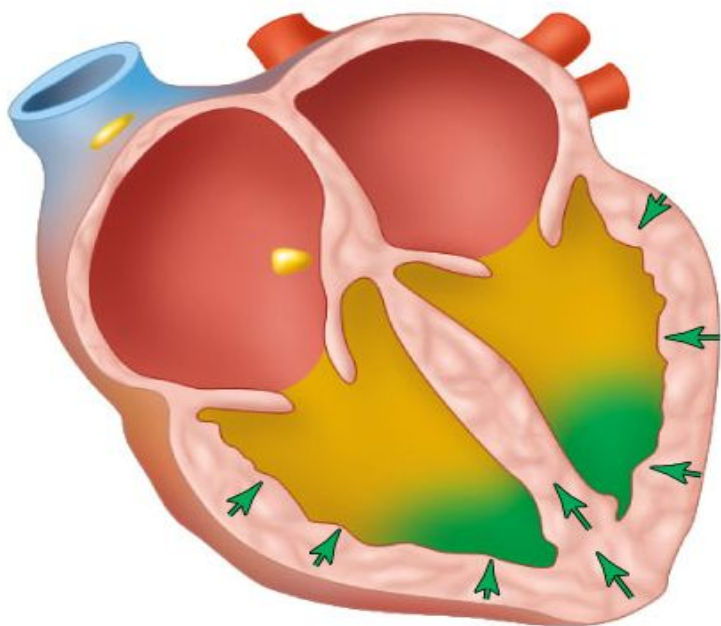
 Деполяризация

 Реполяризация

Деполяризация межжелудочковой перегородки (зубец Q), боковых стенок правого и левого желудочков (зубец R) и базальных отделов обеих желудочков и верхней трети межжелудочковой перегородки (зубец S) (e)

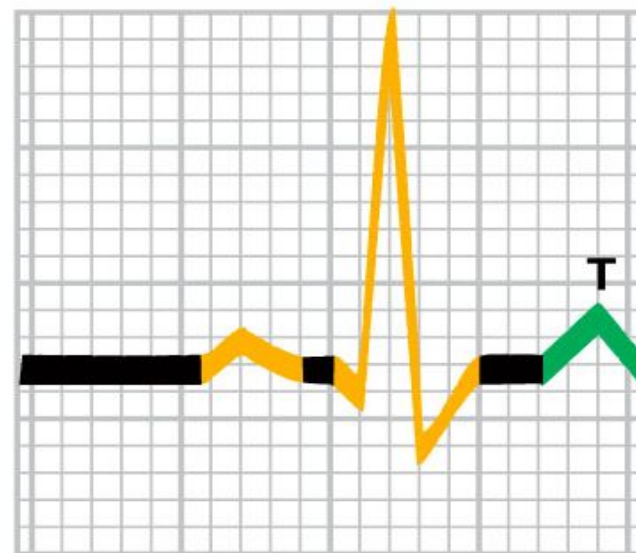
Полный охват возбуждением миокарда желудочков (сегмент S-T) (f)

# ФОРМИРОВАНИЕ ЭКГ



 Деполяризация

 Реполяризация



(g)

