

# Список литературы

1. Ремизов А.Н., Максина А.Г., Потапенко А.Я. Медицинская и биологическая физика.
2. Лещенко В.Г., Ильич Г.К. Медицинская и биологическая физика.
3. Федорова В.Н., Фаустов Е.В. Медицинская и биологическая физика. Курс лекций с задачами.
4. Огурцов А.Н. Лекции по физике.
5. Иродов И.Е.: 3. Основные законы электромагнетизма; 4. Волновые процессы. Основные законы оптики.
6. Савельев И.В. Общий курс физики.
7. Сивухин Д.В. Курс общей физики.
8. Матвеев А.Н.: 3. Электричество и магнетизм; 4. Оптика.
9. Самойлов В.О. Медицинская биофизика.
10. Подколзина В.А. Медицинская физика. Конспект лекций.
11. Костылев В.А., Наркевич Б.Я. Медицинская физика.

**E-mail: [lgaliull@kpfu.ru](mailto:lgaliull@kpfu.ru)**

**Книги здесь: <https://cloud.mail.ru/public/GjLT/s38zxkN9t>**

# Электричество и магнетизм

Электрические и магнитные явления связаны с особой формой существования материи — электрическими и магнитными полями и их взаимодействием. Эти поля в общем случае настолько взаимозависимы, что принято говорить о едином электромагнитном поле.

## Медико-биологические приложения:

- 1. Понимание электрических процессов, происходящих в организме, а также электрических и магнитных характеристик биологических сред. - физические основы электрокардиографии, магнитобиологии и реографии, электропроводимость биологических тканей и жидкостей и др.**
- 2. Понимание механизма воздействия электромагнитных полей на организм.**
- 3. Приборное, аппаратурное.**

# Электрический заряд

**Электрический заряд** – это физическая величина, определяющая свойство частиц или тел вступать в электромагнитные силовые взаимодействия.

## Виды зарядов

+ Положительные +  
(напр. протоны)

- Отрицательные -  
(напр. электроны)

**В положительно  
заряженном теле  
недостаток  
электронов**



**В отрицательно  
заряженном теле  
избыток  
электронов**

# Электрический заряд

Элементарный заряд (заряд электрона):  $e = 1,67 \cdot 10^{-19}$  Кл

Заряд тела  $q$  образуется совокупностью элементарных зарядов, он является целым кратным заряду электрона  $e$ :

