Лекция 6

Электрические свойства тканей организма

Пассивные

Активные

Ростов-на-Дону
2012

Содержание лекции №6

- Процессы, происходящие в тканях организма под действием электрических токов и электромагнитных полей
- Пассивные электрические свойства тканей

- Электрический диполь. Электрическое поле диполя.
- Токовый диполь. Электрическое поле токового диполя в неограниченной проводящей среде.
- Представление об эквивалентном электрическом генераторе сердца, головного мозга и мышц

Процессы, происходящие в тканях организма под действием электрических токов и электромагнитных полей

Живые ткани являются ***композиционными*** средами:

объемное **сочетание** ***разнородных*** компонентов

Одни структурные элементы тканей обладают свойствами ***проводников***, а другие – ***диэлектриков***.

Проводники – это вещества, в которых есть **свободные** заряды, способные перемещаться под действием электрического поля.

(**ионы**)

токи проводимости

Диэлектрики – все заряды неподвижны = **связанные** заряды

(**диполи**)

определяют **поляризацию** биологических тканей

❖**Первичное действие *постоянного* тока** связано с

направленным движением ионов, их разделением и **изменением их концентрации** в разных элементах тканей у БМ, а также с **поляризационными явлениями**.

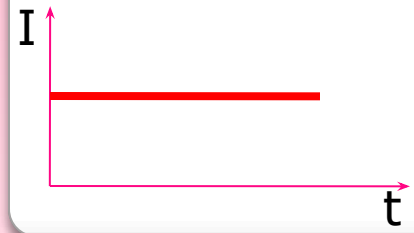
В этом случае тело человека обладает свойствами ***проводника***. В тканях возникает ***ток проводимости,*** который течет по межклеточной жидкости

Здесь ток встречает **наименьшее сопротивление**

Лечебное применение *постоянных* токов и полей
Гальванизация
Лекарственный электрофорез
Франклинизация
Аэроионизация

Луиджи Гальвани
1737-1798
Итальянский анатом и физиолог. **Болонья.**

Гальванизация – физиотерапевтический метод применения с лечебной целью **постоянного непрерывного** электрического **тока малой силы до 50 мА** и **низкого напряжения 60-80 В**, подводимого к телу человека через контактно наложенные электроды.



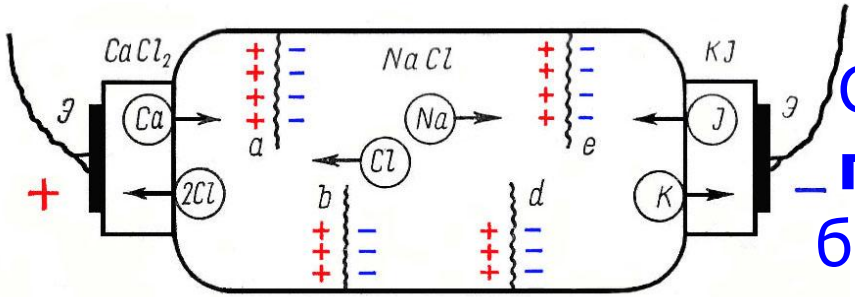
I — до 50 мА $\quad U = 60 \div 80B$

Лекарственный электрофорез

Введение лекарственных веществ через кожу или слизистую оболочку с помощью **постоянного** тока.

$U = 60 \div 80В$ I до 50 мА

Лекарство вводят с того полюса, зарядом которого оно обладает.



С ➖: **J, гепарин,** бром, **пенициллин**

С ➕ : **Li, Na, Ca, новокаин**

Глубина проникновения 0,5 – 0,7 см

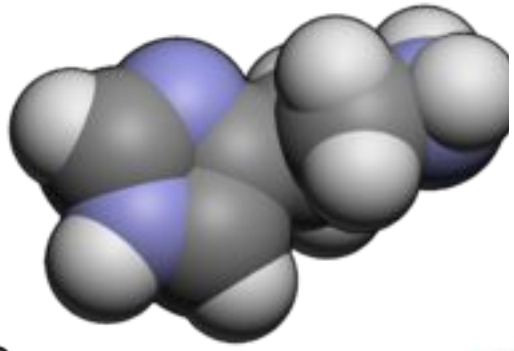
1. Лекарство вводится в **<u>ионной</u>**, а не в молекулярной форме.
его фармакологическая активность.

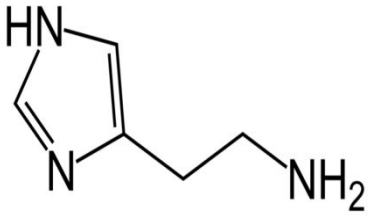
2. Создается **кожное депо ионов**- продлевается лечебный эффект до 20 дней.

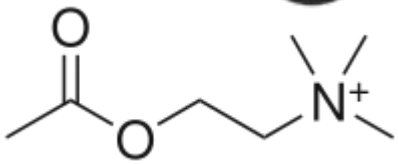
3. Возможность создания максимальной концентрации в патологическом очаге

Кроме того , в биологических тканях образуются **биологически активные вещества**

Гистамин



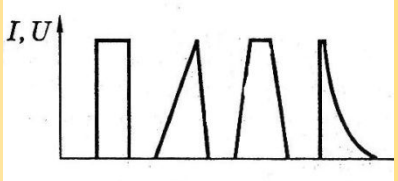




АХ- **ацетилхолин**- химический <u>передатчик нервного возбуждения</u> в холинергических синапсах.

❖Механизм действия *импульсных* токов

Токи **НЧ** оказывают **раздражающее (стимулирующее) действие,**

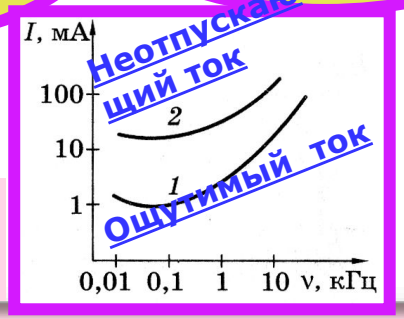


так как есть быстрое перемещения и **накопление** ионов Na^+ и K^+ у клеточных мембран, а во время паузы – быстрое удаление

Пороговые значения тока

Порог ощутимого тока
1 мА

Порог неотпускающего тока
10-15 мА



Опасен ток – 50 мА

Лечебное применение *НЧ токов*
Диадинамические токи
Электросон
Амплипульстерапия
Стимуляторы
Дефибриллятор

❖ ***Биологическое действие электромагнитного поля высокой частоты***

Токи и поля **ВЧ** оказывают:

ТЕПЛОВОЕ + ОСЦИЛЛЯТОРНОЕ + СПЕЦИФИЧЕСКОЕ действие

ПОЧЕМУ тепловое?

Высокая частота (ВЧ) – это частота > 200 кГЦ. При этой частоте **смещение ионов соизмеримо** с их смещением в результате молекулярно-теплового движения.

Почему **нет** раздражающего действия токов ВЧ, как при действии токов НЧ?

нетепловое действие

Осцилляторное =

Oscillate= вибрировать

Специфическое

= ***частотнозависимые эффекты***

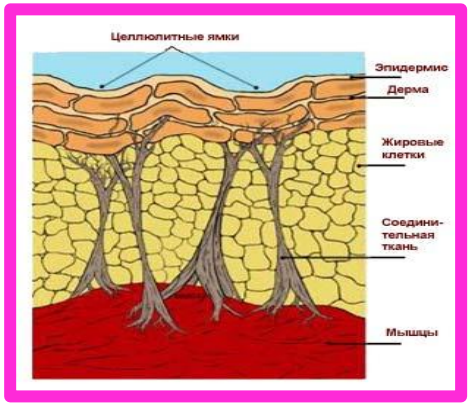
заключается в различных внутримолекулярных физико-химических процессах, структурных перестройках, которые могут менять функциональное состояние клеток ткани.

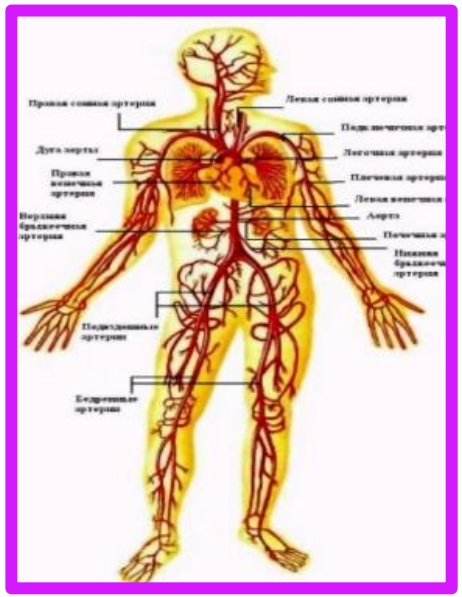
Лечебное применение *высокочастотных* токов и полей	Действующий фактор
Дарсонвализация	Эл. ток
Диатермия Электрохирургия	Эл. ток
Индуктотермия	магнитное поле
УВЧ-терапия	электрическое поле
СВЧ-терапия	э/м волны
КВЧ-терапия	

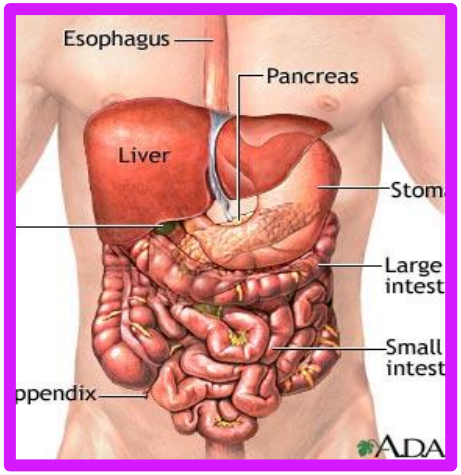
Пассивные электрические свойства тканей тела человека

Живые ткани являются ***композиционными*** средами:

объемное **сочетание** ***разнородных*** компонентов







Биологические ткани разнородны по электропроводности и являются

Проводники

Внутриклеточная и межклеточная жидкость

- обладают **свободными** зарядами (**ионы**)
- определяют **электропроводность** биологических тканей

ρ

- **токи проводимости**

Диэлектрики

Белки

БМ

- обладают ***связанными*** зарядами (**диполи**)
- определяют **поляризацию** биологических тканей

ε

- **токи смещения**

Под действием **внешнего** электромагнитного поля возникают

Свыше 30 МГц

Электропроводность живых тканей

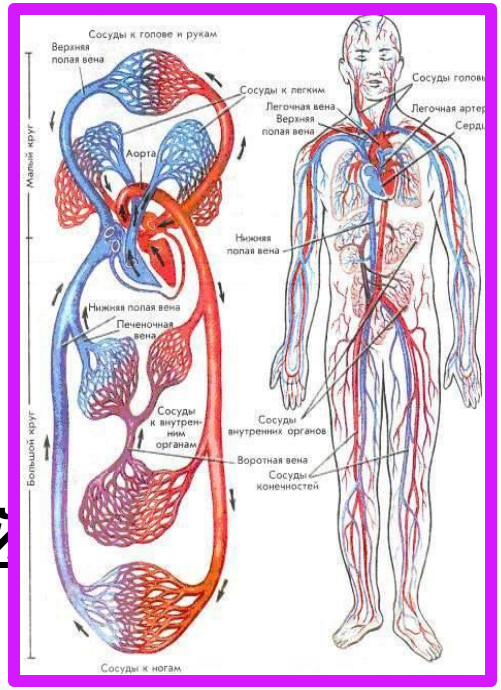
Электропроводность – это способность тканей пропускать *электрический ток* ***под воздействием электрического поля.***

