

Учреждение образования «Гомельский  
государственный медицинский университет»

Кафедра медицинской и биологической физики

Лекция № 4 - Физические основы электрографии  
тканей и органов.

г. Гомель, 2021

# План лекции

- Основные характеристики электрического поля.
- Электрический диполь.
- Физические основы электрографии тканей и органов.
- Электрокардиография. Теория отведений Эйнтховена.
- Электрокардиограф.
- Полное сопротивление (импеданс) тканей.
- Физические процессы, происходящие в тканях под действием токов.
- Гальванизация, электрофорез.
- Реография.

# Литература

- Медицинская и биологическая физика: Учеб. для вузов / А.Н. Ремизов, А.Г. Максина, А.Я. Потапенко. – М.: Дрофа, 2004. – 560 с.
- Ливенцев Н.М. Курс физики Т.1. 6-е изд., доп. — Москва: Высшая школа, 1978. — 336 с.: ил.
- Савельев И.В. Курс общей физики: в 5 кн. – М.: АСТ: Астрель, 2008.

# Закон Кулона

- **Точечные электрические заряды** – элементарные частицы или заряженные тела, размеры которых малы по сравнению с расстоянием между ними.
- **Закон Кулона.** *Сила взаимодействия  $F$  между двумя точечными зарядами  $q_1$  и  $q_2$ , находящимися в вакууме, прямо пропорциональна произведению этих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния  $r$  между ними:*

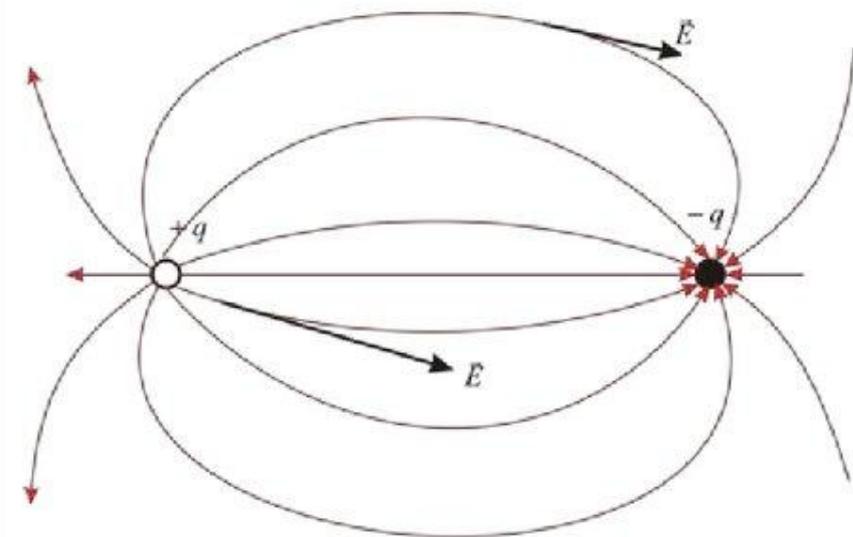
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

- Величина  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м – **электрическая постоянная**, относящаяся к числу фундаментальных физических констант.

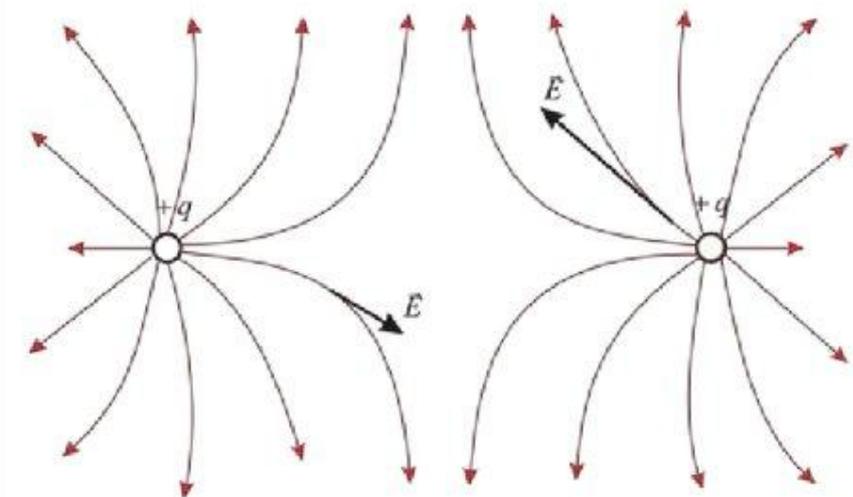
# Силовые линии электрического поля

- Графически электростатическое поле изображают с помощью **линий напряженности (силовых линий)** – линий, касательная к которым в каждой точке совпадает с направлением вектора  **$E$** .
- Линиям напряженности приписывается направление, совпадающее с направлением вектора  **$E$** .
- Густота этих линий пропорциональная модулю  $E$  вектора напряженности.
- Так как в данной точке пространства вектор  **$E$**  имеет лишь одно направление, то линии вектора напряженности никогда не пересекаются.

# Силовые линии электрического поля



Силовые линии электрического поля системы из 2-х равных по модулю и противоположных по знаку точечных зарядов.



Силовые линии электрического поля системы из 2-х равных по модулю и одинаковых по знаку точечных зарядов.

# ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Электрическое поле есть разновидность материи, посредством которой осуществляется силовое воздействие на электрические заряды, находящиеся в этом поле. Характеристики электрического поля, которое генерируется биологическими структурами, являются источником информации о состоянии организма.

**Напряженность и потенциал — характеристики электрического поля**

*Силовой характеристикой электрического поля является напряженность, равная отношению силы, действующей в данной точке поля на точечный заряд, к этому заряду*

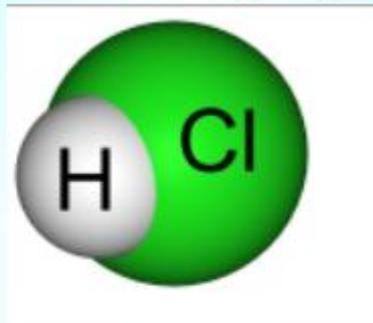
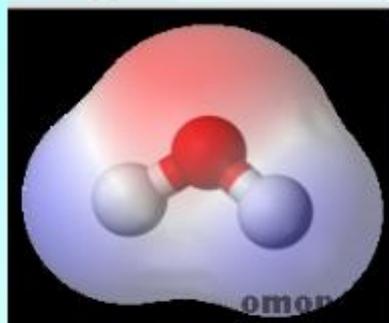
$$**E = F/q** \quad [\text{Н/Кл}] \text{ или } [\text{В/м}]$$

# Электрический диполь

- **Электрический диполь** — система, состоящая из двух равных по модулю разноименных точечных зарядов.

Плечо диполя — отрезок прямой длиной  $l$ , соединяющий заряды.

- В качестве диполя можно рассматривать любую полярную молекулу —  $\text{HCl}$ ,  $\text{CuCl}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .



# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДИПОЛЬ

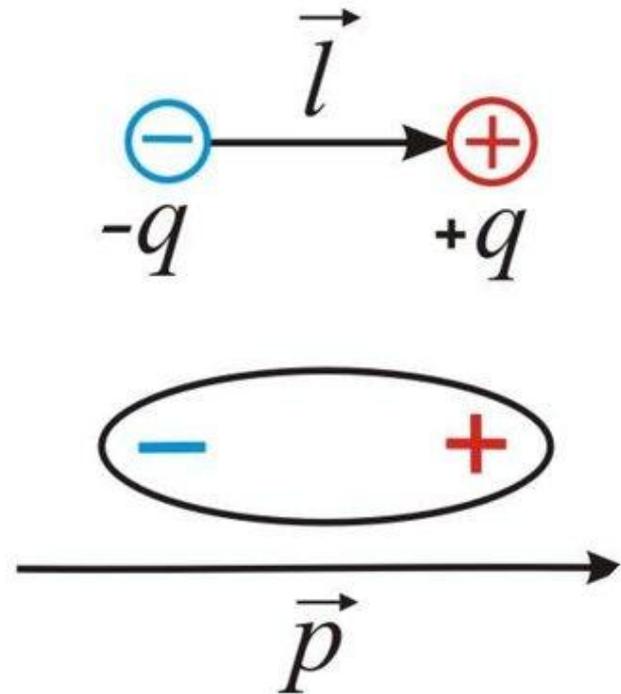
**Электрический диполь** – система из двух одинаковых по модулю разноименных точечных зарядов  $+q$  и  $-q$ , находящихся на расстоянии  $l$  друг от друга.

**Электрический дипольный момент:**

$$\vec{p} = ql\vec{l}$$

$$[\text{Кл} \cdot \text{м}]$$

$l$  – плечо диполя



# РЕГИСТРАЦИЯ БИОПОТЕНЦИАЛОВ ТКАНЕЙ

Живые ткани являются источником электрических потенциалов (биопотенциалов).

Регистрация биопотенциалов тканей и органов с диагностической (исследовательской) целью получила название *электрографии*. Более распространены конкретные названия соответствующих диагностических методов: *электрокардиография (ЭКГ)* — регистрация биопотенциалов, возникающих в сердечной мышце при ее возбуждении, *электромиография (ЭМГ)* — метод регистрации биоэлектрической активности мышц, *электроэнцефалография (ЭЭГ)* — метод регистрации биоэлектрической активности головного мозга и др.

В большинстве случаев биопотенциалы снимаются электродами не непосредственно с органа (сердце, головной мозг), а с других, соседних тканей, в которых электрические поля этим органом создаются. В клиническом отношении это существенно упрощает саму процедуру регистрации, делая ее безопасной и несложной.

# ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЯ

## Историческая справка

- Родоначальником электрографии считают Луиджи Гальвани (1786 г.).
- В 1887 г. английский ученый Уоллер зарегистрировал электродвижущую силу (ЭДС) сердца человека.
- Голландский ученый Эйнтховен заложил основы современного метода ЭКГ (1906 г.). Нобелевская премия (1924 г.).
- В России ЭКГ впервые получена А.Ф. Самойловым (1908 г.).
- Систематическое наблюдение ЭКГ больных начато в 1910 г. кардиологом В.Ф. Зелениным.

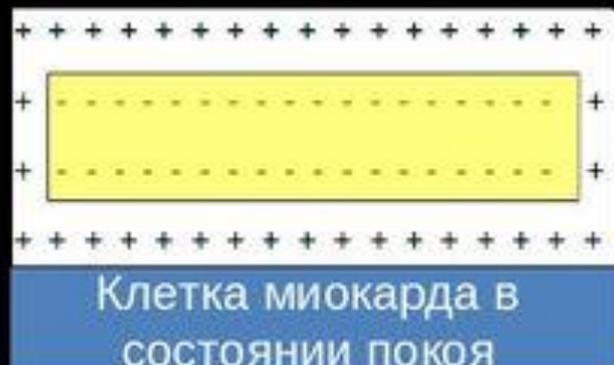
# ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЯ

метод графической регистрации электрической активности сердца с поверхности тела с помощью преобразующих устройств (электрокардиографов)

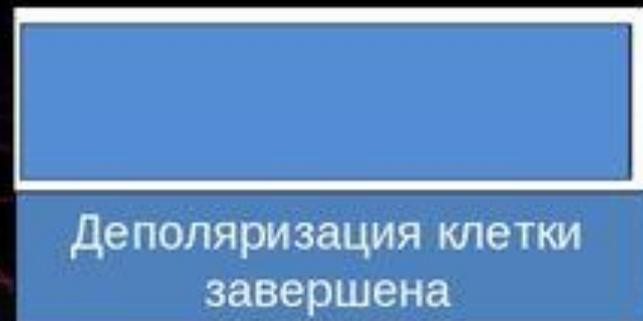
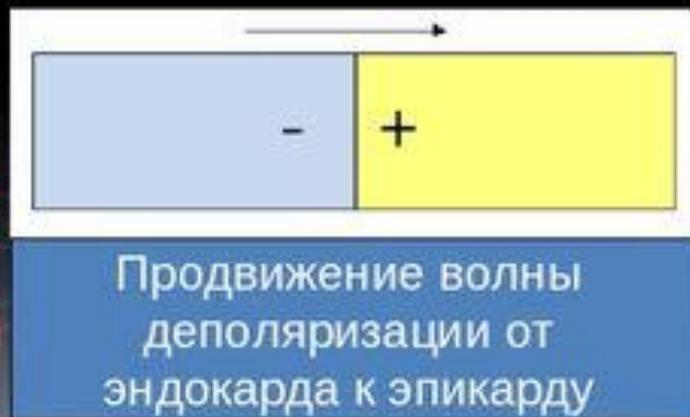


Электрическая активность сердца  
- результат циклического передвижения ионов  
(преимущественно **калия** и **натрия**)  
в клетках и внеклеточной жидкости

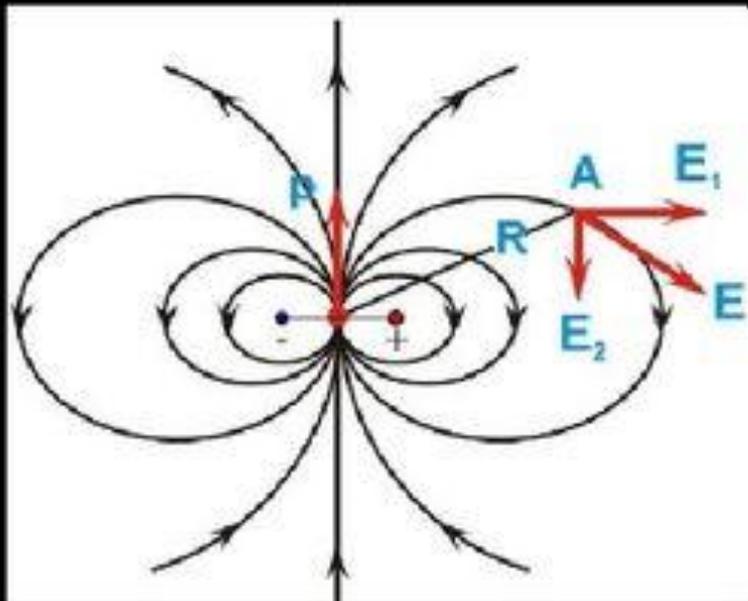
# Электрофизиология сердца



Каждое мышечное волокно представляет собой элементарную систему — **диполь**. Из бесчисленных микродиполей одиночных волокон миокарда складывается суммарный диполь (**ЭДС**), который при распространении возбуждения в головной части имеет положительный заряд, в хвостовой — отрицательный.