**Реполяризация желудочков (зубец T)**

# ФОРМИРОВАНИЕ ЭКГ

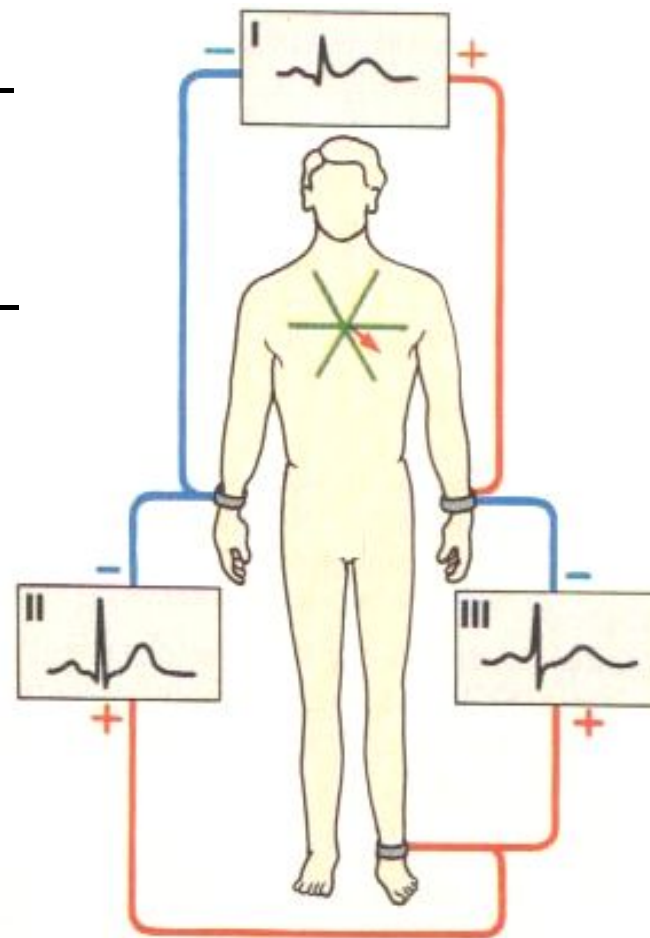


# ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКИЕ ОТВЕДЕНИЯ

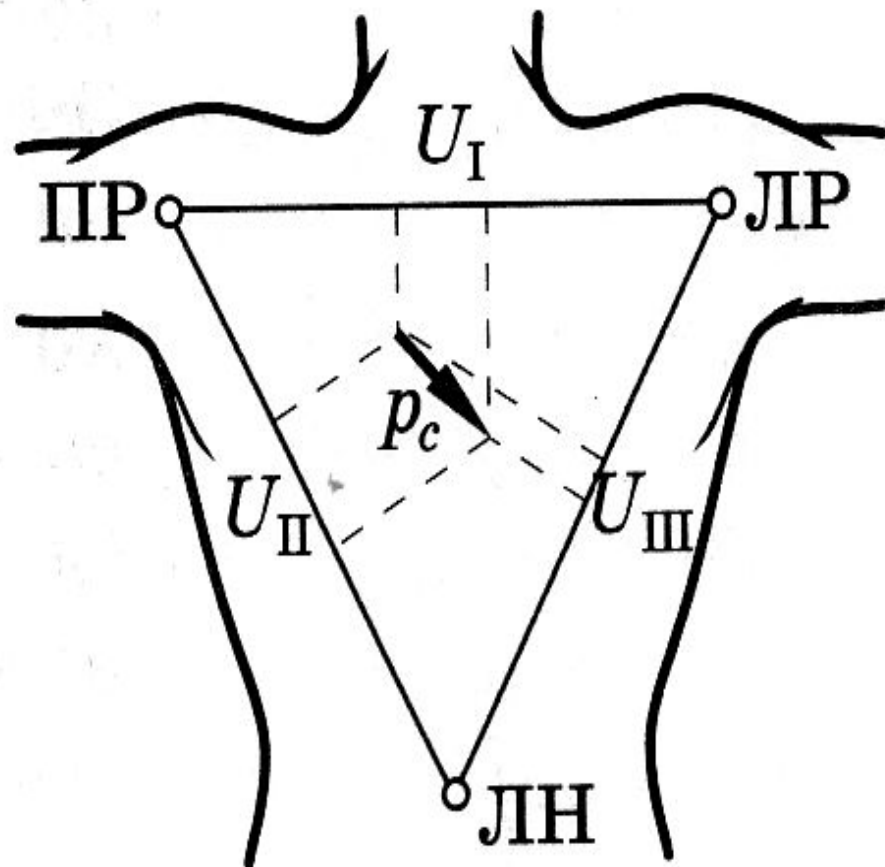
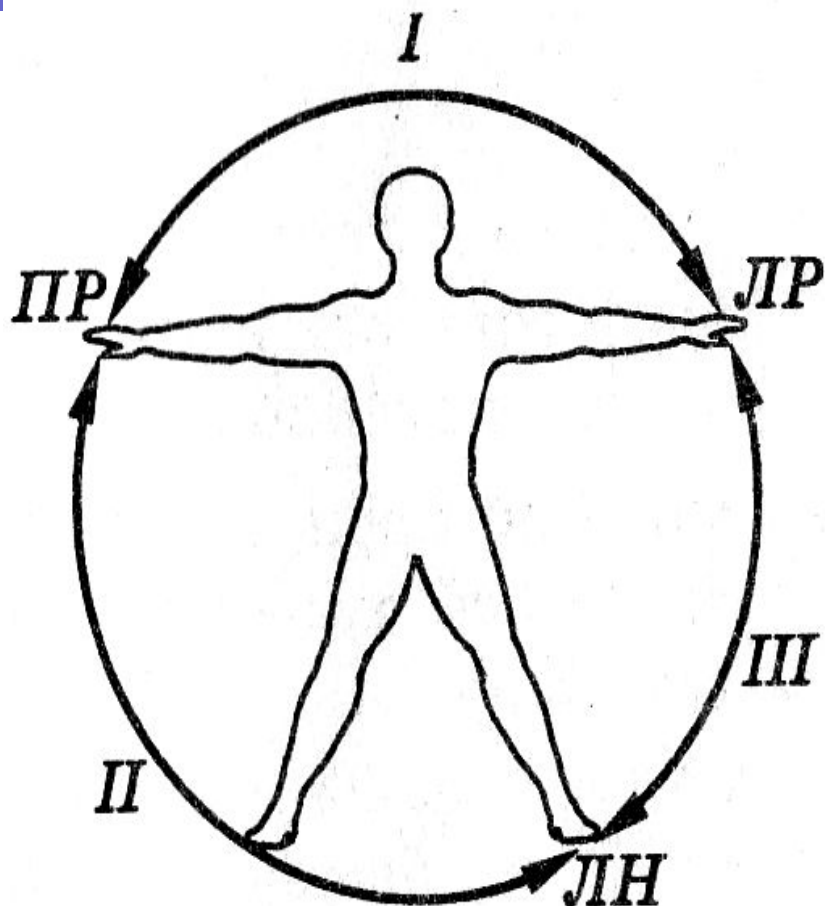
- Измерение разности потенциалов на поверхности тела, возникающей при работе сердца, записывается с помощью **различных отведений**. Один из электродов присоединяется к **положительному полюсу** гальванометра (это положительный или активный электрод), второй электрод - к его **отрицательному полюсу** (отрицательный электрод).
- В настоящее время в клинической практике наиболее широко используют **12 отведений ЭКГ**: **3 стандартных, 3 усиленных и 6 грудных**.