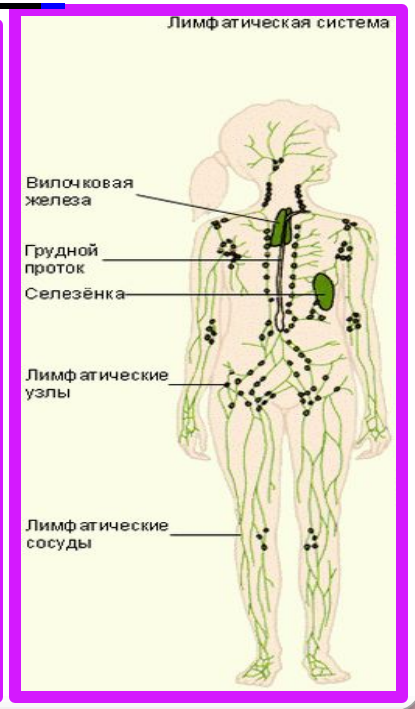
Электропроводность связана с присутствием ***ионов,*** которые являются ***свободными зарядами,*** создающими в организме ***ток проводимости.***

$$G = \frac{1}{R}$$

[См] (сименс)

Электропроводность живых тканей определяется прежде всего ***электрическими свойствами крови, лимфы, межклеточной жидкости и цитозоля.***





Электрический ток выбирает путь, на котором он встречает ***наименьшее сопротивление***

Чем **больше** в тканях ***жидкости***, тем электропроводность G ↑ ….

ВОПРОС: При потливости G… ↑

При воспалении G… ↓

Удельные сопротивления различных тканей и жидкостей организма

Ткань	**ρ, Ом·м**
Спинномозговая жидкость	0,55
Кровь	1,66
Мышцы	2
Ткань мозговая и нервная	14,3
Ткань жировая	33,3
Кожа сухая	10^5
Кость без надкостницы	10^7

Электропроводность биологических живых тканей определяется:

1. наличием **свободных ионов**:

- Их **концентрацией** и
- Их **подвижностью**, а также

2. явлениями **поляризации**.

Закон Ома для биологических объектов

не выполняется.

$$I = \frac{U - \varepsilon_{пол}(t)}{R}$$

А – при отсутствии поляризации

Б – при наличии поляризации (для живых тканей)

Уменьшение тока на **2-3** порядка связано с **явлениями поляризации**

Диэлектрические свойства живых тканей

Диэлектрики – это вещества, в которых **нет** свободных носителей зарядов; только **связанные заряды =диполи**.

При помещении во внешнее электрическое поле, эти **диполи ориентируются вдоль силовых линий поля.** Поле внутри диэлектрика ослабляется, возникают *токи смещения.*

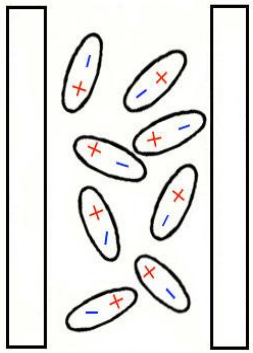
Поляризация – это смещение диполей под действием электрического поля и образование вследствие этого ЭДС, направленной **против** внешнего поля.

Виды поляризации

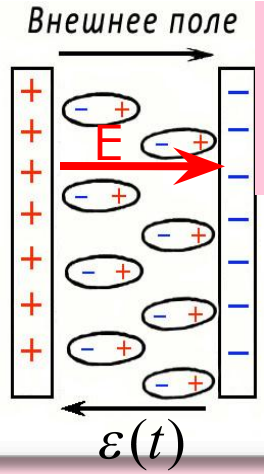
1. **Электронная**

Смещение электронных облаков атомов.

Характерна для неполярных диэлектриков. Инертные газы.



2. Ориентационная = дипольная



Для полярных диэлектриков. *Керосин*.

$\varepsilon_{воды}=81$

$\varepsilon_{крови}=85$

$\varepsilon_{жира}=6\text{-}12$

3. Ионная

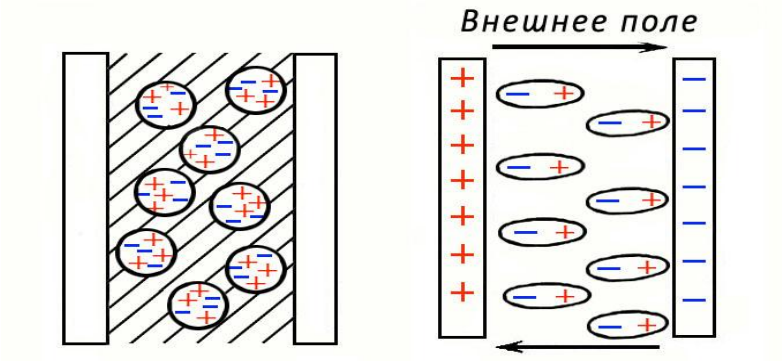
Для кристаллических диэлектриков

ПОЛЯРИЗИЦИЯ ЖИВОЙ ТКАНИ

1. Макрополяризация = поверхностная поляризация . За счет наличия **БМ**

Компартмент

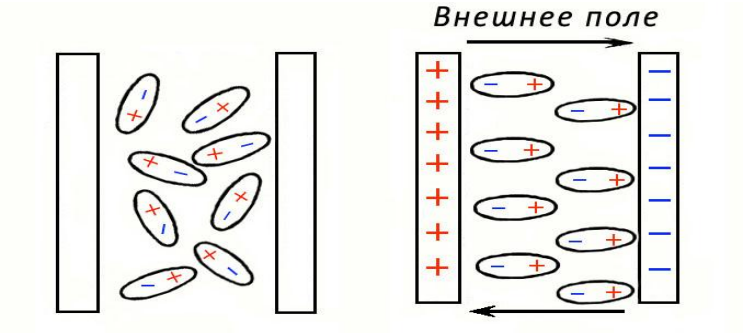
Участвует двойной электрический слой



$\varepsilon(t)$

2. Ориентационная поляризация макромолекул

Белки

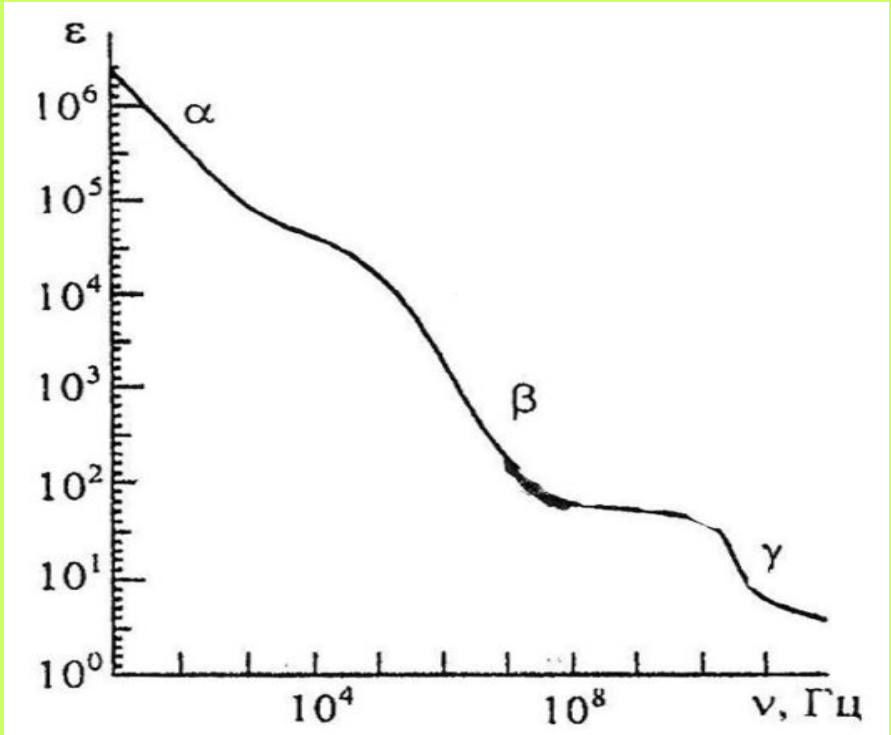


3. Поляризация микромолекул воды в белковых комплексах.

Дисперсия диэлектрической проницаемости. Области α- , β- и γ- дисперсии

Это зависимость $\varepsilon = f(\nu)$

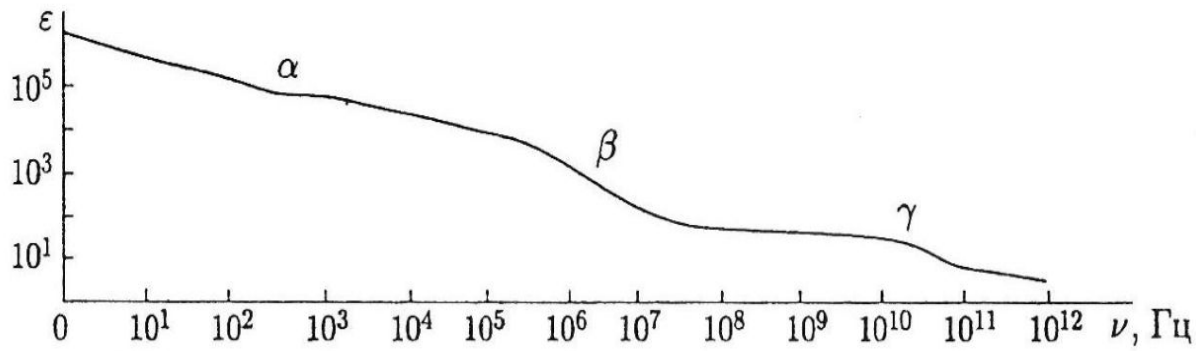
Шванн, 1963 г



Дисперсия диэлектрической проницаемости скелетной мышцы

С ↑ частоты ε ↓, так как **поляризационные явления** сказываются **меньше**

Выделяют **3 области дисперсии**, что указывает на **различие механизмов поляризации** тканей в разных частотных диапазонах.



Область **α-дисперсии** занимает область низких частот **до 1 кГц.** Здесь силен эффект **поверхностной поляризации**: с ↑ ν вращение гигантских диполей **запаздывает** по отношению к $E_{внеш}$

Область **β-дисперсии от 10^4 до 10^8 Гц** (радиочастоты). **Выпадает ориентационная поляризация белковых макромолекул.** Они не успевают поворачиваться

Область **γ-дисперсии (>10^{10}Гц** – микроволновые частоты). ⇩ степень поляризации молекул **воды**. Даже они не успевают поворачиваться с такой частотой.