# ЭДС сердца



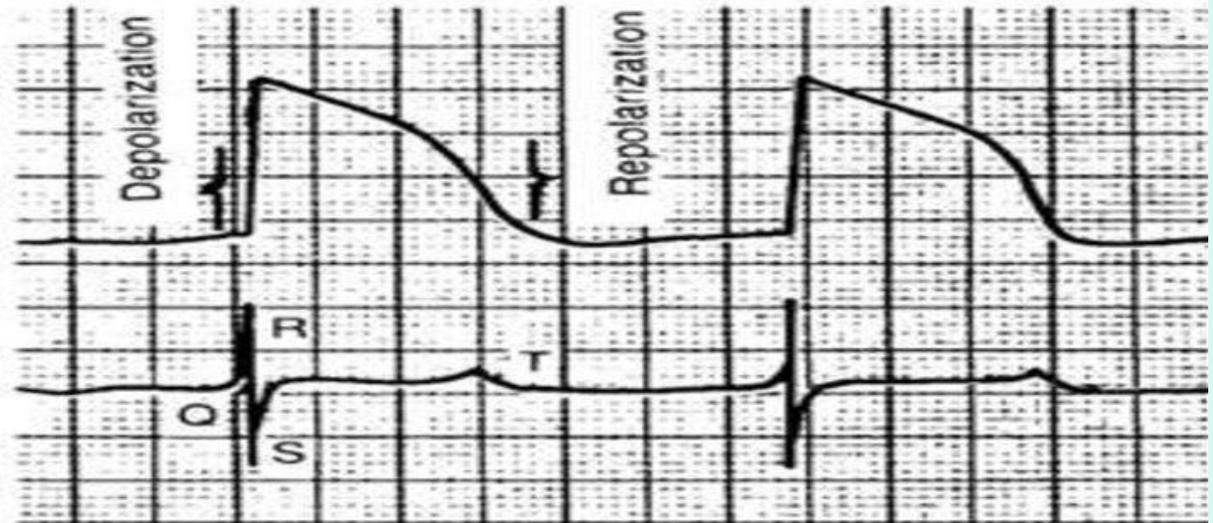
Направление ЭДС принято называть электрической осью сердца, чаще всего она располагается параллельно анатомической оси сердца.



- Работа сердечной мышцы - это электрический процесс, постоянно текущий в организме.
- Электрический ток, заставляющий работать сердце, получается в результате биохимических процессов, постоянно текущих в организме.
- **Разность потенциалов характеризует электродвижущую силу источника тока (ЭДС).**
- ЭДС – векторная величина, т.е. имеет численное значение и определенное направление: от возбужденного («-» заряженного) к невозбужденному («+» заряженному участку миокарда)

## Электрокардиография

Каждая клетка сердечной мышцы создаёт электрическое поле. Изменения электрического поля сердца происходят при деполяризации и реполяризации мембраны клеток сердца. Эти изменения достаточны, чтобы создать изменения разности потенциалов между различными точками поверхности.

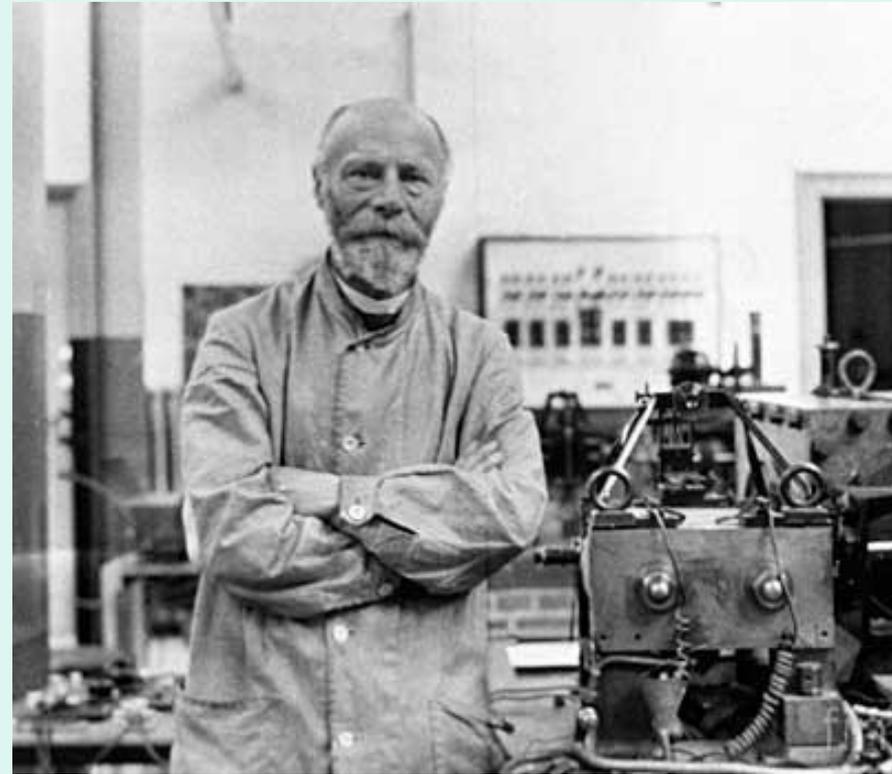


# Отведения Эйнтховена

**Виллем Эйнтховен** (*Willem Einthoven*; 1860-1927), нидерландский физиолог, предложил снимать разности биопотенциалов сердца между вершинами равностороннего треугольника, которые приблизительно расположены в правой руке (ПР), левой руке (ЛР) и левой ноге (ЛН).

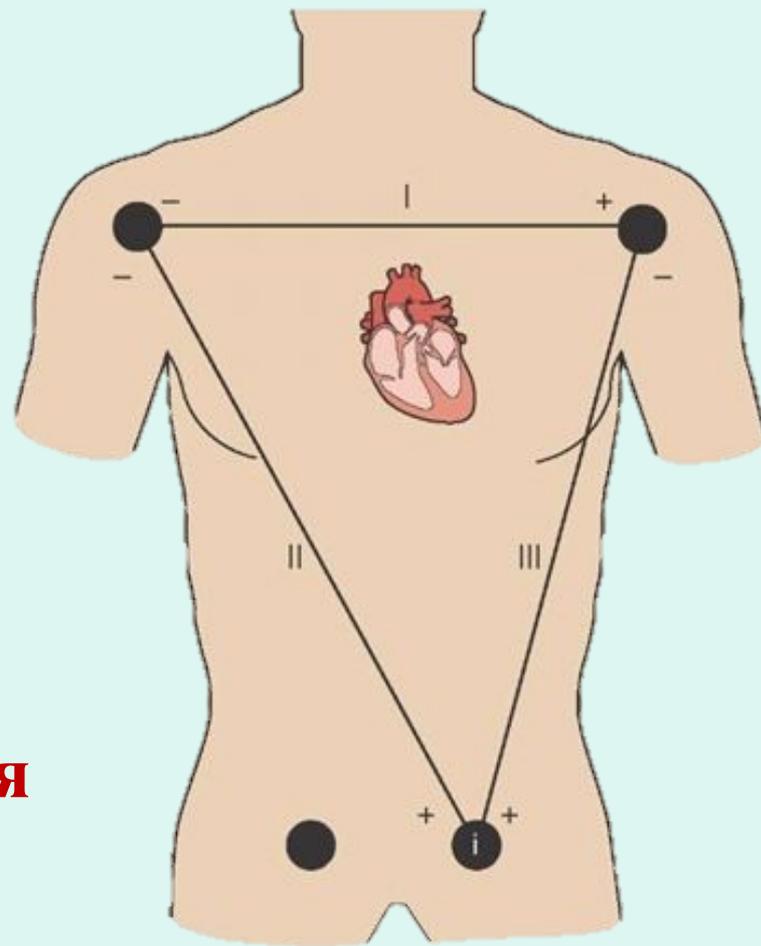
Разность биопотенциалов, регистрируемая между двумя точками тела, называется ***отведением***.