# СТАНДАРТНЫЕ ЭКГ-ОТВЕДЕНИЯ (ПО ЭЙНДХОВЕНУ)

- **I отведение** – (+) левая рука – (-) правая рука;
- **II отведение** – (+) левая нога – (-) правая рука;
- **III отведение** – (+) левая нога – (-) левая рука.



# Треугольник Эйтховена

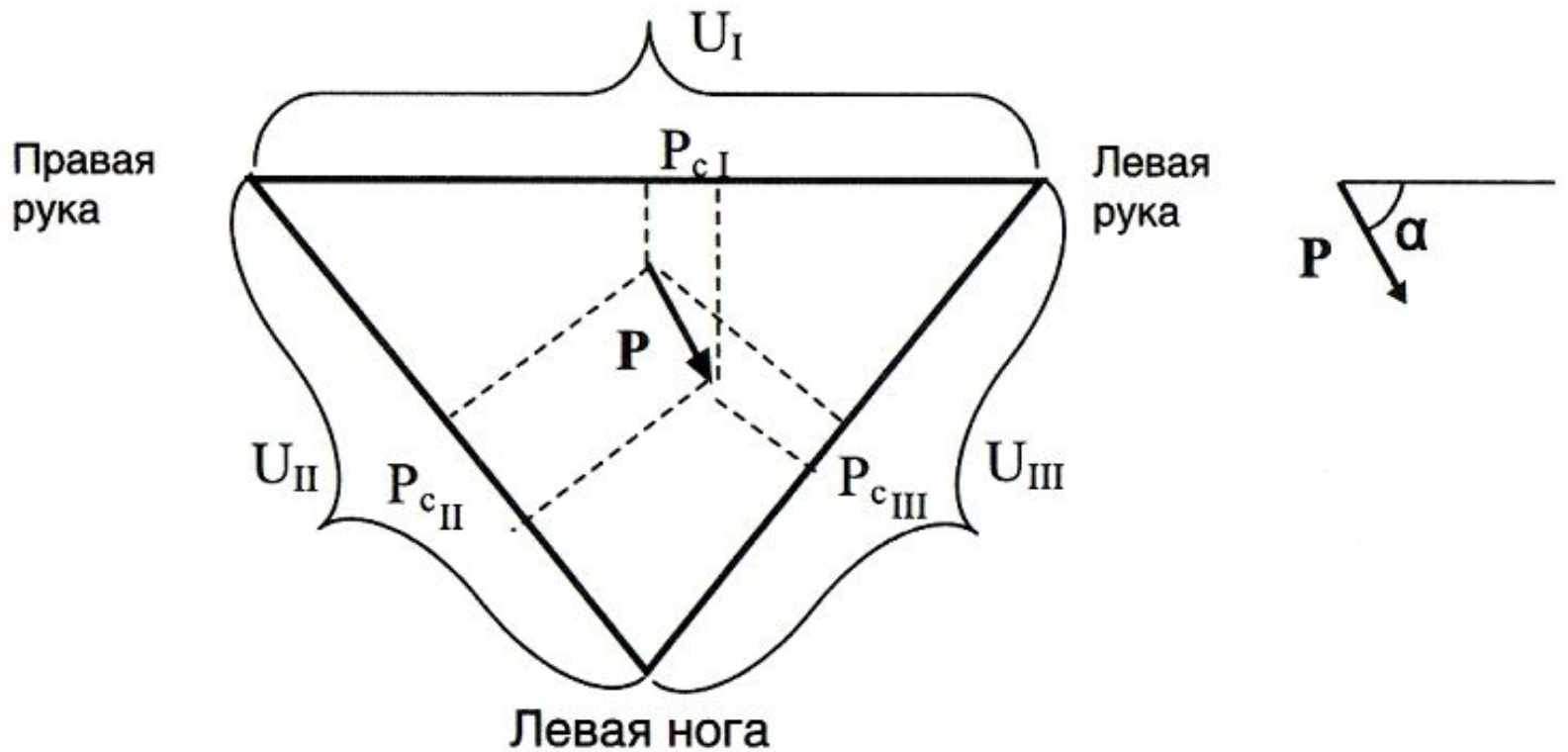