Природа емкостных свойств тканей человека

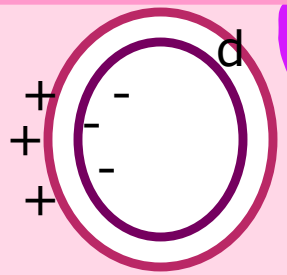
Два вида емкостей в живых тканях:

Статическая ёмкость

$$C_{ст} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d}$$

$$C_{ст} = 1 \frac{мкФ}{см^2}$$

Цитоплазма клеток и тканевая жидкость – электролиты разделены - **конденсатор.**



Практически **не зависит** от функционального состояния ткани

Поляризационная ёмкость

возникает! в момент прохождения тока (ионы – накапливаются около БМ, диполи – смещаются и переориентируются).

$$C_р = \frac{\Delta q}{\Delta \varphi}$$

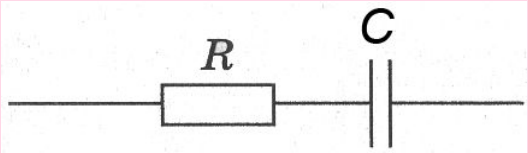
$$C_р = 0{,}1 \div 10 \frac{мкФ}{см^2}$$

Зависит от функционального состояния ткани (высокая $C_р$ характерна для **живых** неповрежденных тканей).

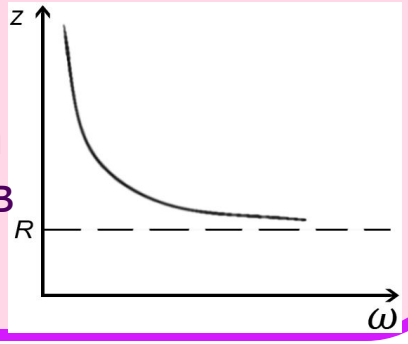
Эквивалентные электрические схемы тканей организма

Это **модели** биологических тканей

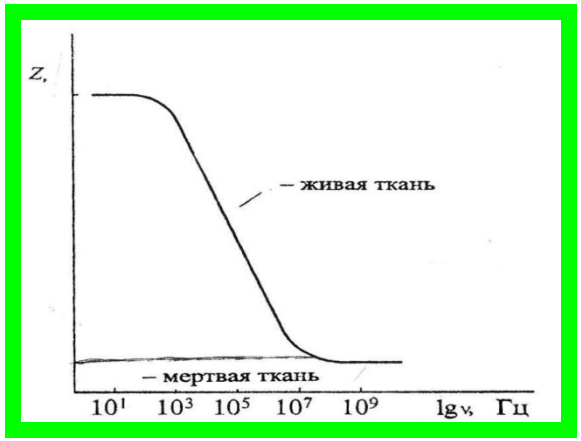
1. Последовательное соединение R и C



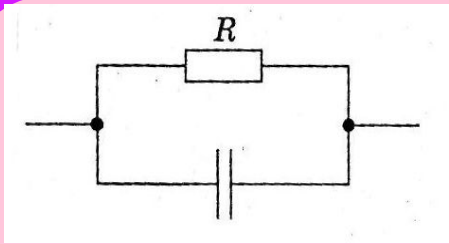
Не работает на **НЧ.** Конденсатор на **НЧ** – это разрыв цепи



Работу этих моделей проверяли по кривой дисперсии импеданса

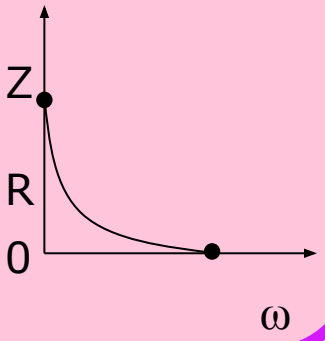


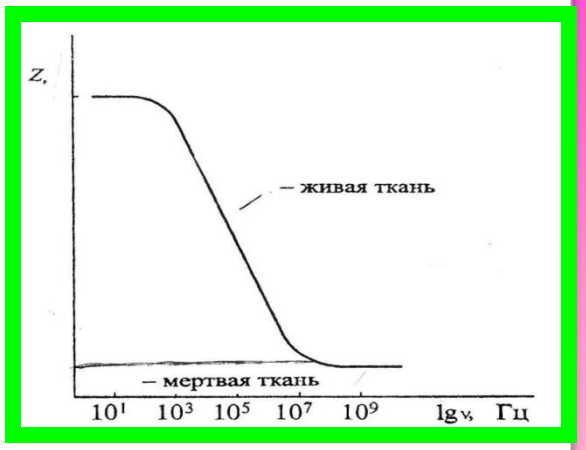
2. Параллельное соединение R и C



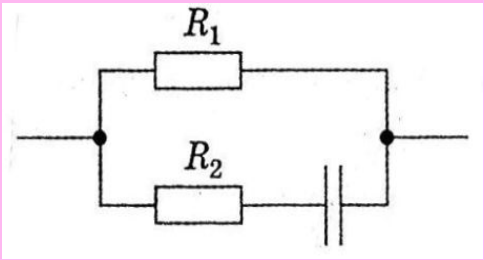
Не работает на **ВЧ**

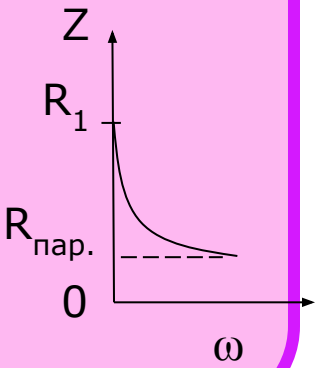
$$X_C = \frac{1}{\omega C}$$

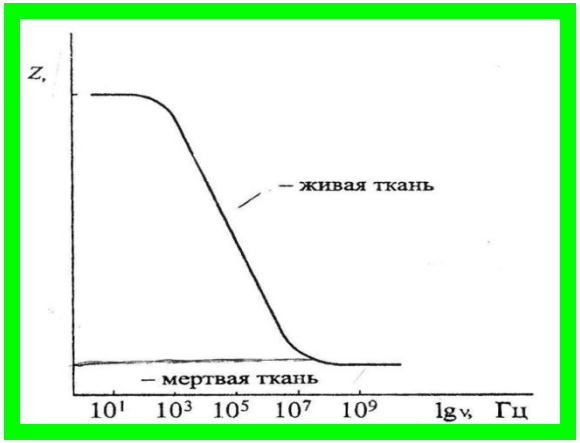




3. Межклеточное R_1 и внутриклеточное R_2 сопротивления





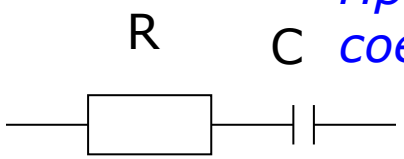


Полное сопротивление (импеданс) живых тканей, зависимость от частоты

Импеданс тканей организма – это полное сопротивление живых объектов **переменному** току. Это геометрическая сумма **активного** и **емкостного** сопротивления живых клеток

Сила тока **опережает** по фазе приложенное напряжение

При последовательном соединении

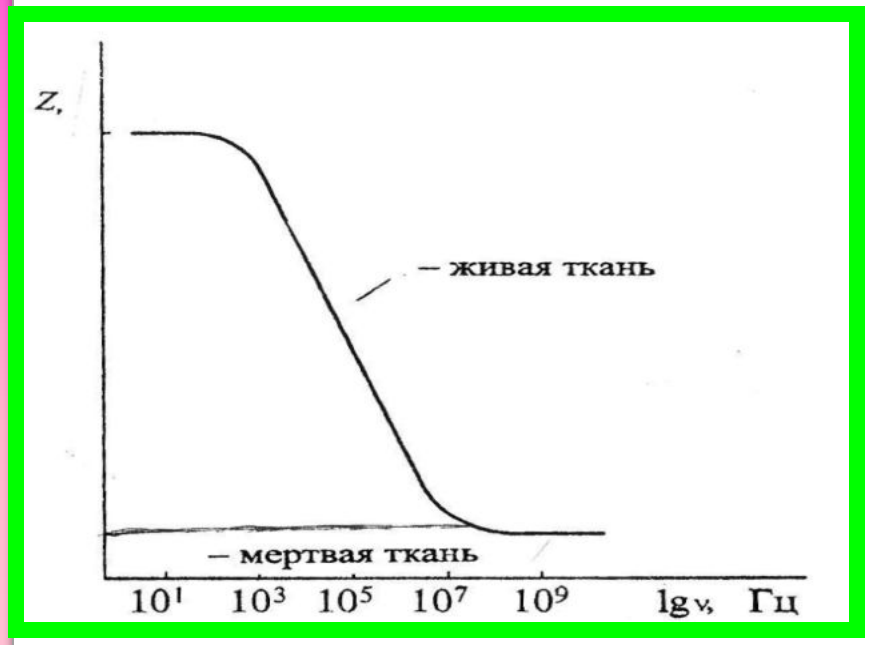


$$Z_{\text{ткани}} = \sqrt{R^2 + X^2_c}$$

[Ом]

$$Z_{\text{ткани}} = \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$$

Зависимость импеданса от частоты



Z= f(ν)

Частотная зависимость импеданса=
= ***дисперсия*** *импеданса*

По мере ↑ частоты ν импеданс ↓ Z .

Дисперсия импеданса – это результат того, что при **низких** частотах, как и <u>при постоянном токе</u>, *электропроводность* связана с **<u>поляризацией</u>**. И по мере ↑ частоты ν поляризационные явления сказываются меньше.

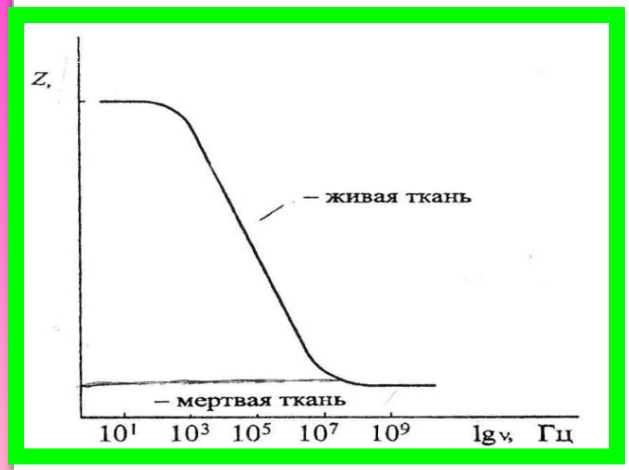
Дисперсия импеданса присуща только **живым** клеткам

По кривой дисперсии импеданса судят о

- уровне обмена веществ
- отклонению от нормы метаболизма
- времени снятия наложенного жгута
- границах гематомы

Корреляция только с содержанием *креатинфосфокиназы*

Коэффициент поляризации



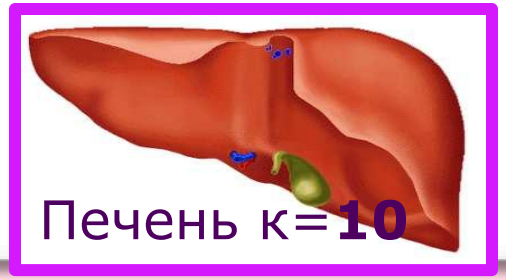
$$K = \frac{Z_{нч}}{Z_{вч}}$$

К>1 - живая ткань
К=1 – мертвая ткань

Судят о

уровне метаболизма

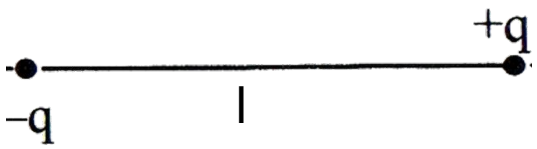
положении в эволюционном ряду



E. Coli
к=2

Электрический диполь

Это система ***двух*** зарядов, ***равных по модулю***, но ***противоположных по знаку***.