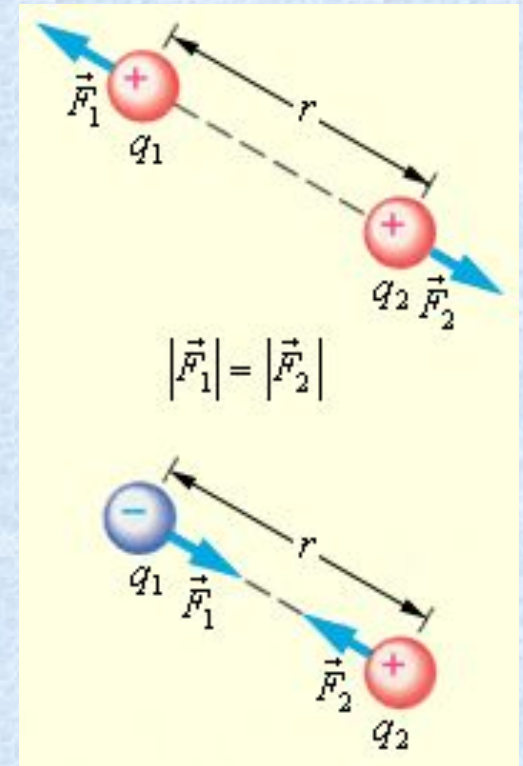
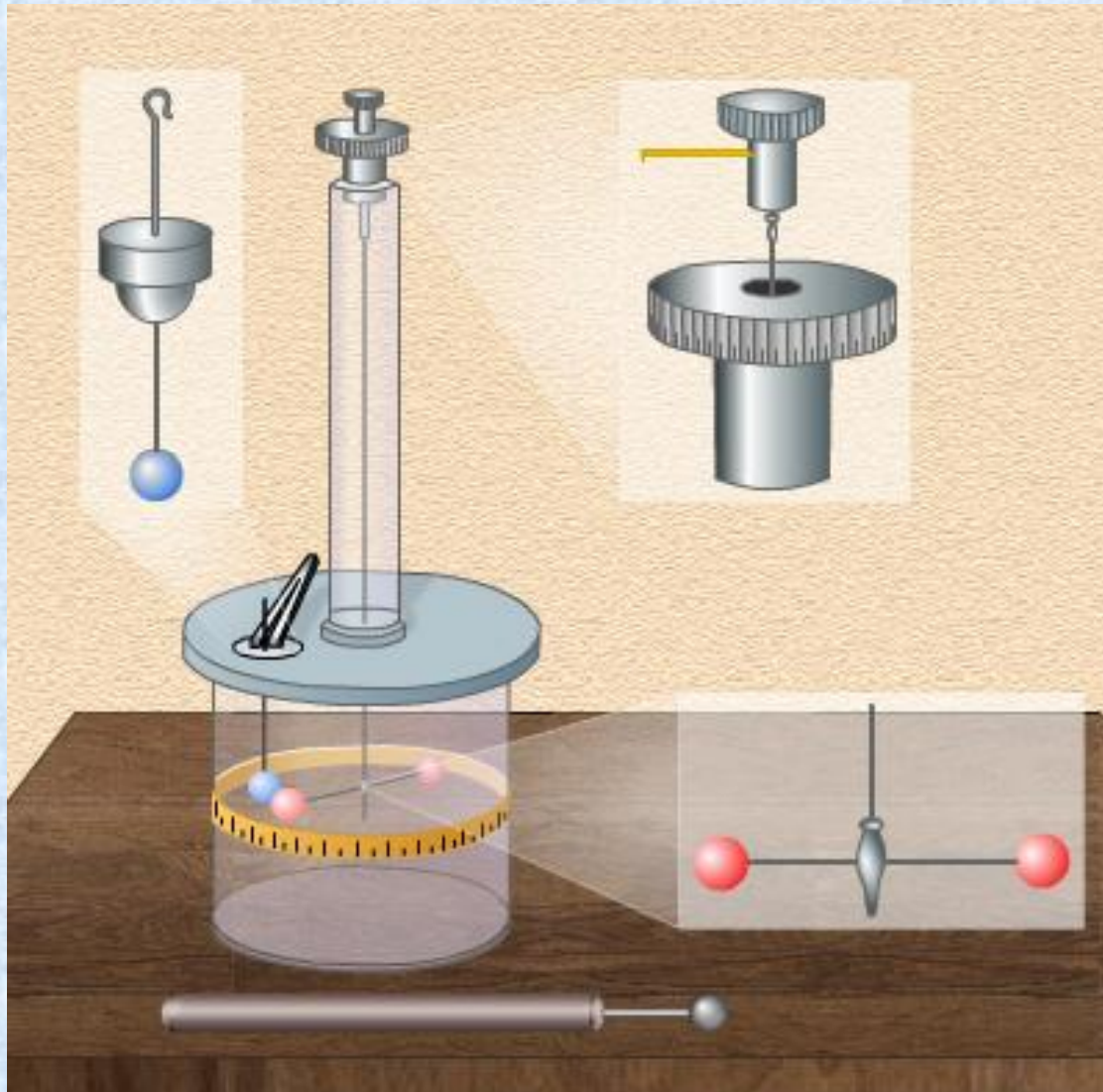
$$q = \pm Ne \quad (N - \text{целое число})$$