**Отведение** – разность потенциалов между точками на поверхности тела



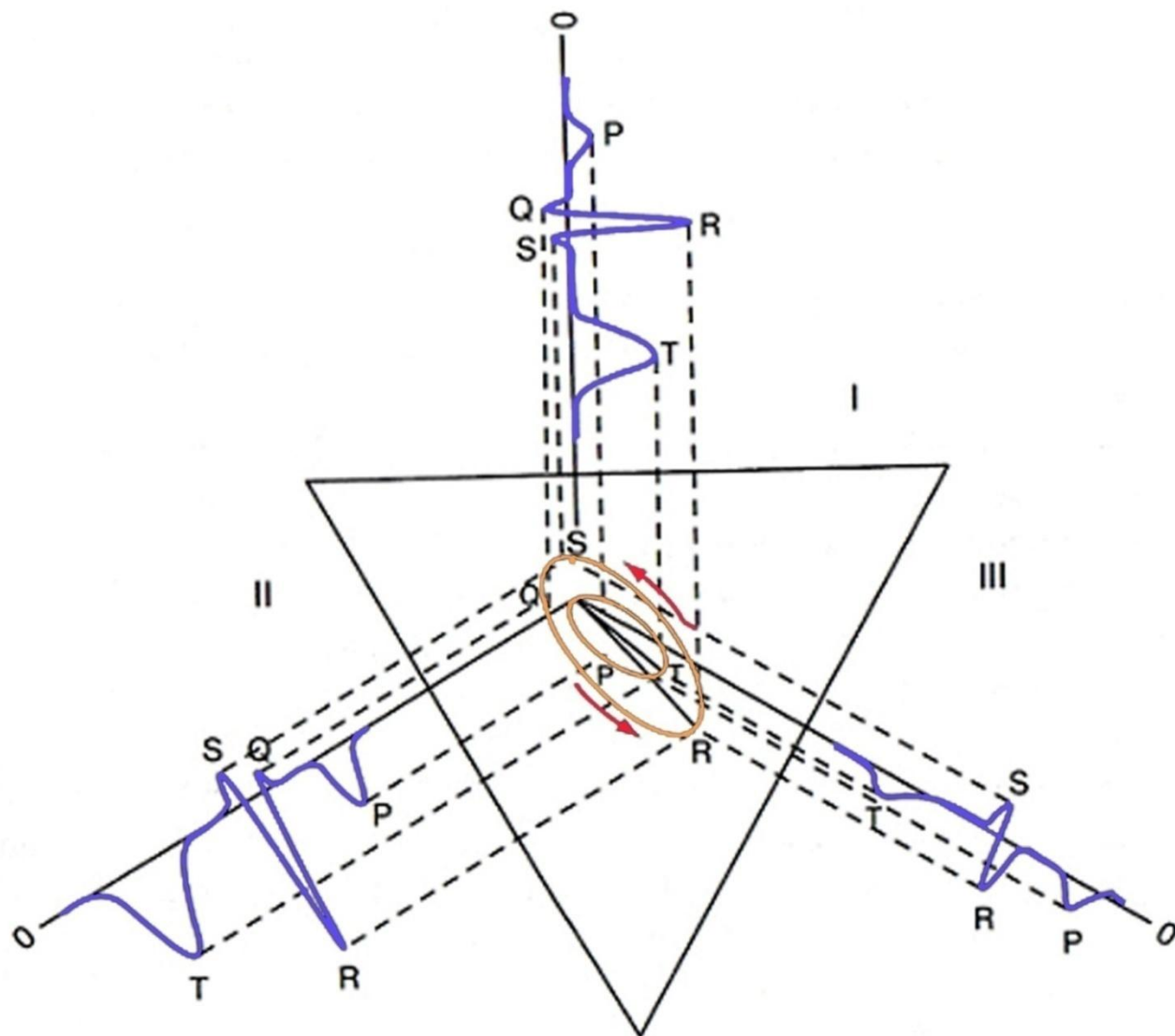
# Три стандартных отведения

$$U_I : U_{II} : U_{III} = P_{cI} : P_{cII} : P_{cIII}$$

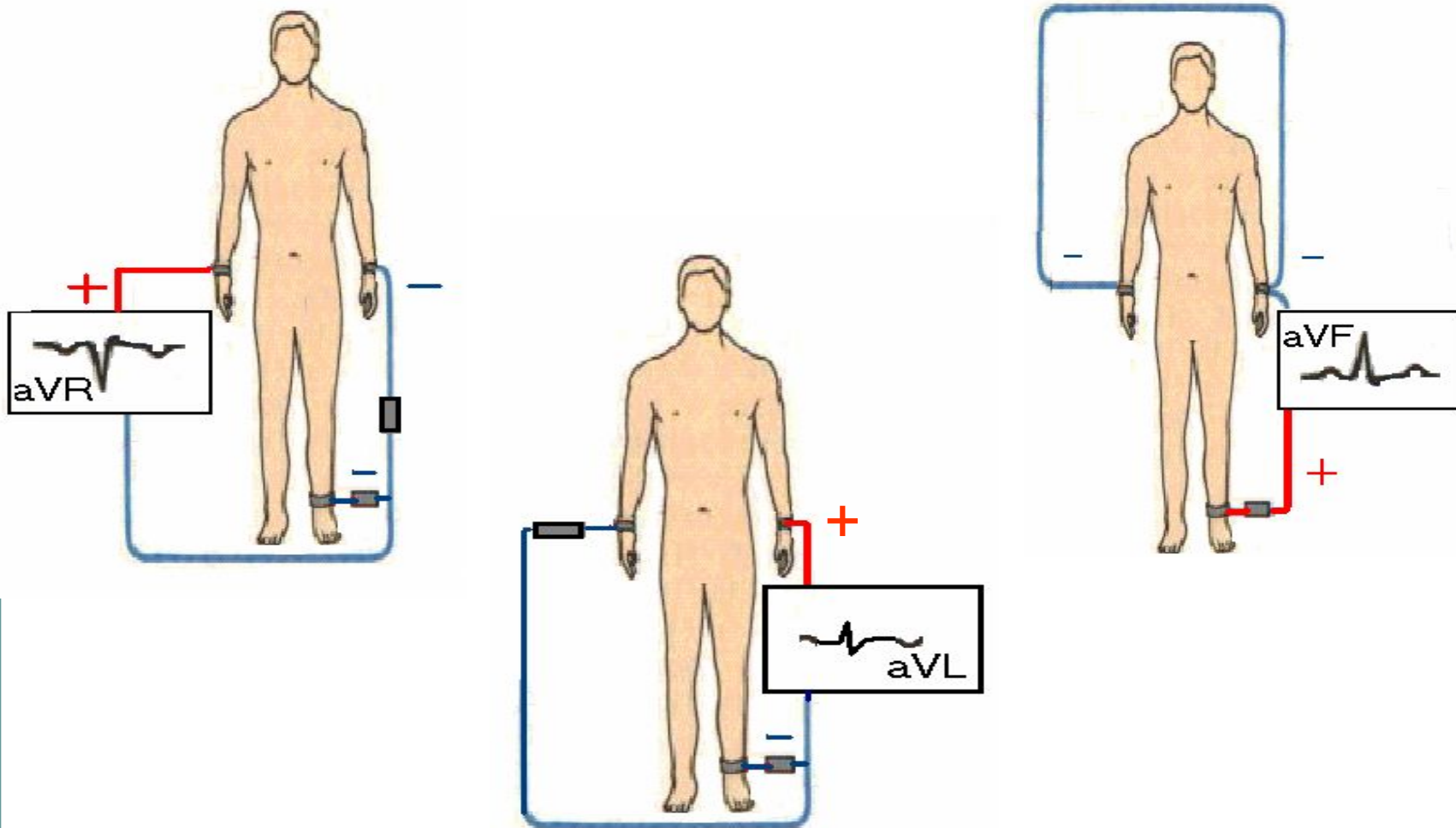