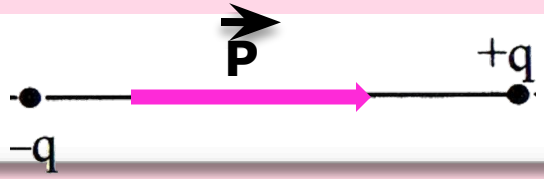


Где l – плечо диполя,
P – **дипольный момент = электрический момент**

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

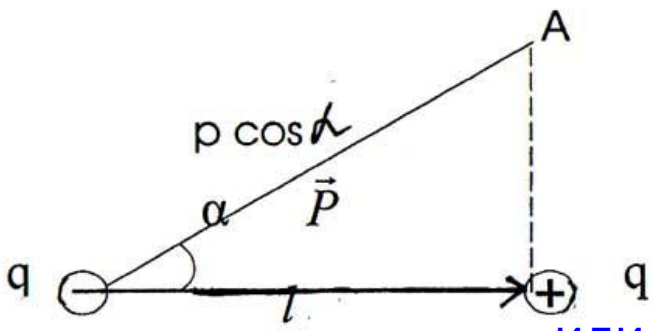
$$p = [Кл \cdot м]$$

Дипольный момент направлен от **минуса к плюсу**



Электрическое поле диполя

Сам диполь является **источником** электрического поля.



$$\varphi_A = K\frac{P\cdot\cos\alpha}{\varepsilon r^2}$$

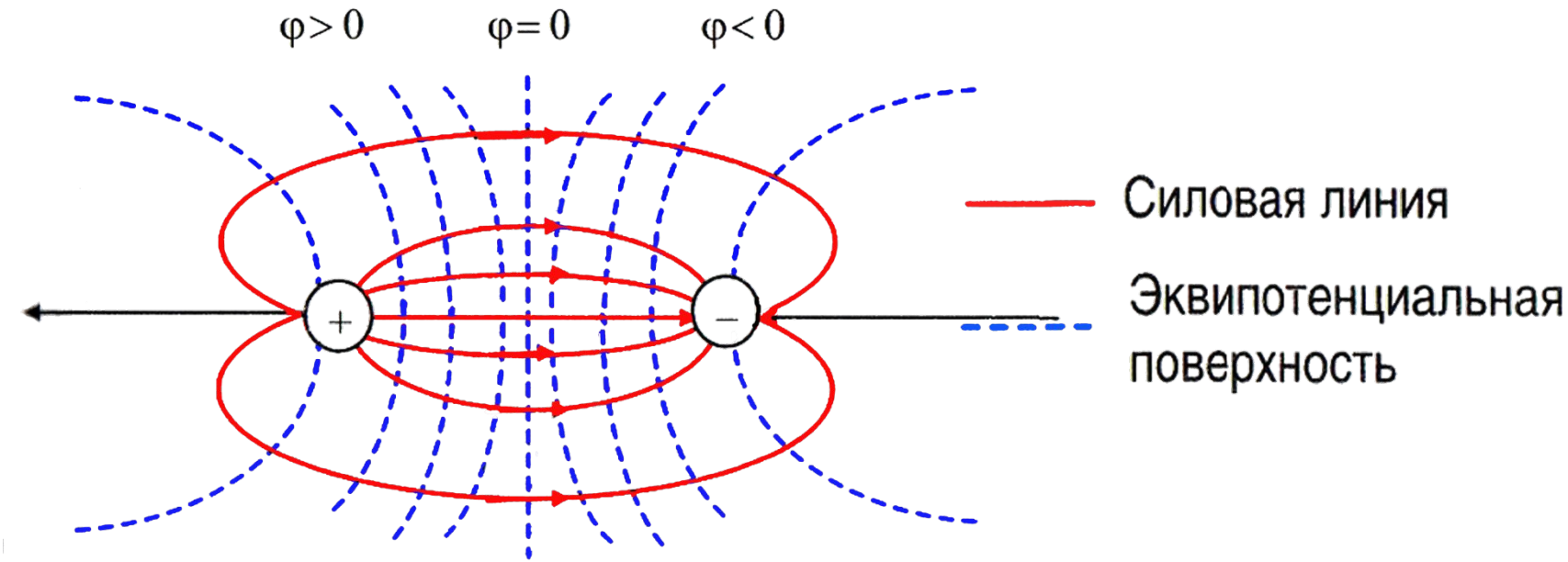
или

$$\varphi_A = \frac{P\cdot\cos\alpha}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}$$

$$\varphi \approx P\cos\alpha$$

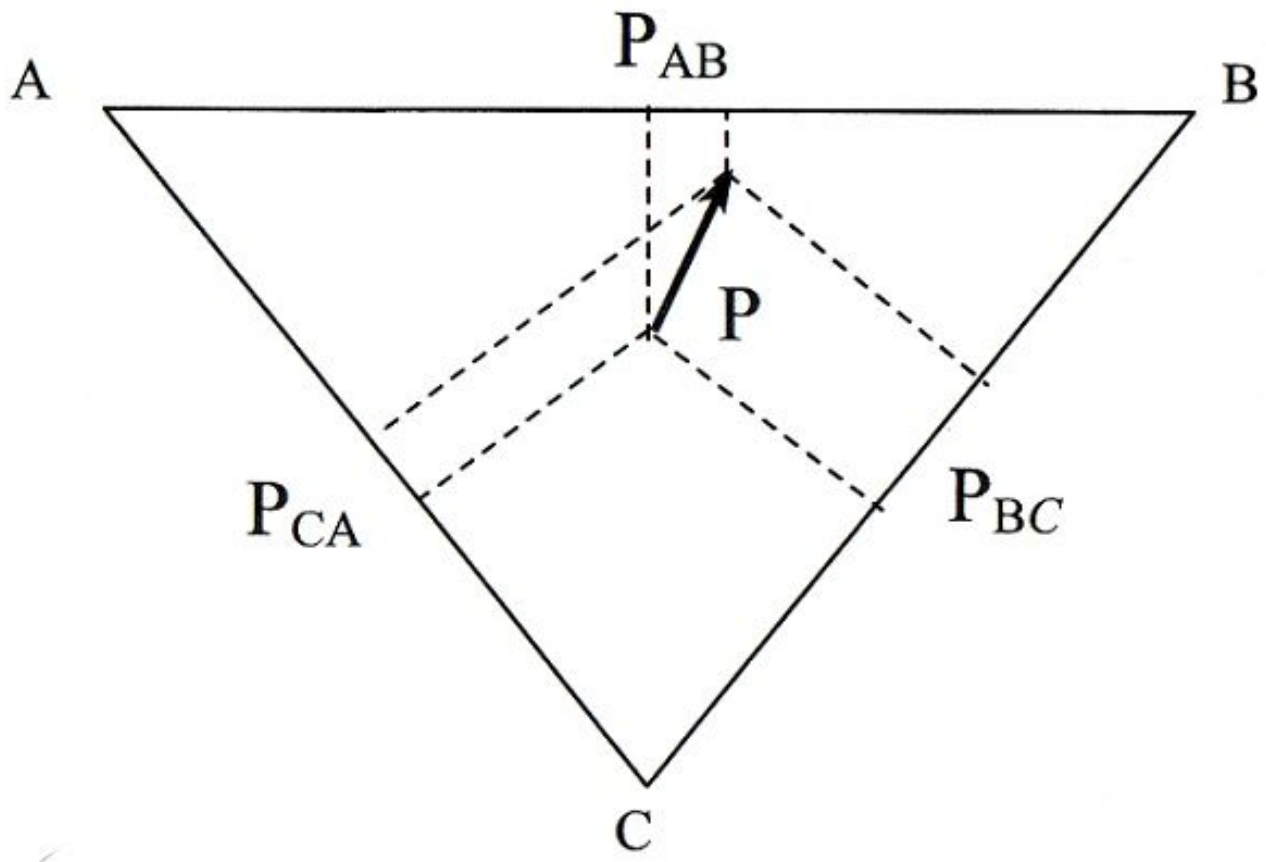
Потенциал в т. А прямо пропорционален **проекции дипольного момента.**

Электрическое поле диполя (продолжение)



Диполь – это частный случай системы электрических зарядов, обладающих определенной симметрией.
Общее название – **электрический мультиполь**.

Диполь в равностороннем треугольнике



Токовый диполь

Токовый диполь – это ***двухполюсная система***, состоящая из ***истока*** ➕ и ***стока*** ➖ тока в проводящей среде

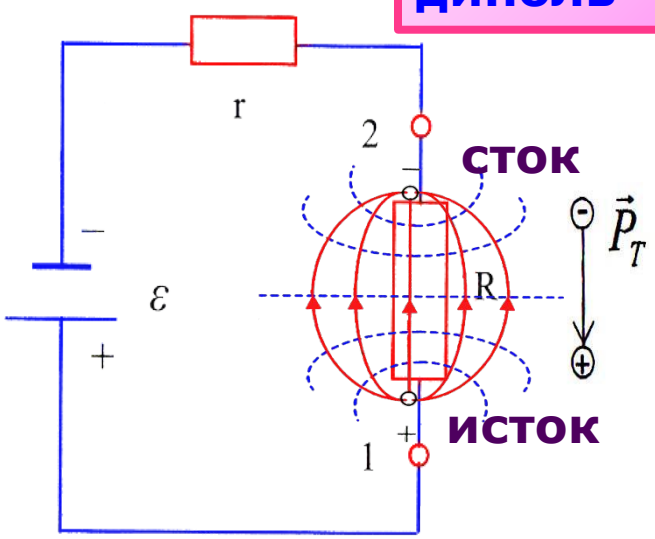
$$I = \varepsilon/(R + r)$$

Ток токового диполя:

$$I = \frac{\varepsilon}{r}$$

r - внутреннее сопротивление источника тока;
R – сопротивление проводящей среды;
l- расстояние между истоком и стоком
ε- ЭДС источника тока.

r>>R –токовый диполь



Электрический момент **токового диполя**:

$$\overrightarrow{P_T} = I \cdot \vec{l}$$

$[A \cdot M]$

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

Электрическое поле токового диполя в неограниченной проводящей среде

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

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

или

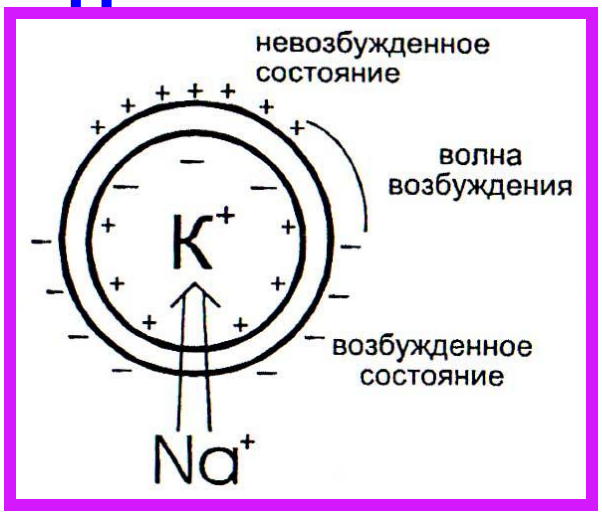
$$\varphi = \frac{\rho}{4\pi} \cdot \frac{P_T \cos\alpha}{r^2}$$