По Эйнтховену, ***сердце расположено в центре равностороннего треугольника.***



# СТАНДАРТНЫЕ ОТВЕДЕНИЯ

- I — правая рука — левая рука,
- II — правая рука — левая нога,
- III — левая рука — левая нога.

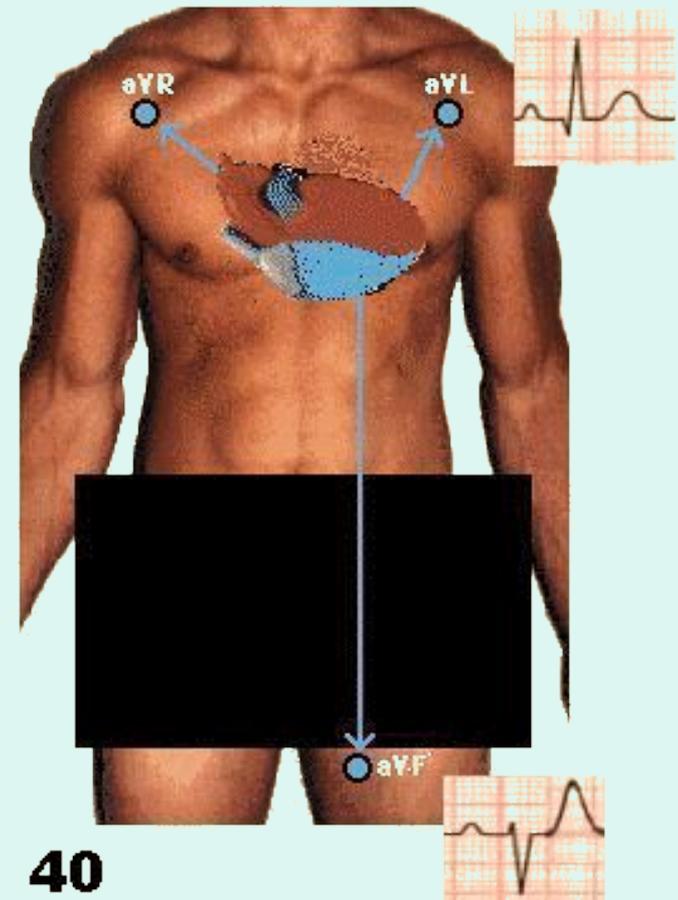
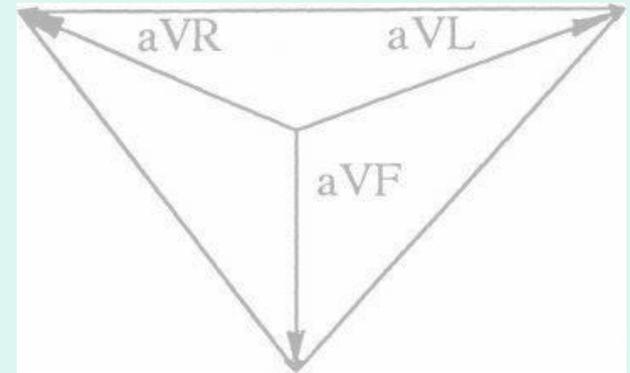


**С электрода на правой ноге  
показания не регистрируются**

# УСИЛЕННЫЕ ОТВЕДЕНИЯ

**aVR, aVL, aVF** — однополюсные, усиленные отведения измеряются относительно усреднённого потенциала всех трёх электродов.

Локализация	Отведения
Передняя стенка	I, V1-V4, aVL
Боковая стенка	II, aVL, V5-V6
Задняя стенка	III, aVF



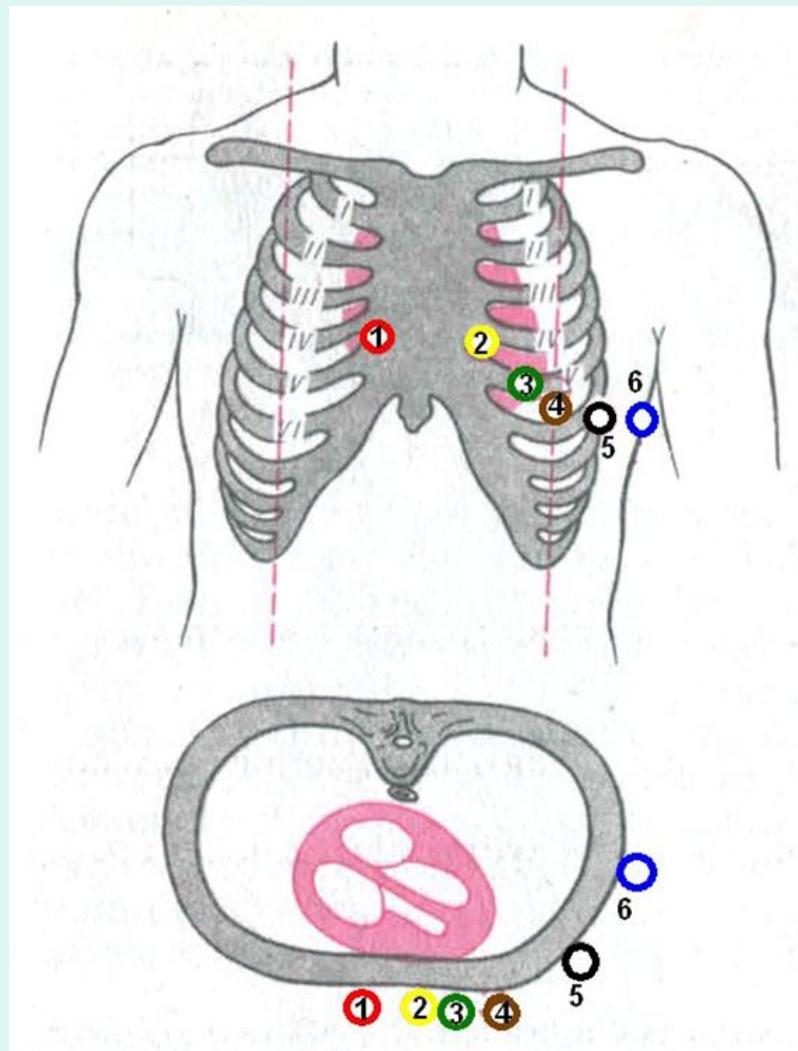
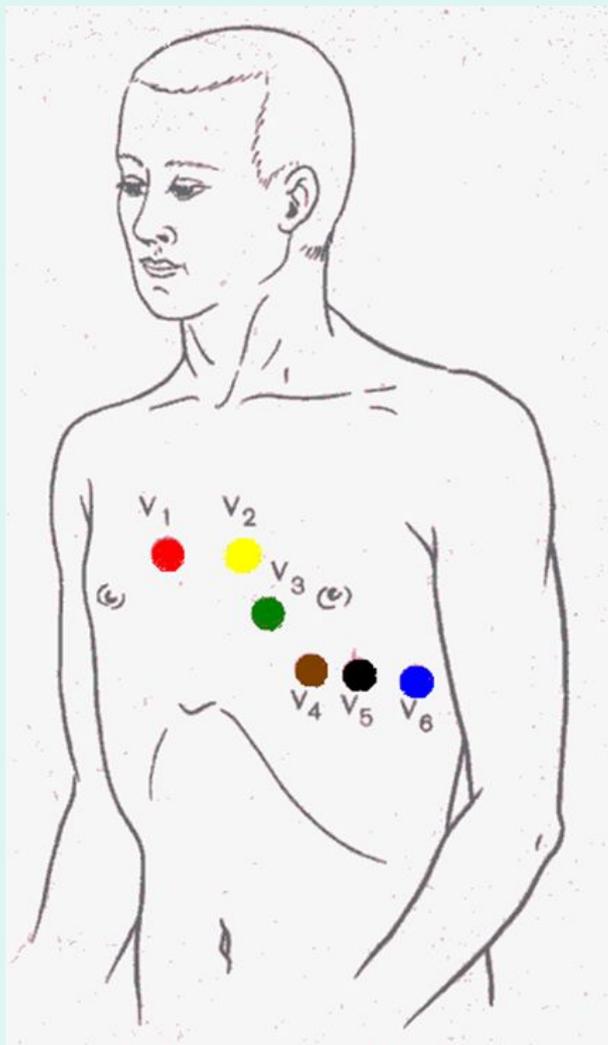
# ГРУДНЫЕ ОТВЕДЕНИЯ