Схематическое изображение трех стандартных отведений ЭКГ

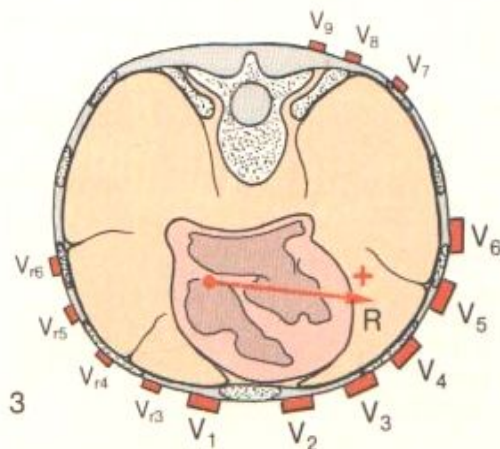
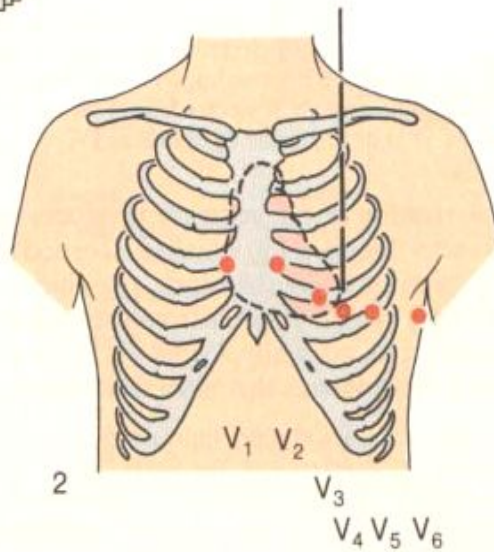
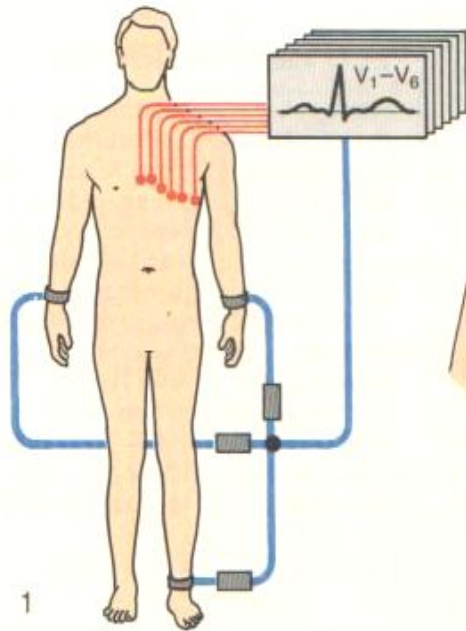
# Нормальная ЭКГ в трех стандартных отведениях