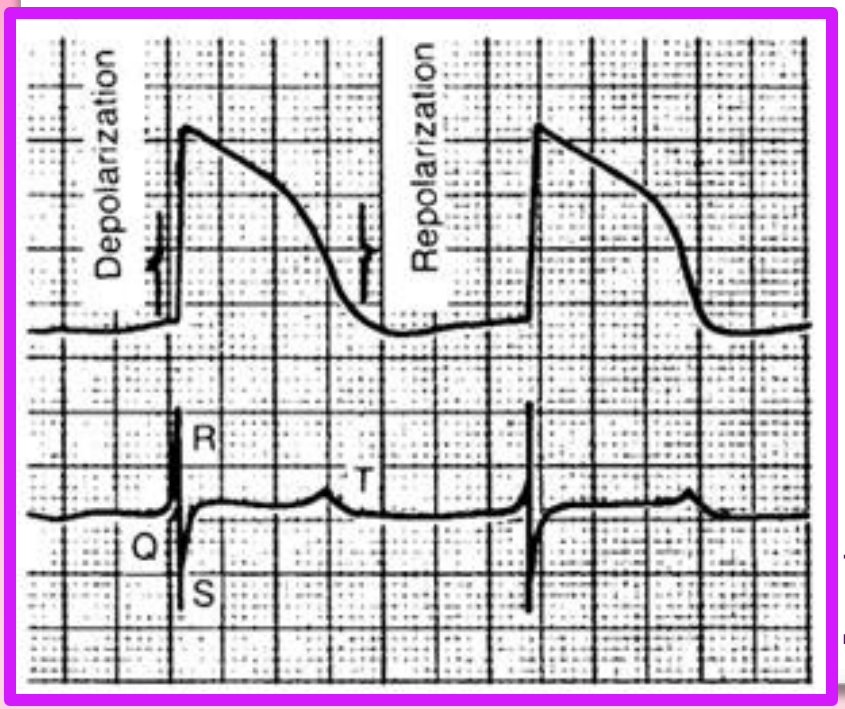
ρ-удельное сопротивление

Где γ удельная электропроводность, характеризует проводящие свойства среды.

Откуда берется этот диполь и дипольный момент в организме?

Это распространение волны возбуждения по нервным и мышечным волокнам.



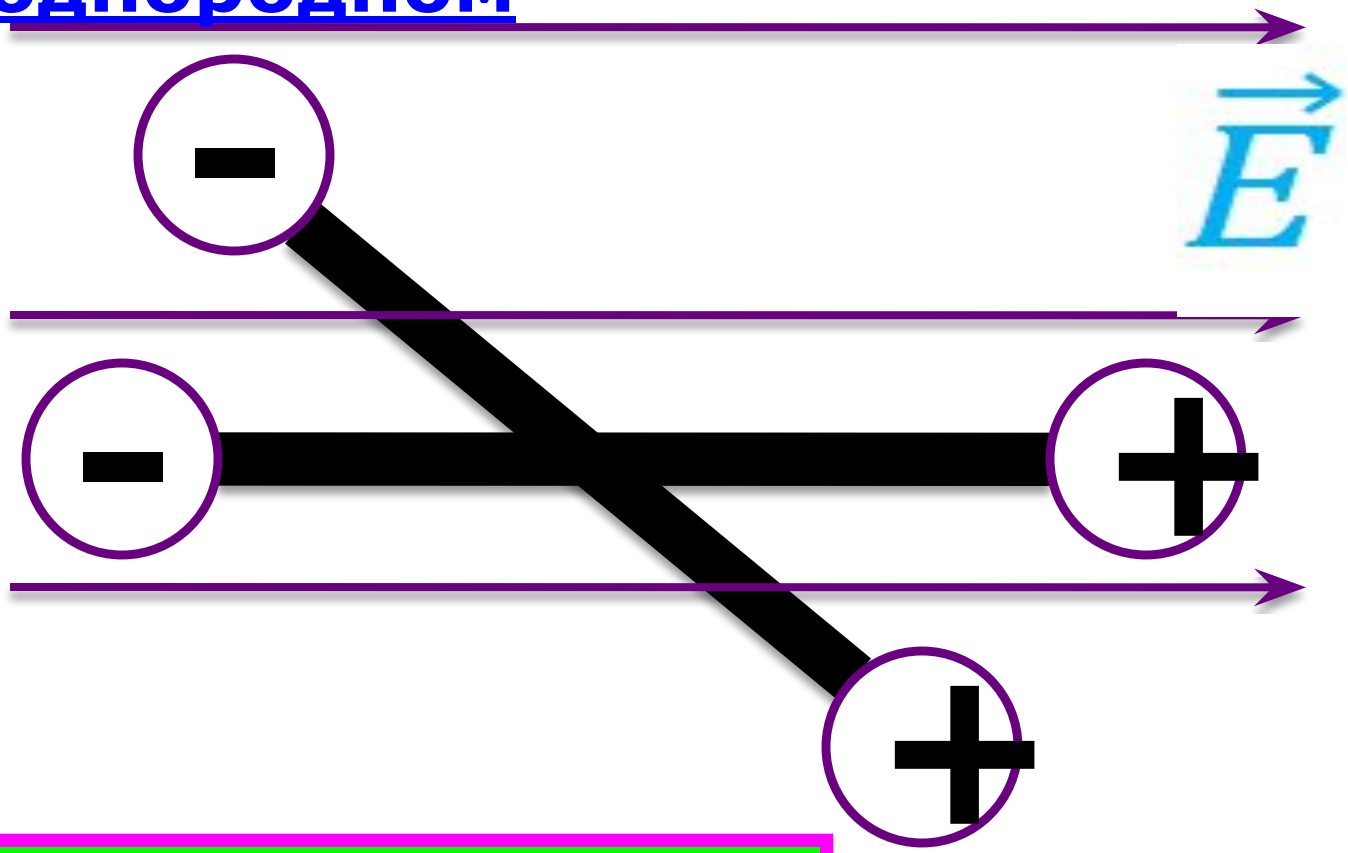


Изменения электрического поля сердца происходят при **деполяризации и реполяризации** мембраны клеток сердца.

Корреляция между кривой трансмембранного потенциала действия и кривой ЭКГ

Диполь в электрическом поле

- В однородном



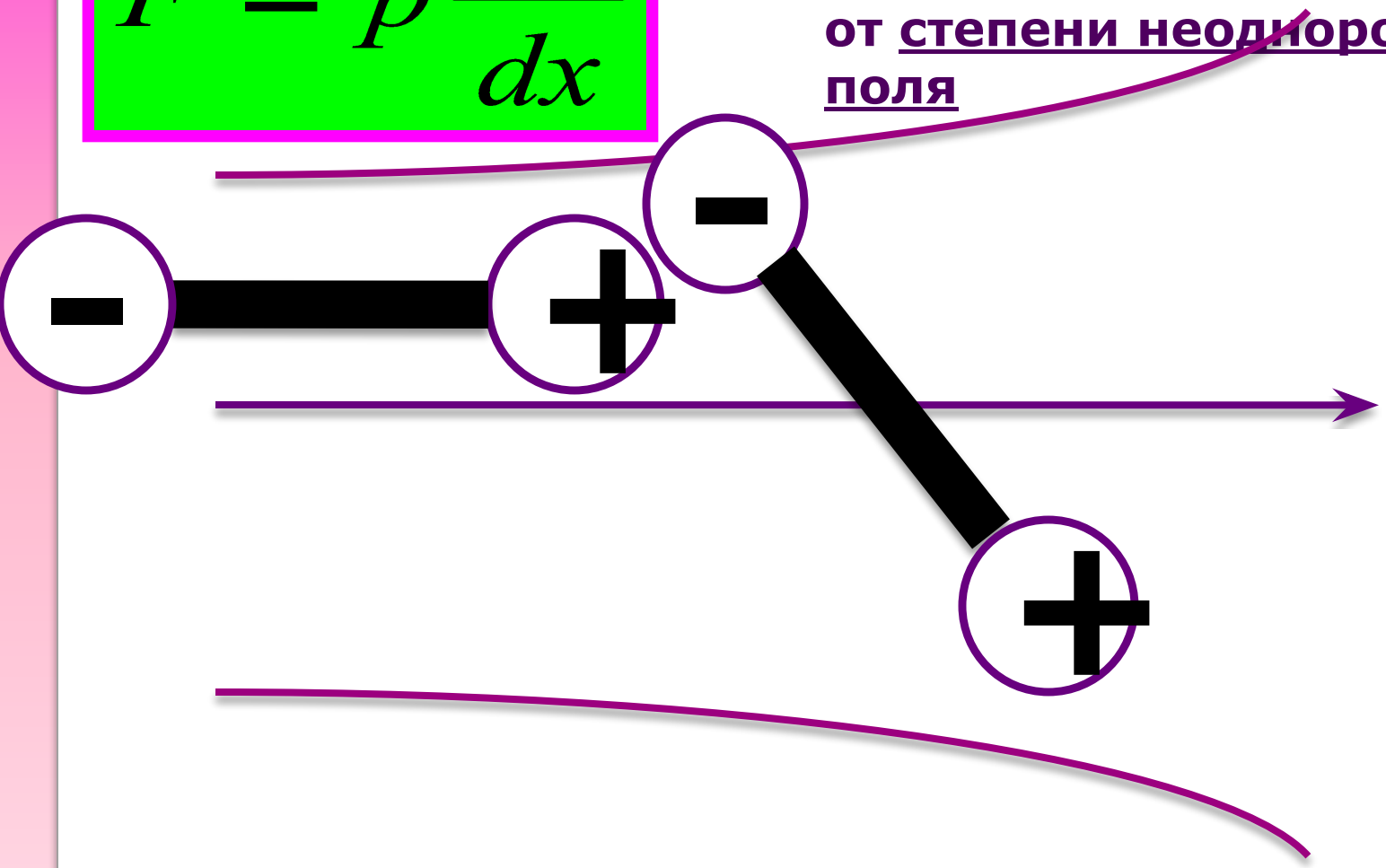
$$M = p \cdot E \sin\alpha$$

М - вращающий момент

- **В неоднородном**

$$F = p\frac{dE}{dx}$$

на диполь действует сила, зависящая от его электрического момента и от степени неоднородности поля



Представление об эквивалентном электрическом генераторе сердца, головного мозга и мышц

Биопотенциал ***органа*** отличен от биопотенциала ***клетки***, так как

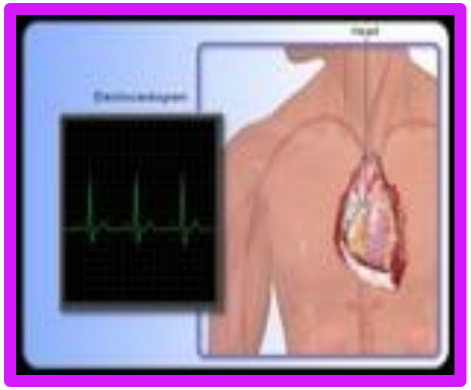
$$\text{БП}_{\text{органа}} = \Sigma\ \text{ПД}_{\text{отдельных клеточных элементов}}$$

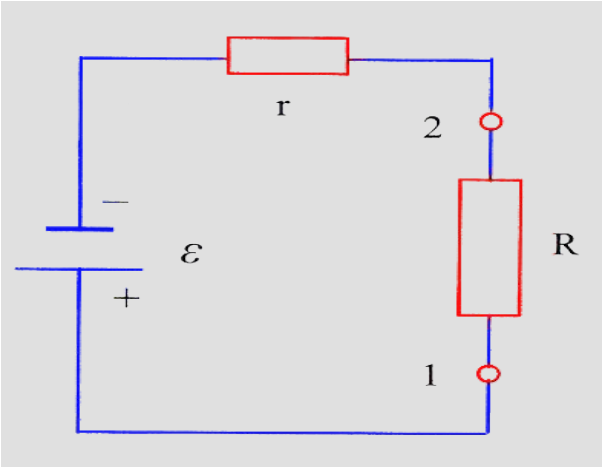
Очень трудно описать изменения во времени. Надо учитывать не только I и l каждого из диполей, но и фазовые сдвиги между биопотенциалами под электродами. *Поэтому для оценки функционального состояния органа по его электрической активности используют принцип эквивалентного генератора.*

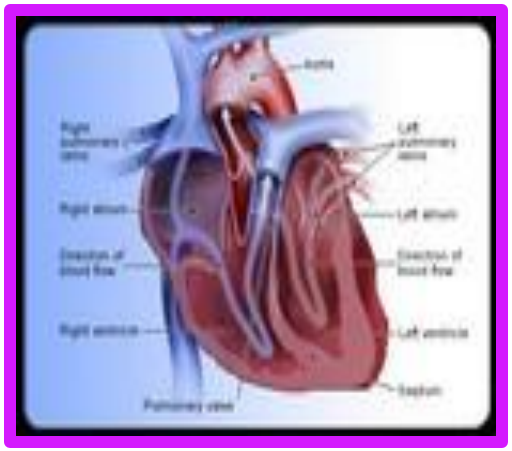
Принцип эквивалентного генератора.