## Закон сохранения заряда:

**Суммарный заряд электрически изолированной системы остается постоянной**

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}$$

# Взаимодействие зарядов. Опыт Кулона



$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

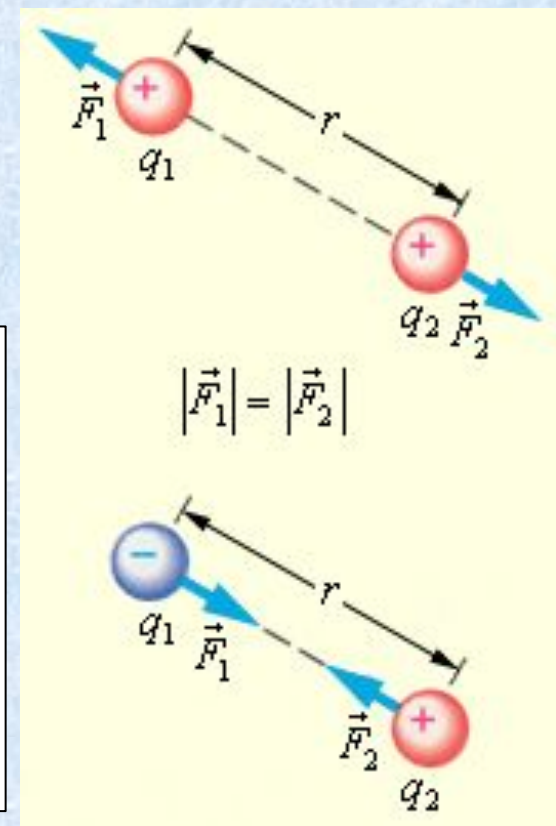
# Закон Кулона

**Сила взаимодействия двух точечных зарядов пропорциональна величине каждого из зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.**

Направление силы совпадает с проходящей через заряды прямой.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\epsilon r^2}$$

**F** — сила взаимодействия зарядов;  
**k** — коэффициент пропорциональности;  
**q<sub>1</sub>** и **q<sub>2</sub>** — величины взаимодействующих зарядов;  
**r** — расстояние между ними.  
**ε** — диэлектрическая проницаемость среды



$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}$$

## Закон Кулона. Коэффициент k

Коэффициент k зависит от выбора системы единиц измерения.

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}$$

$\varepsilon_0$  - электрическая постоянная (диэлектрическая проницаемость вакуума). В системе единиц СИ:

$$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \frac{\Phi}{\text{м}}$$

$$\frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{м}}{\Phi}$$

# Электрическое поле

Взаимодействие между зарядами осуществляется через электрическое поле.

Силовая характеристика электрического поля –  
**Напряженность  $\vec{E}$ .**

Напряженность электрического поля ( $\vec{E}$ ) в некоторой точке пространства равна силе, действующей на единичный точечный заряд, помещенный в эту точку:

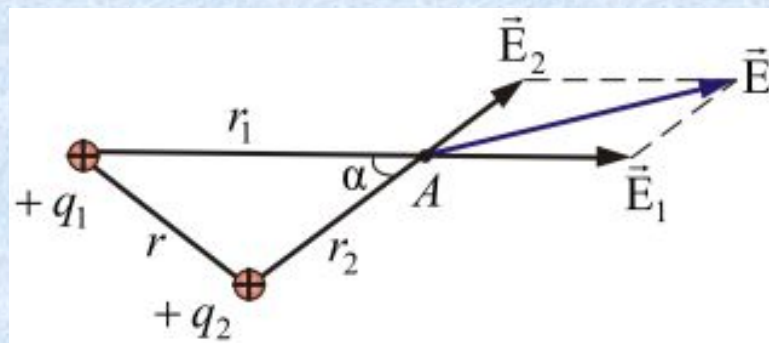
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}, [\text{В/м}] \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = \vec{E} \cdot q$$



# Принцип суперпозиции электрических полей

Напряженность поля системы зарядов равна векторной сумме напряженностей полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности.