# УСИЛЕННЫЕ ЭКГ-ОТВЕДЕНИЯ (ПО ГОЛЬДБЕРГЕРУ)

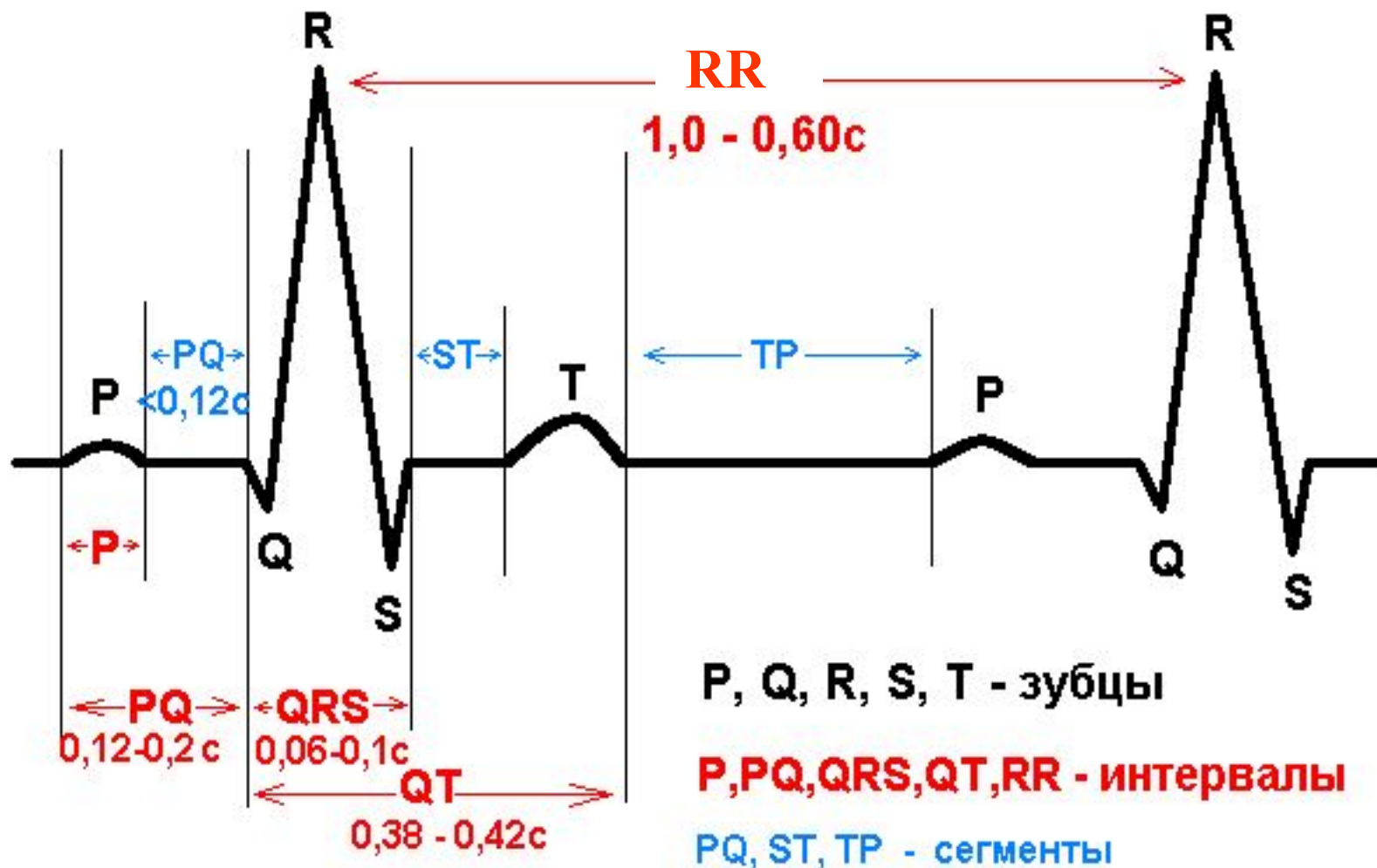


# ГРУДНЫЕ ЭКГ-ОТВЕДЕНИЯ (ПО ВИЛЬСОНУ)



- V1 - активный электрод в четвертом межреберье по правому краю грудины;
- V2 - активный электрод в четвертом межреберье по левому краю грудины;
- V3 - активный электрод на уровне четвертого ребра левой парастернальной линии ;
- V4 - активный электрод в пятом межреберье левой срединно - ключичной линии ;
- V5 - активный электрод в пятом межреберье слева по передней подмышечной линии ;
- V6 - активный электрод в пятом межреберье по левой средней подмышечной линии.

# ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭКГ



# ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭКГ

**Зубец P** отражает алгебраическую сумму электрических потенциалов, возникающих при возбуждении предсердий.