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.*

ПРИМЕР: В теории Эйнтховена **сердце**, клетки которого возбуждаются в сложной последовательности, представляется **токовым диполем**. Он и является **эквивалентным генератором.**



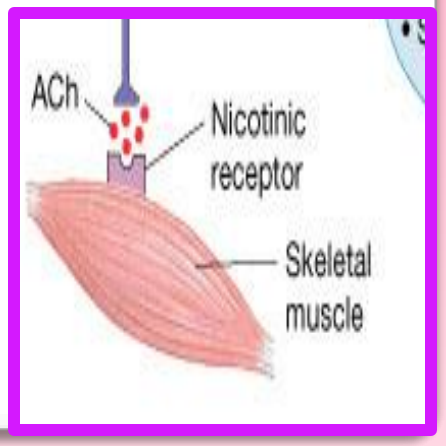




ПРИМЕР: ***Мозг, мышцы*** также являются источниками биопотенциалов, создают вокруг себя э/м поле,

которое ***меняется*** с течением времени.

$$\Delta\varphi = f(t)$$



ЭКГ – электрокардиография – регистрация 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***

ВСЕ ОНИ МАЛОЙ АМПЛИТУДЫ И НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ.

Биопотенциалы	Интервал частот, Гц	Амплитуда сигналов, мВ
ЭКГ	0,2 – 120	0,3 – 3,0
ЭЭГ	1 – 300	0,005 – 0,3
ЭМГ	3 – 600	0,03 – 1,5
ЭГГ	0,05 – 0,2	0,2 – 1,0

Прямая и обратная задачи электрографии

Прямая

выяснение механизма возникновения электрограмм.

Расчет распределения электрического потенциала на заданной поверхности тела.

Обратная

(*диагностическая*)

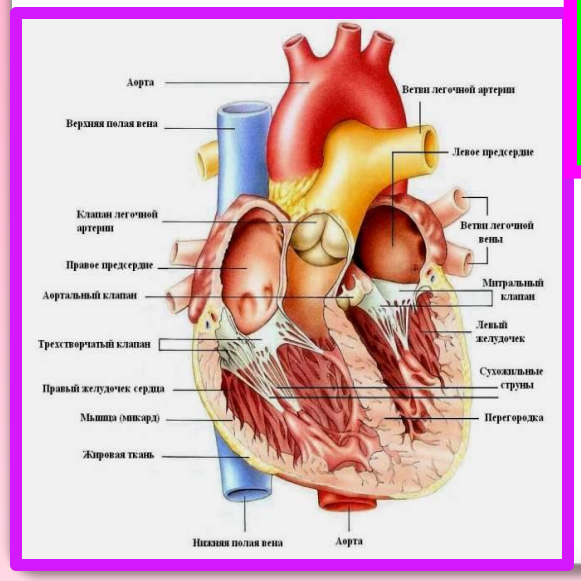
выявление **состояния органа** по характеру его электрограммы

Регистрируя и измеряя ЭКГ, ЭЭГ, определяют функциональное состояние сердца, мозга.

Модель Эйнтховена

Это модель, в которой электрическая активность миокарда заменяется действием одного эквивалентного точечного генератора (*диполя*).

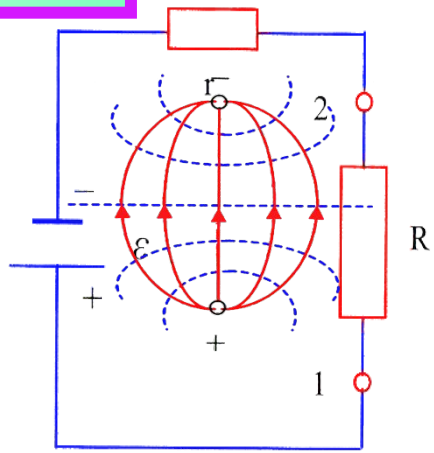
Интегральный вектор сердца = дипольный момент сердца. Это результирующий вектор отдельных векторов – совокупности множества точечных диполей.



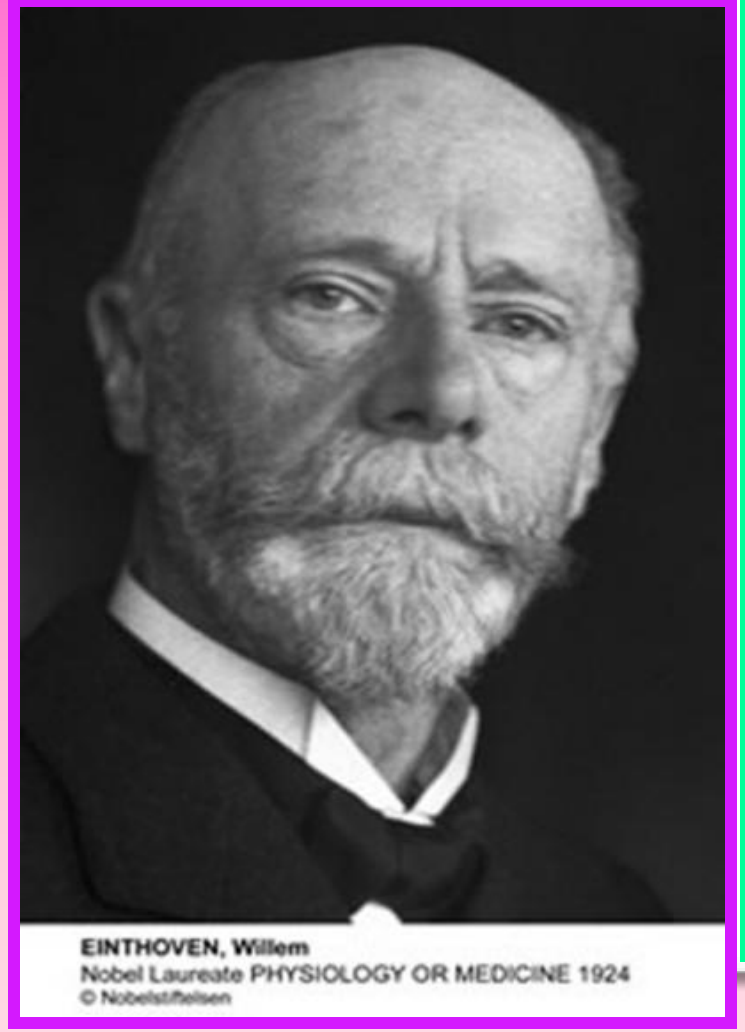
$$\vec{P}_c = \sum_{i=1}^{n} \vec{p}_i$$

$$\varphi \approx P\cos\alpha$$

P_c **меняется беспрестанно.**



Исследуя изменения ***напряжения*** на поверхности тела человека, можно судить о ***проекциях*** ***дипольного момента сердца*** $\vec{P}_{\tilde{n}}$ и о **БП** сердца.



ЭЙНТХОВЕН

(Einthowen) Виллем (1860-1927), Нидерландский физиолог, основоположник электрокардиографии. Сконструировал (1903) прибор для регистрации электрической активности сердца, впервые (1906) использовал электрокардиографию в диагностических целях. Нобелевская премия по физиологии и медицине (1924).

Основные положения теории Эйнтховена

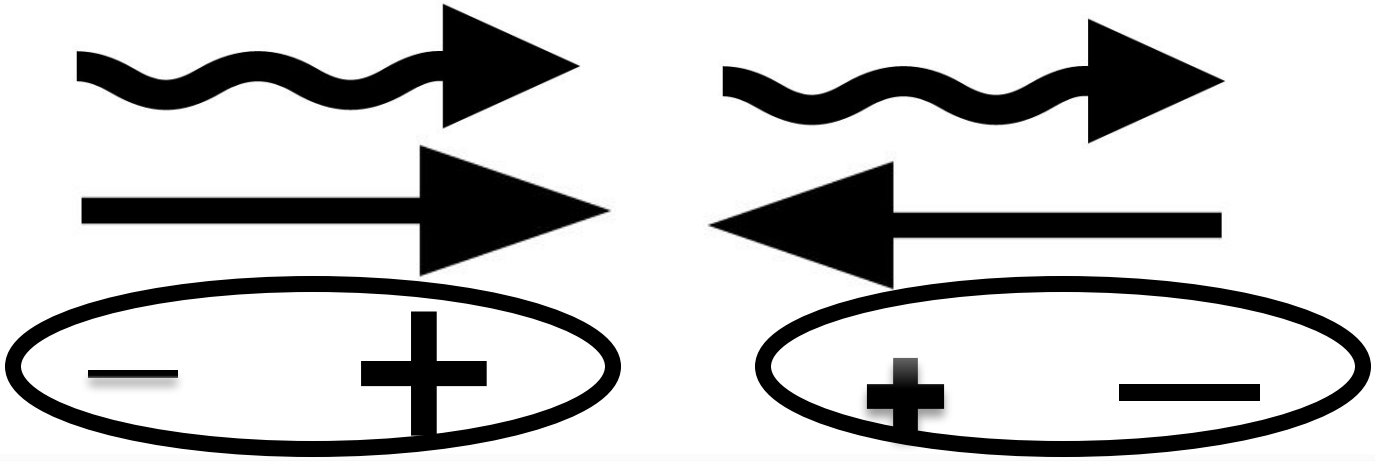
1. Сердце есть токовый диполь в однородной проводящей среде

Часть миокарда заряжена ⊖ возбуждена, а часть ⊕

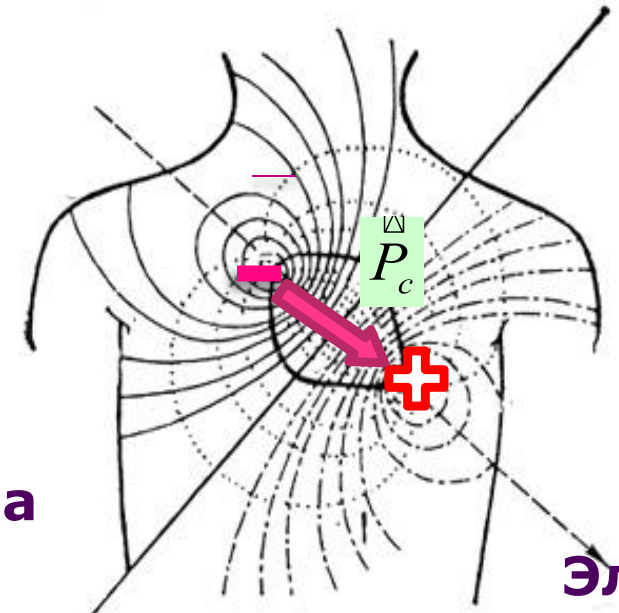
2. Дипольный момент сердца – этого токового диполя все время **поворачивается, изменяет свое положение** за время сердечного цикла.