- V1 (правое грудное отведение) - четвертое межреберье правого края грудины;
- V2 (правое грудное отведение) - четвертое межреберье левого края грудины;
- V3 (переходное грудное отведение) - посередине между V2 и V4 (перегородка);
- V4 (переходное грудное отведение) - пятое межреберье по среднеключичной линии (верхушка сердца);
- V5 (левое грудное отведение) - по левой передней подмышечной линии на уровне V4 по горизонтали;
- V6 (левое грудное отведение) - по левой среднеподмышечной линии на уровне V4 по горизонтали ( в V межреберье).

**Для диагностики заднебазальных инфарктов миокарда иногда используют дополнительные грудные отведения:**

- V7 - активный электрод располагается на уровне V4 по горизонтали, но по задней подмышечной линии;
- V8 - активный электрод располагается на той же горизонтали в месте пересечения ее с лопаточной линией;
- V9 - активный электрод располагается на той же горизонтали в месте пересечения ее с паравертебральной линией.

# ГРУДНЫЕ ОТВЕДЕНИЯ

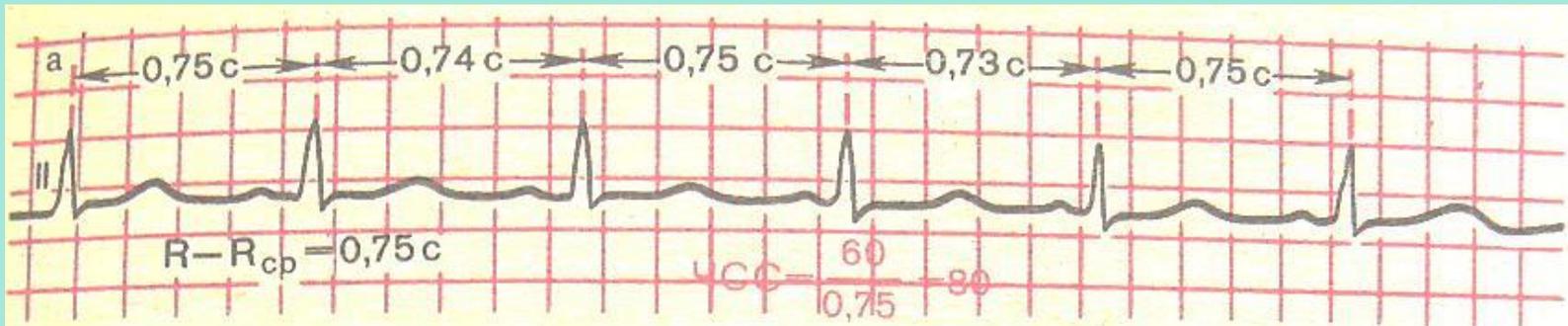


# Анализ сердечного ритма и проводимости

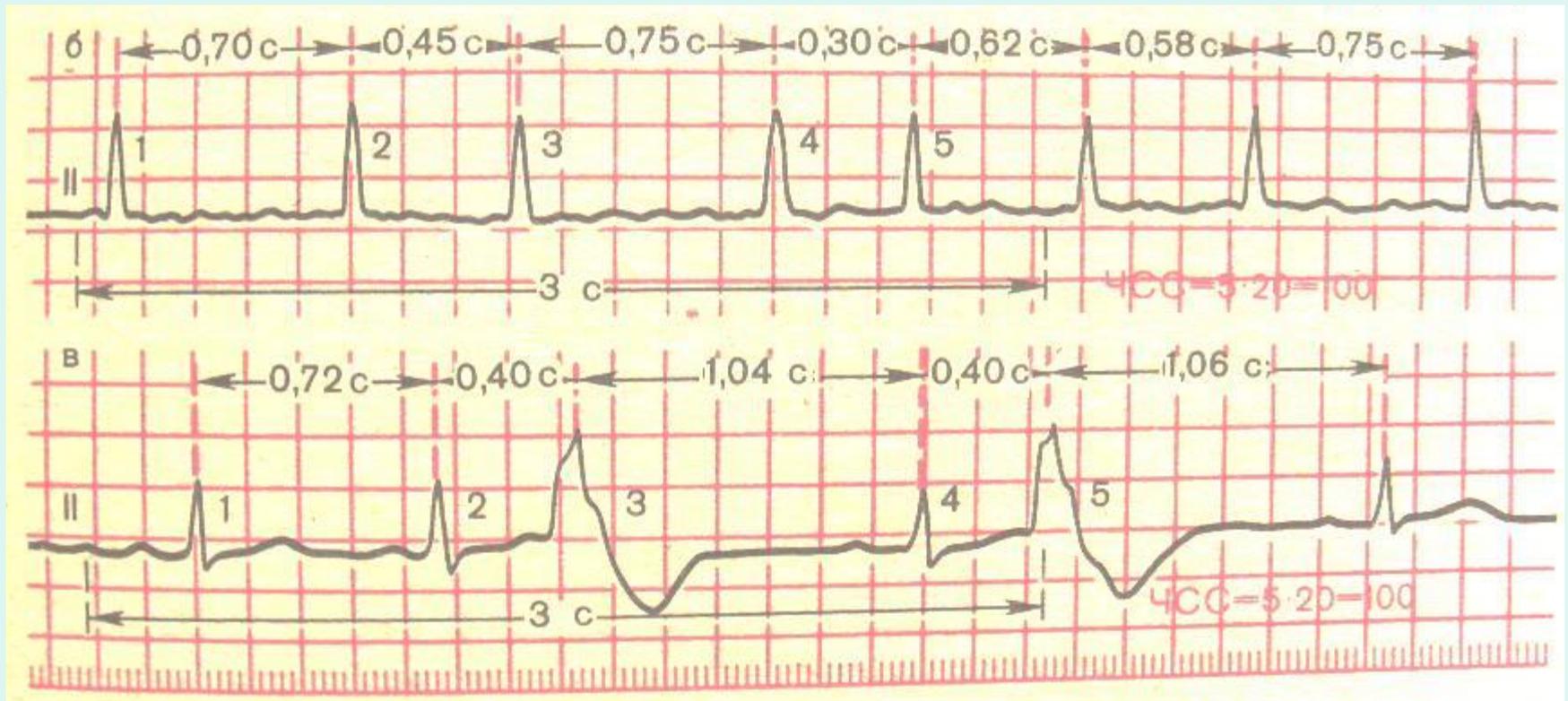
## Оценка регулярности сердечных сокращений (СС)

Регулярность СС оценивается при сравнении продолжительности интервалов R-R.