**Зубец Q** обусловлен возбуждением внутренней поверхности желудочков, правой сосочковой мышцы и верхушки сердца.

**Зубец R** отражает возбуждение поверхности и основания обеих желудочков. К концу зубца S оба желудочки охвачены возбуждением.

**Зубец T** связан с уходом возбуждения из сердца. Он отражает разность потенциалов между уже поляризованным (+) и еще деполяризованным (-) участками.

Комплекс зубцов **QRST** называют желудочковым комплексом.

# ПОКАЗАТЕЛИ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАММЫ В НОРМЕ

Зубцы и интервалы	амплитуда mv	продолжительность секунды
-------------------	-----------------	------------------------------

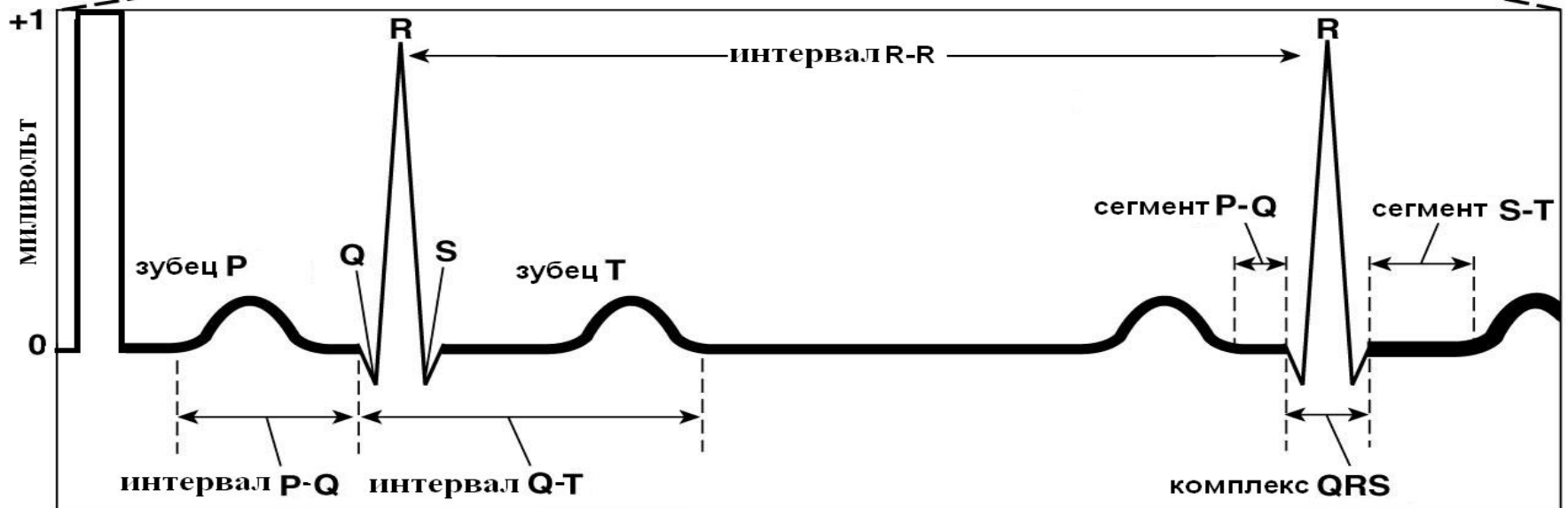
## ЗУБЦЫ

P	0,05-0.25	0,03 max
Q	0,00-0.20	0,03 max
R	0,30-1.60	0,03 max
S	0,00-0,03	0,03 max
T	0,25-0.60	0,25-0,60