Направление процесса

Дипольный момент



3. В соответствии с этим изменяется разность потенциалов между определенными точками на теле человека.



Электрическая ось сердца

Теория **Эйнтховена** ***нестрогая:***

1. Проводимость среды все время меняется (вдох-выдох);
2. Точка приложения $\vec{P}_c$ все время меняется;
3. Сердце – не точечный диполь.

За год 100 миллионов ЭКГ – обследований.

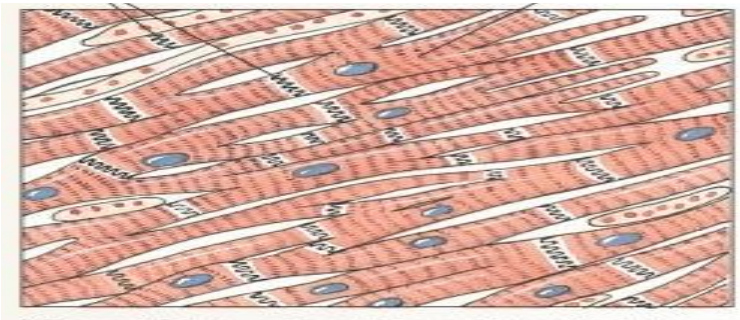
Таблица Значения дипольного момента P_c

Объект	Масса сердца, г	Масса тела, кг	P_c, мА×см
Лягушка	0,16	0,036	0,005
Крыса	1,10	0,28	0,107
Собака	100	14	1,63
Человек	300	70	2,32
Лошадь	3 000	400	13,0

В сердце имеются ***2 типа клеток***:

Сократительные кардиомиоциты или **ТМВ**

ФУНКЦИЯ: **насосная**



Специализированные

Специфическая проводящая система или **АТМВ**

Функция: **формирование импульса и проведение возбуждения** от синоатриального узла до сократительных волокон желудочков.

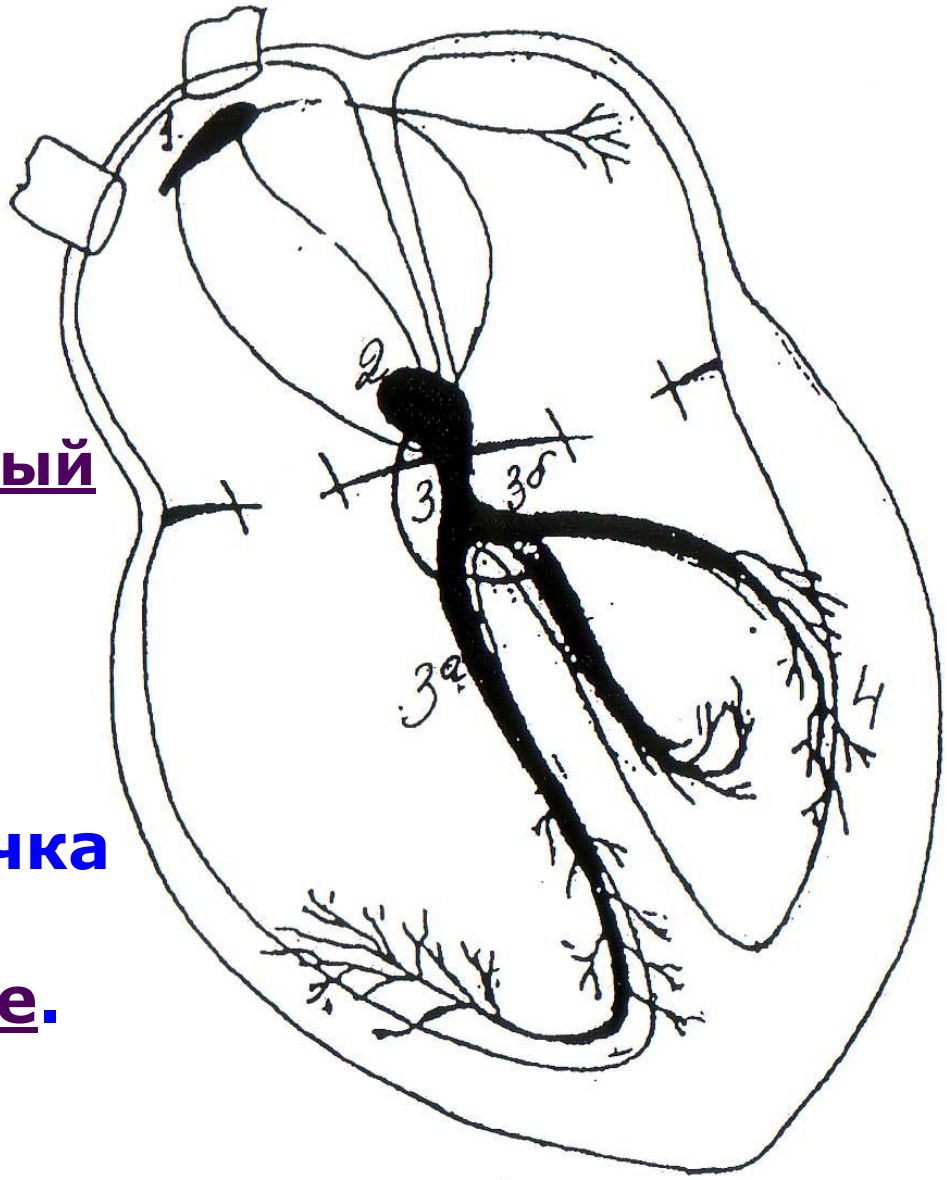
Сердце – насос, **но !**

Насос электрический, причем электричество в виде коротких импульсов оно вырабатывает **само**.

Автоматизм – свойство миокарда возбуждаться под влиянием ПД, спонтанно возникающих в нем самом (без внешних стимулов)

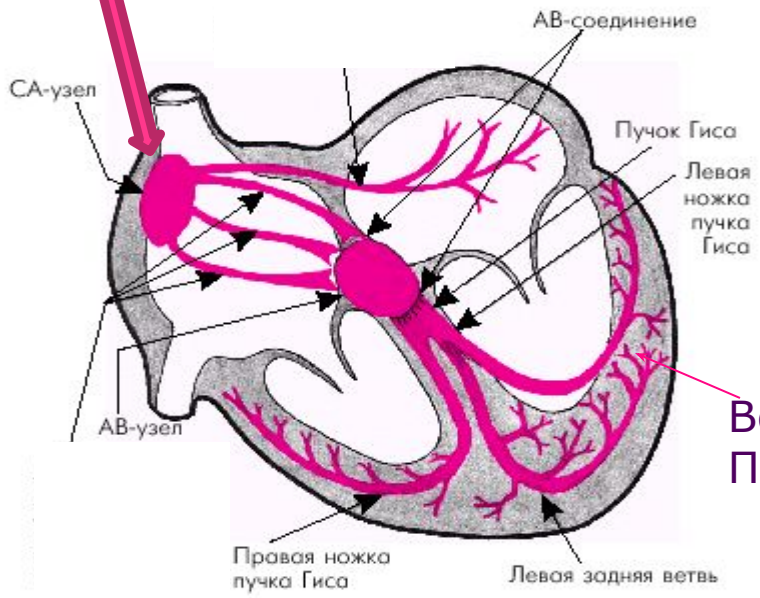
Проводящая система сердца

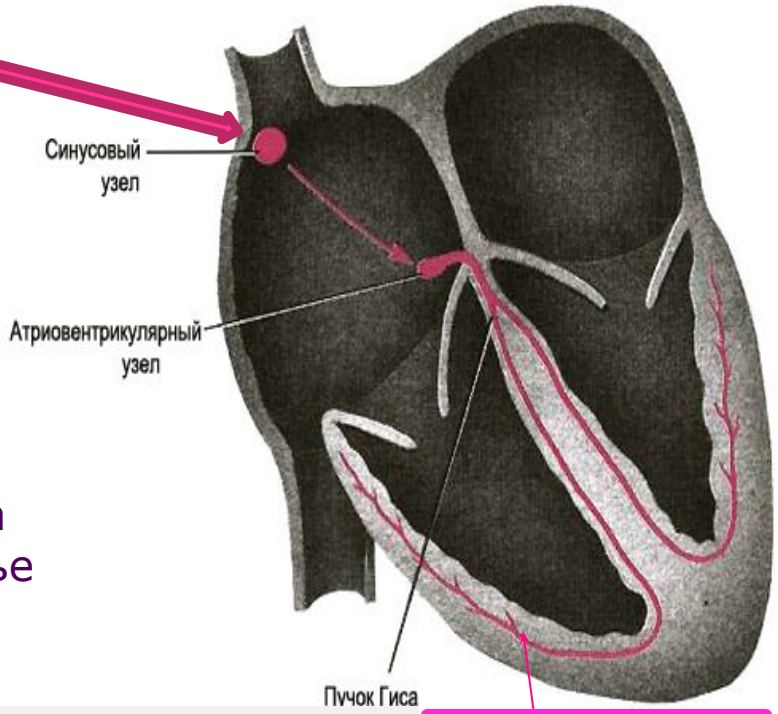
1 – синоатриальный (СА) узел;
2 –артриовентикулярный (АВ) узел;
3 – пучок Гиса;
3а – правая ножка пучка Гиса;
3б – левая ножка пучка Гиса;
4 – волокна Пуркинье.