Регулярный, или *правильный* ритм сердца диагностируется, если продолжительность интервалов R-R одинакова и разброс полученных величин не превышает  $\pm 10\%$  от средней их продолжительности.

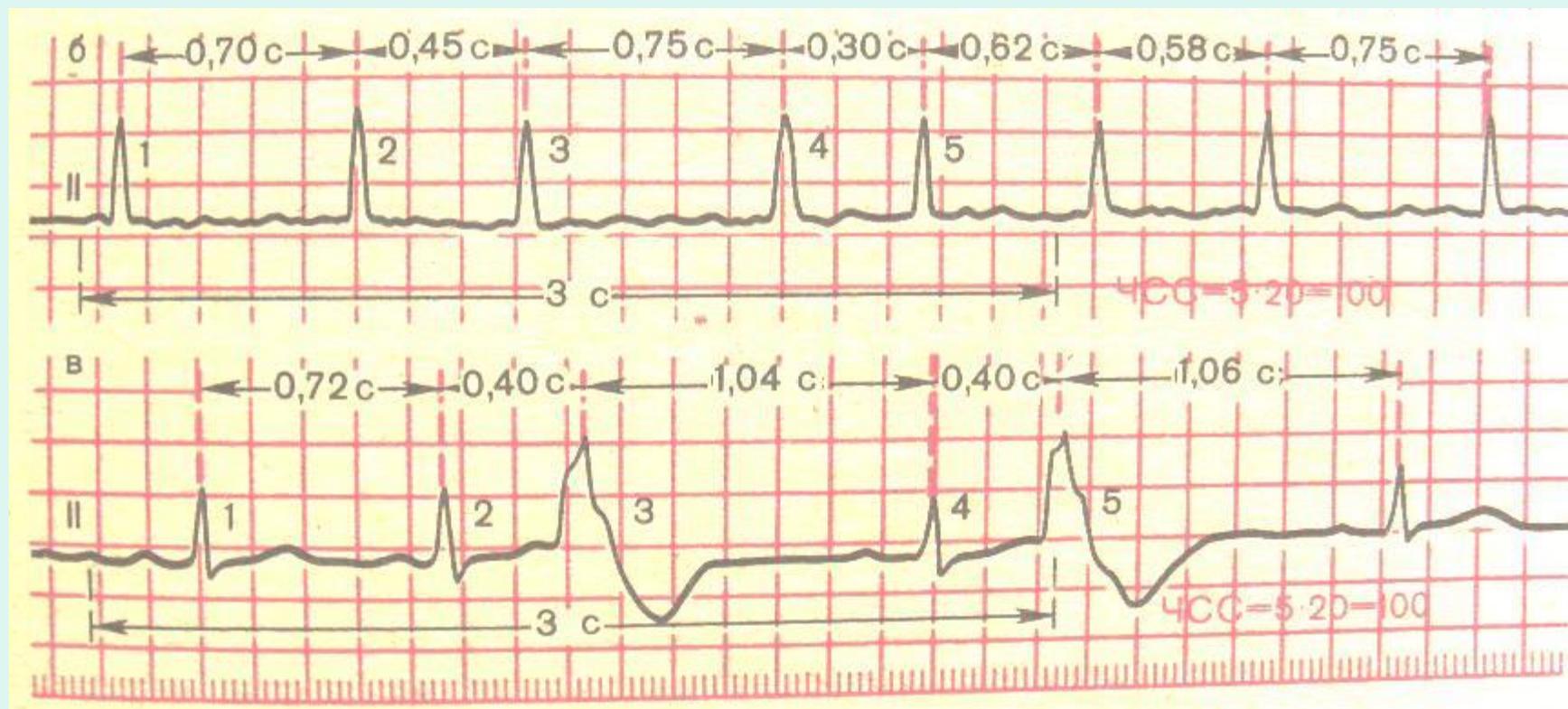


В остальных случаях диагностируется *неправильный* (аритмичный) сердечный ритм.