## ИНТЕРВАЛЫ

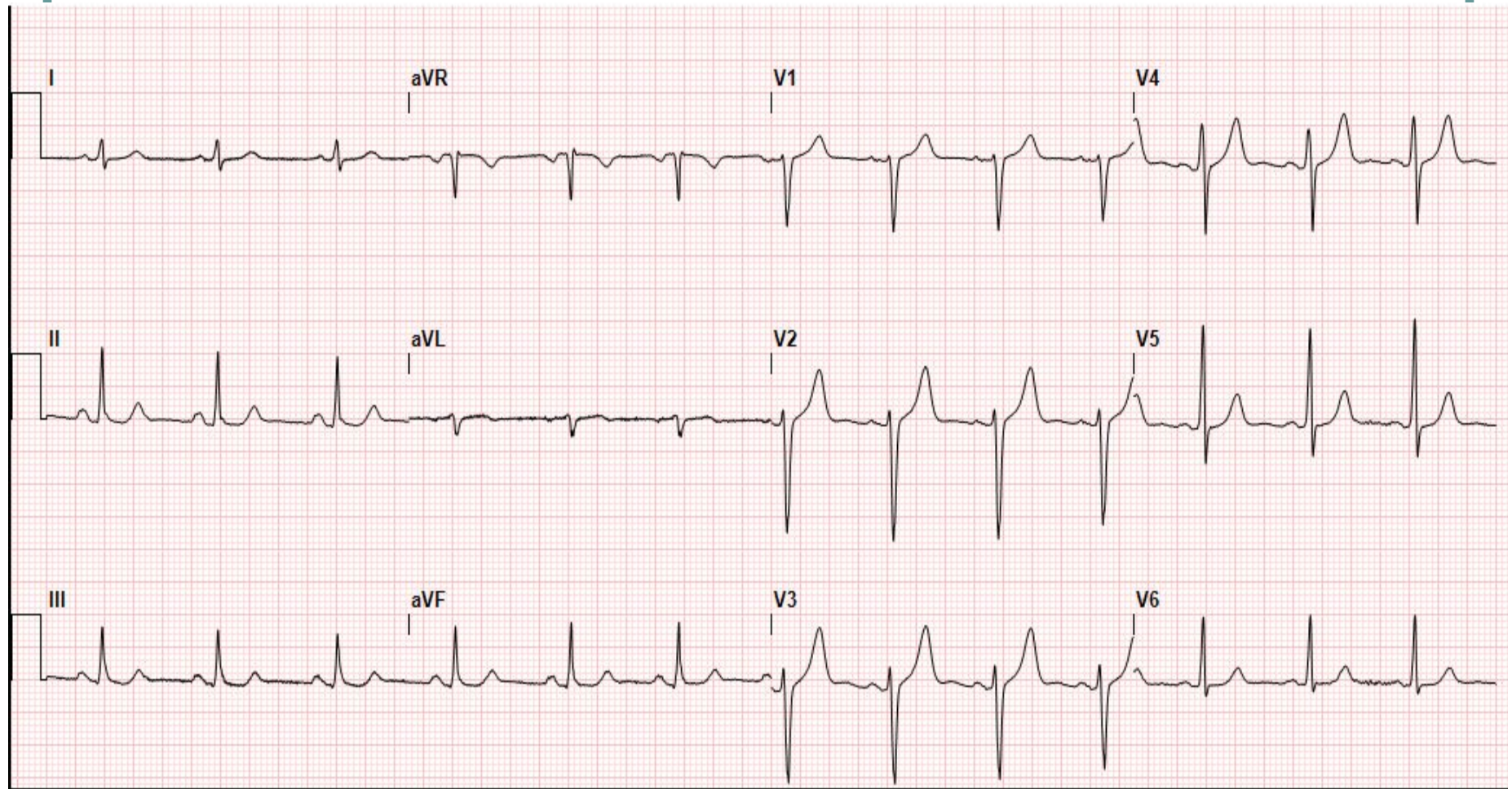
PQ		0,12-0,20
QRS		0,06-0,09
QRST		0,30-0,49
ST		0,10-0,15
RR		0,70-1,00

# СХЕМА ЭКГ





# ЭКГ В СТАНДАРТНЫХ, УСИЛЕННЫХ И ГРУДНЫХ ОТВЕДЕНИЯХ



КАФЕДРА МЕДИЦИНСКОЙ, БИОЛОГИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ,  
МЕДИНФОРМАТИКИ И БИОСТАТИСТИКИ

**СПАСИБО  
ЗА ВАШЕ ВНИМАНИЕ!**