Пейсмекер

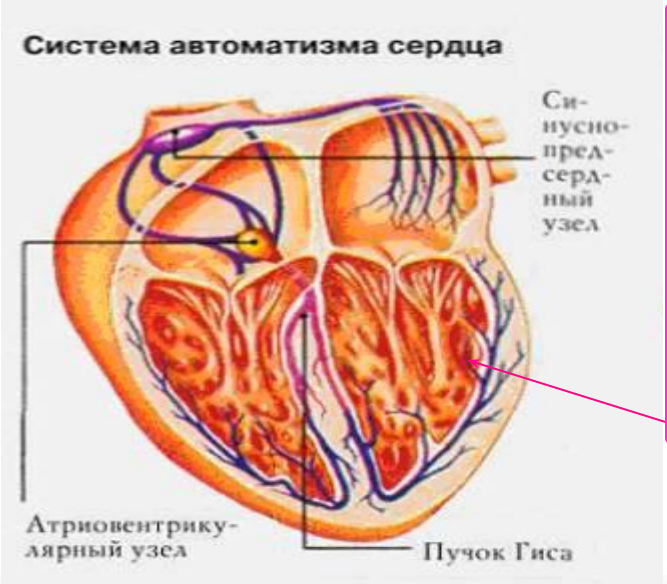
Pace-maker
водитель ритма





Волокна Пуркинье

1. **СА узел 0,03 м/с**
2. **АВ узел 0,02 м/с**
3. **Пучок Гиса 1 м/с**
4. **Волокна Пуркинье 4-5 м/с**



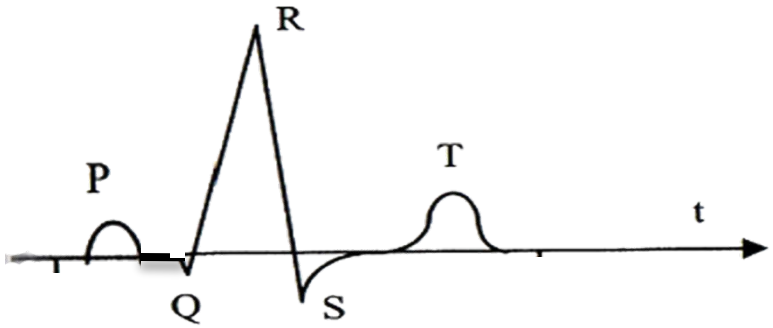
Волокна Пуркинье

Генез электрокардиограмм в трех стандартных отведениях в рамках данной модели

Электрокардиограмма (ЭКГ) – это запись с поверхности тела напряжений, которые отражают распространение волны возбуждения по миокарду.

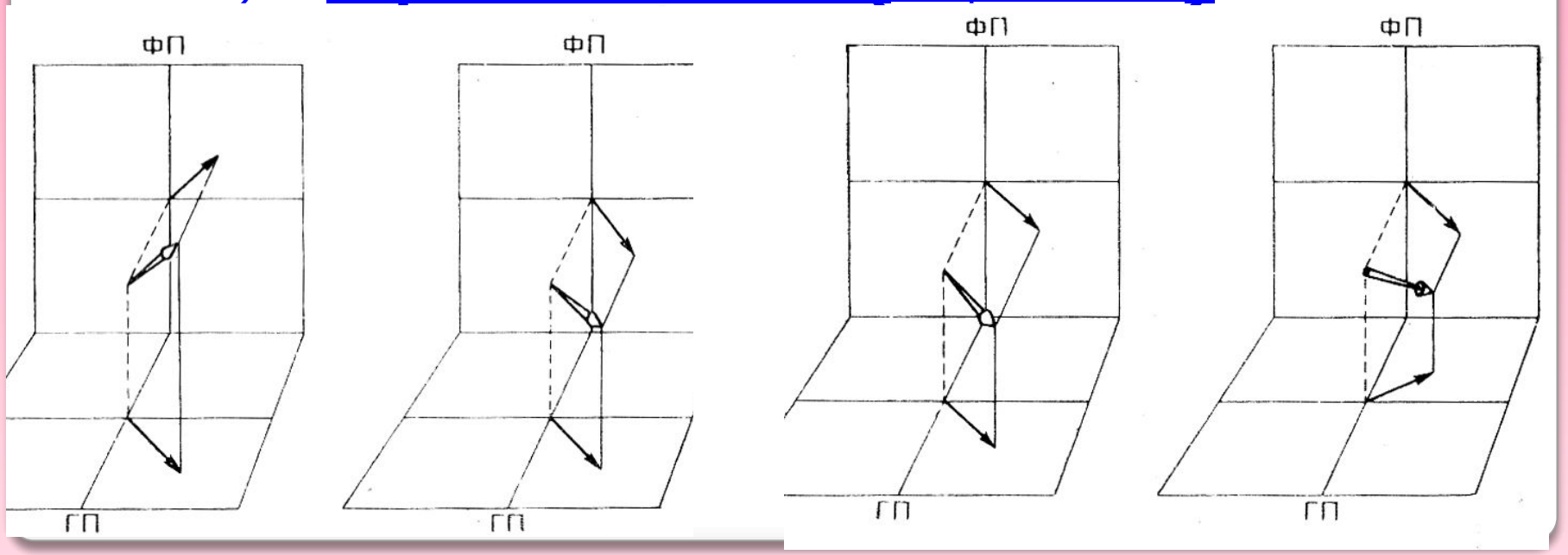
Электрокардиограмма (ЭКГ)- это регистрация биопотенциалов, возникающих при работе сердца.

- Зубец **P** - **деполяризация** (**возбуждение**) предсердий
- **QRS**- **деполяризация** (**возбуждение**) желудочков
- Зубец **T** –**реполяризация** (**расслабление**) желудочков.



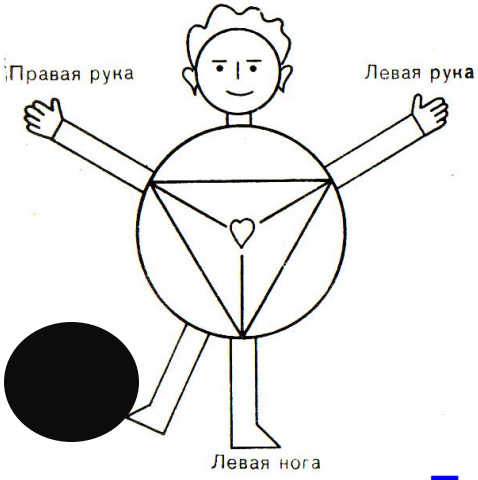
<u>Отведение</u> – это **разность потенциалов**, регистрируемая между двумя точками тела.

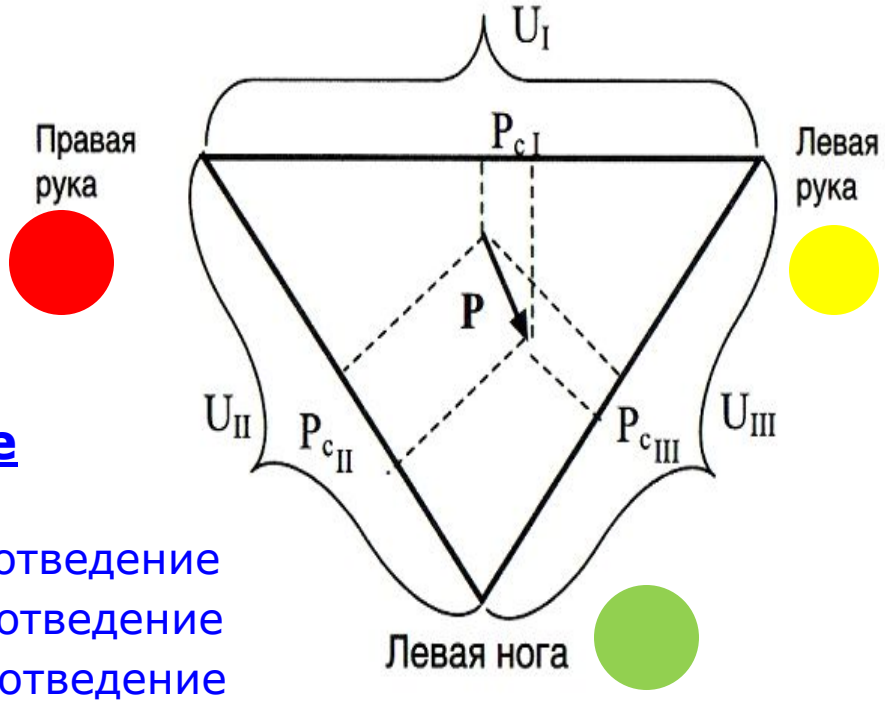
Сердце является **трехмерным** органом. А его изображение надо зарегистрировать на **плоской** ленте. Поэтому должны быть найдены такие отведения, которые позволяют получить проекцию $\vec{P}_c$ в двух плоскостях: во **<u>фронтальной</u>** (вверх-вниз) и **<u>горизонтальной (</u>**<u>вперед-назад</u>**<u>)</u>**.



Эйнтховен *предложил рассматривать* ***равносторонний треугольник****, в центре которого находится электрический вектор сердца и измерять* ***разность потенциалов*** *между двумя точками тела, расположенными во* *фронтальной плоскости.*

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



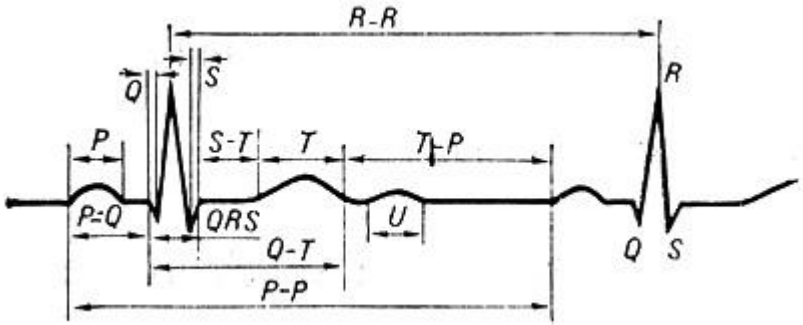


Биполярные отведения

I **стандартное** отведение

II **стандартное** отведение

III**стандартное** отведение



2 параметра ЭКГ:

1. **Амплитуда** зубцов ЭКГ- это проекция электрического вектора сердца $\vec{P}_c$ на соответствующее отведение.

2. **Временные интервалы**. Они говорят о скорости проведения возбуждения.

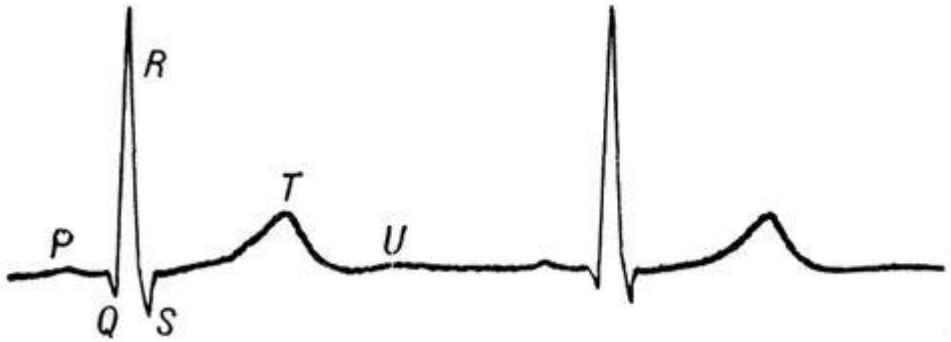
НАПРИМЕР:

Амплитуда R зубца до **1,6 мВ**

RR- интервал – длительность сердечного цикла- порядка **0,8 с**

ВОПРОС:

- **В норме интервал PQ 0,12 – 0,2 с. У больного И-ва 0,3 с. О чем это говорит?**



Электрокардиограмма – это сложная кривая с **5** *зубцами* **P, Q, R, S,T** и **3** *интервалами нулевого* потенциала.

Сравнение последовательности активации сердца с падением ряда костей домино

ВОПРОС: Сколько раз за сердечный цикл $\overset{\Delta}{P}_{c}$ обращается в 0?

1. Ни разу
2. 1 раз
3. 3 раза
4. 5 раз

Ответ: 3 раза

Черные кости домино символизируют сердечный пейсмекер.

Белые кости домино символизируют структуры, лишенные автоматизма.