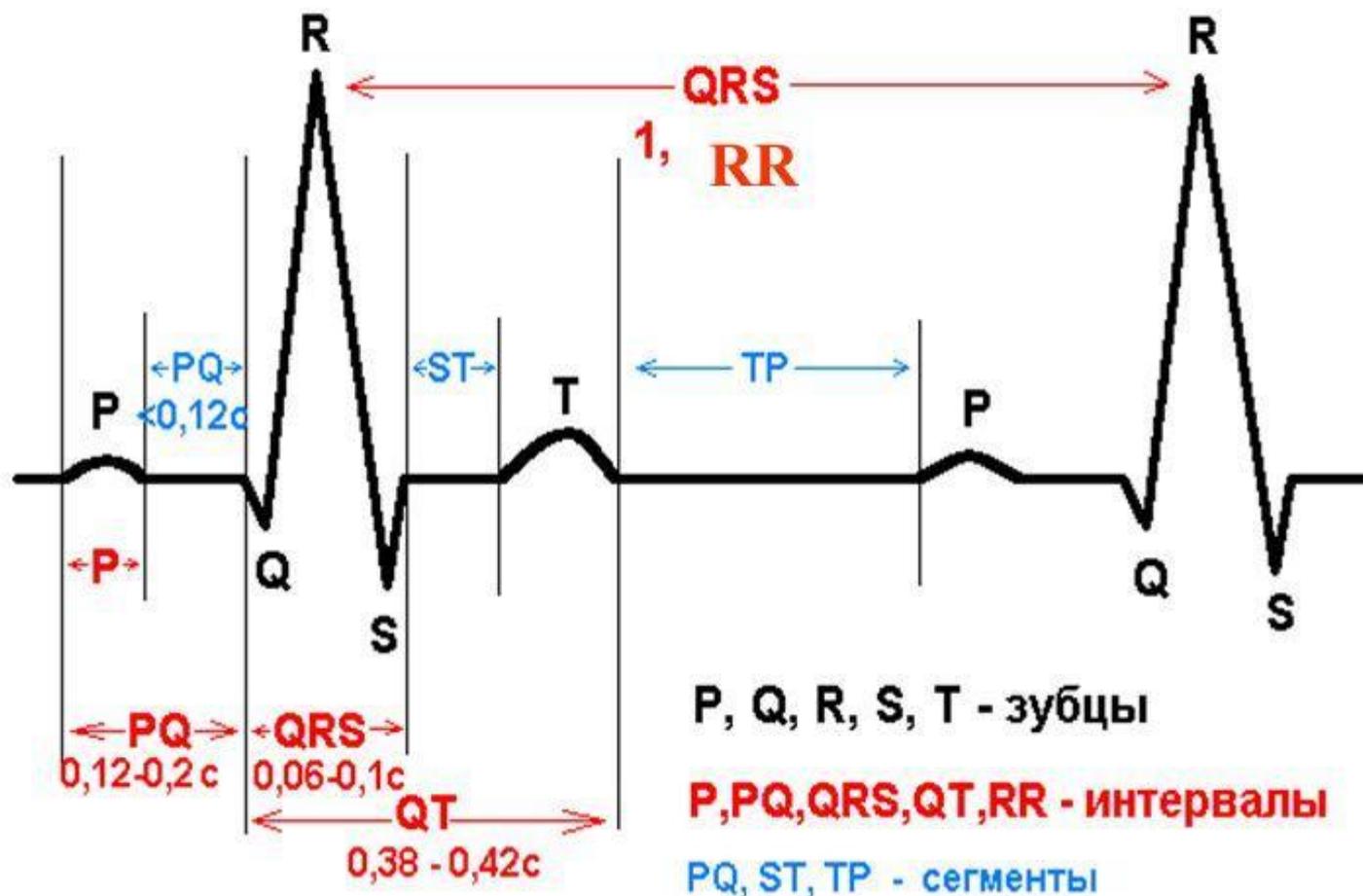


## Подсчёт ЧСС

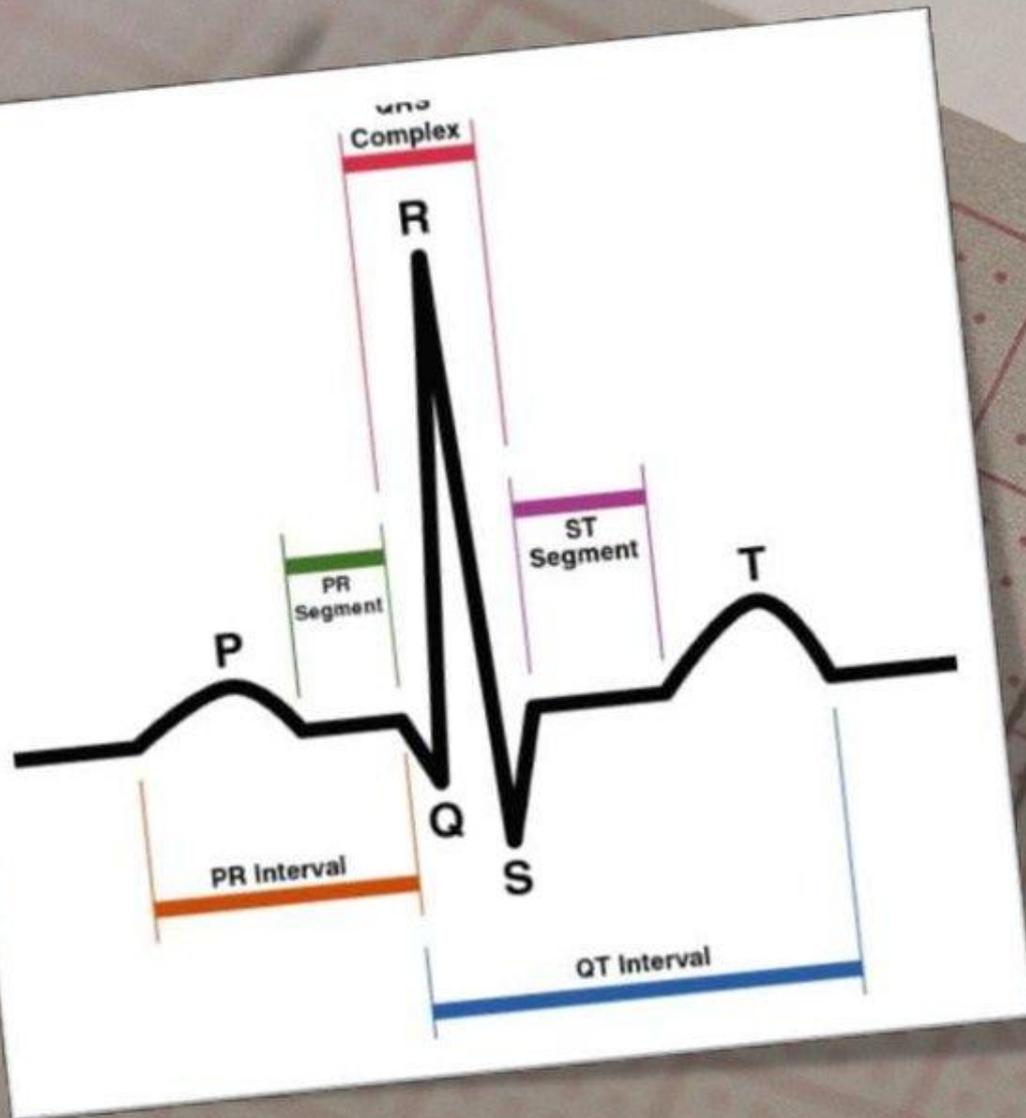
При *правильном* ритме ЧСС определяют по формуле:  
**ЧСС = 60  $\vartheta$  / R-R**, где 60 – число секунд в минуте,  $\vartheta$  – скорость движения ленты (25 мм/с или 50 мм/с), R-R – длительность интервала, выраженная в секундах



# ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭКГ



# Элементы ЭКГ



**ЗУБЦЫ** - это выпуклости и вогнутости на электрокардиограмме.

На ЭКГ выделяют следующие зубцы:

P (сокращение предсердий),

Q, R, S (все 3 зубца характеризуют сокращение желудочков),

T (расслабление желудочков),

U (непостоянный зубец, регистрируется редко).

## СЕГМЕНТЫ

Сегментом на ЭКГ называют отрезок прямой линии (изолинии) между двумя соседними зубцами. Наибольшее значение имеют сегменты P-Q и S-T. Например, сегмент P-Q образуется по причине задержки проведения возбуждения в предсердно-желудочковом (AV-) узле.

## ИНТЕРВАЛЫ

Интервал состоит из зубца (комплекса зубцов) и сегмента. Таким образом, интервал = зубец + сегмент. Самыми важными являются интервалы P-Q и Q-T.

# Электрокардиограф



- **Устройство для записи электрической активности сердца. С помощью электродов, наложенных на конечности и грудную клетку пациента, данные о деятельности различных участков сердца передаются на монитор в виде информации, которую можно анализировать.**
- **Электроды располагаются в соответствии с треугольником Эйнтховена**

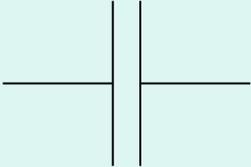
# Полное сопротивление (импеданс) живых тканей

В общем виде закон Ома запишем как:  $I = \frac{U}{Z}$   
где  $Z$  – полное сопротивление тканей (импеданс).

Импеданс тканей при прохождении через них переменного тока:

$$Z = \sqrt{R_t^2 + Z_C^2} = \sqrt{R_t^2 + \frac{1}{(2\pi fC)^2}}$$

В этом случае, сопротивление тканей зависит от частоты ( $f$ ) переменного тока.

Symbol	Unit	Impedance (Z)	
		DC	AC
Resistor 	<i>R (resistance)</i> <b>Ohm</b> <b>(Ω)</b>	R	R
Capacitor 	<i>C (capacity)</i> <b>Farad</b> <b>(F)</b>	∞	$\frac{1}{2\pi f C}$
Inductor 	<i>L (inductance)</i> <b>Henry</b> <b>(H)</b>	0	$2\pi f L$

## ***Сопротивление тела человека зависит от:***

- 1) Индивидуальных особенностей человека, даже у одного и того же человека в разное время и в разных условиях сопротивление разное, в зависимости от физического и психического состояния;
- 2) От пола - у женщин меньше, чем у мужчин. Объясняется толщиной кожи.
- 3) От возраста - у детей меньше, чем у взрослых и стариков. Объясняется толщиной и степенью огрубления кожи.
- 4) От внешней среды - температуры, давления, плотности.
- 5) От состояния кожи - загрязнения, ранения, увлажненности и т.п.
- 6) От внешних неожиданно возникающих раздражителей - болевые (удары, уколы), световые, звуковые снижают сопротивление тела человека на 20 - 50% на несколько минут.

# Электрические параметры человека

Электрические параметры	Числовое значение
Удельное сопротивление тканей тела, Ом·м:	
— верхний слой сухой кожи	$3,3 \cdot 10^5$
— кровь	1,8
— мышца	1,5
Электрическое сопротивление тела человека от конца одной руки до конца другой (при сухой неповрежденной коже рук), Ом	1500
Сила тока через тело человека, считающаяся безопасной, мА	до 1
Сила тока, приводящая к серьезным повреждениям организма, мА	100
Безопасное электрическое напряжение, В;	
— сырое помещение	12
— сухое помещение	36

## **ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ТКАНЯХ ОРГАНИЗМА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТОКОВ**

Различные виды биологических тканей обладают различными электрическими свойствами. Одни ткани являются диэлектриками, а другие проводниками. В состав организма входят биологические жидкости (электролиты), содержащие большое количество ионов, которые участвуют в различного рода обменных процессах. По этим причинам свойства биологических тканей существенно изменяются под воздействием токов и электромагнитных полей.

## Воздействие постоянного тока

Физиологическое действие постоянного электрического тока связано с двумя физическими процессами:

- постоянное электрическое поле вызывает направленное движение ионов к полюсам;
- постоянное электрическое поле оказывает ориентирующее действие на дипольные молекулы и вызывает электронную поляризацию молекул, не обладающих дипольным моментом. В результате изменяется содержание ионов в компартментах различных тканей.

# Гальванизация и электрофорез

К основным физиотерапевтическим процедурам, использующим постоянный ток, относятся гальванизация и электрофорез.

**Гальванизация** - лечебное воздействие на организм постоянным электрическим током невысокого напряжения и небольшой силы.

Название метода связано с устаревшим названием постоянного тока - «гальванический ток».

При гальванизации различных участков тела используют следующие токи:

Участок	Конечности	Туловище	Лицевая область	Слизистые
Сила тока, мА	20–30	15–20	3–5	2–3

В результате гальванизации в тканях активизируются системы регуляции локального кровотока. Происходит расширение просвета дермальных сосудов и возникает гиперемия кожных покровов. Расширение капилляров и повышение проницаемости их стенок происходит не только в месте наложения электродов, но и в глубоко расположенных тканях.

# Действие переменного тока

Переменный ток проводимости представляет собой колебательные движения ионов.

Действие, которое оказывает на организм переменный (синусоидальный) ток, зависит от частоты и амплитуды тока. В медицине принята следующая классификация частот переменного тока.

Название диапазона	Низко-частотный (НЧ)	Звуковой (ЗЧ)	Ультразвуковой (УЗЧ)	Высоко-частотный (ВЧ)
Частота, кГц	ниже 0,02	0,02–20	20–200	200–30 000

Как и постоянный ток, переменный ток оказывает на ткани организма раздражающее действие. Возбуждение нервной и мышечной тканей постоянным или переменным током ( $\nu$  ниже 100 кГц) может стать причиной электротравмы. Процессы возбуждения в ритме, не свойственном организму, нарушают нормальную жизнедеятельность. Особенно опасны такие нарушения в сердце, дыхательной мускулатуре, центральной нервной системе. Наибольшую опасность представляют частоты 30-300 Гц.

# Пороговые значения тока

**Порог осязаемого тока** - минимальная сила тока, раздражающее действие которого ощущает «средний» человек.

Реакция человека на ток определяется не только его силой и частотой, но и областью, через которую ток проходит.

Для частоты **50 Гц** (промышленный ток) величина порога осязаемого тока составляет приблизительно **1 мА**.

Промышленный ток **3 мА** вызывает легкое покалывание в пальцах, прикасающихся к проводнику. Ток **3-5 мА** вызывает раздражающее ощущение во всей кисти руки. Ток **8-10 мА** приводит к непроизвольному сокращению мышц кисти и предплечья. При токе порядка **15 мА** непроизвольные мышечные сокращения приобретают такую силу, что человек не в состоянии разжать кисть, держащую проводник.

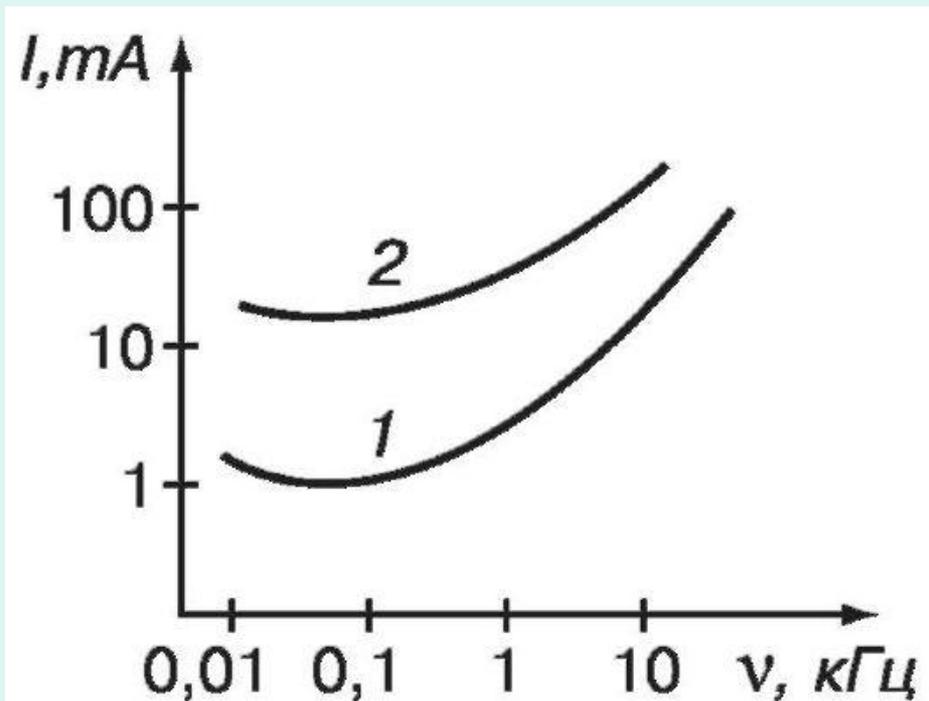


Рис. Зависимость среднего значения порога осязаемого тока (1) и порога неотпускающего тока (2) от частоты.

**Превышение порога неотпускающего тока может быть губительным для человека (паралич дыхательных мышц, фибрилляция сердца).**



# Реография

**Реография** — неинвазивный метод исследования кровоснабжения органов, в основе которого лежит принцип регистрации изменений электрического сопротивления тканей в связи с меняющимся кровенаполнением.

Чем **больше** приток крови к тканям, тем **меньше** их сопротивление.

Для получения реограммы через тело пациента пропускают переменный ток частотой 50-100кГц, малой силы (не более 10 мкА), создаваемый специальным генератором.

# Виды реографии

- ❑ **Реоэнцефалография (РЭГ)** - исследование кровенаполнения сосудов головного мозга.
- ❑ **Реовазография** - исследование заболеваний периферических сосудов, сопровождающихся изменениями их тонуса, эластичности, сужением или полной закупоркой артерий.
- ❑ **Реогепатография** - исследование кровотока печени. Позволяет судить о процессах, происходящих в сосудистой системе печени: кровенаполнении, очагах поражения, особенно при остром и хроническом гепатите и циррозе
- ❑ **Реомиография** - исследование кровенаполнения работающих мышц.