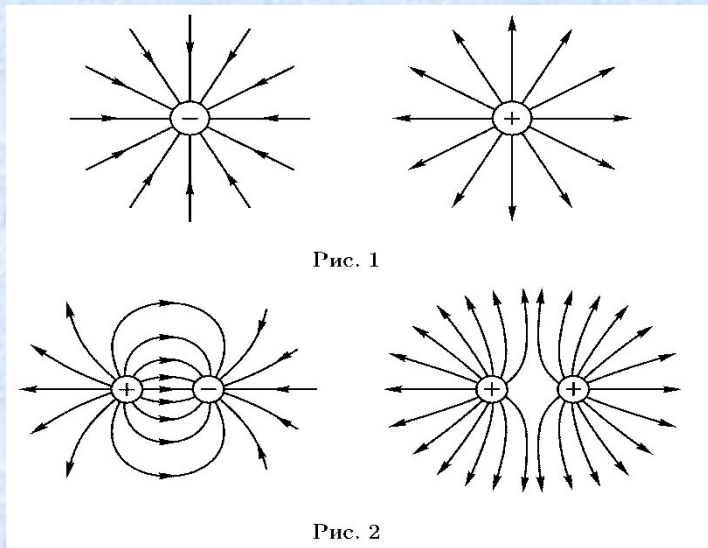
$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n = \sum \vec{E}_i$$



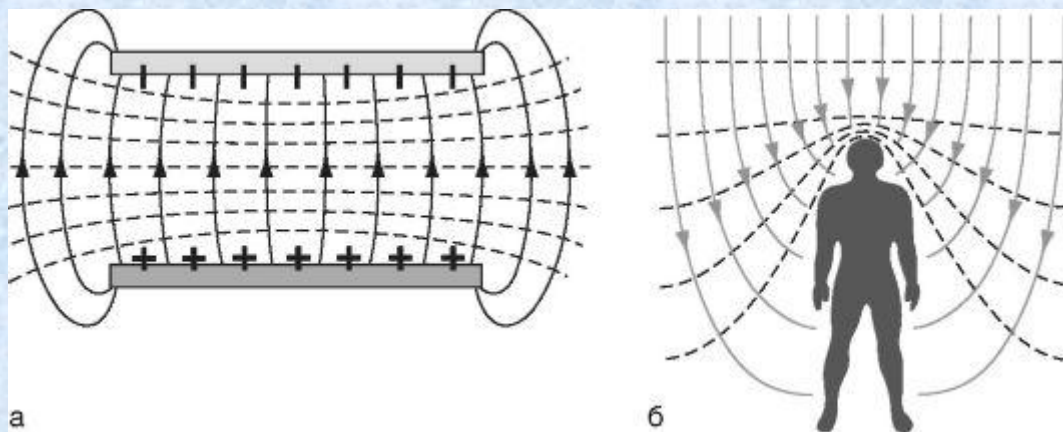
# Силовые линии

Силовая линия есть математическая линия, направление касательной к которой в каждой точке, через которую она проходит, совпадает с направлением вектора  $\vec{E}$  в той же точке.

## Примеры:



Электрические поля точечных зарядов



Электрическое поле двух пластин (а); электрическое поле Земли вблизи стоящего человека (б).

# Потенциал

Энергетическая характеристика электрического поля –  
**Потенциал  $\varphi$ .**

**Потенциал  $\varphi$**  – физическая величина, равная отношению потенциальной энергии  $W_p$  электрического заряда в электрическом поле к заряду  $q$ :

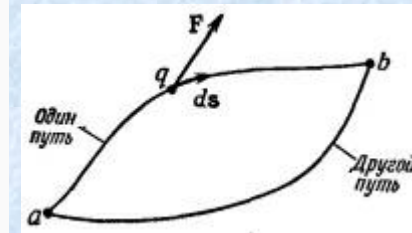
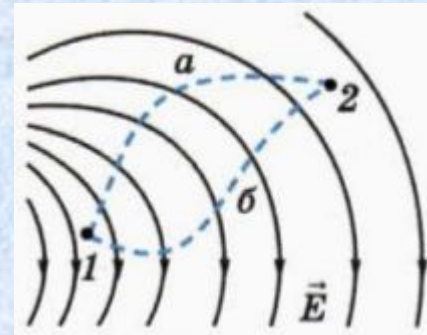
$$\varphi = \frac{W_p}{q} \text{ В}$$

*Потенциал  $\varphi$  численно равен работе  $A$ , которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при удалении его из данной точки на бесконечность.*

# Разность потенциалов

Разность потенциалов  $\Delta\varphi$  численно равна работе  $A$ , которую совершают силы поля над единичным положительным зарядом при перемещении его из одной точки в другую:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q} \text{ В}$$

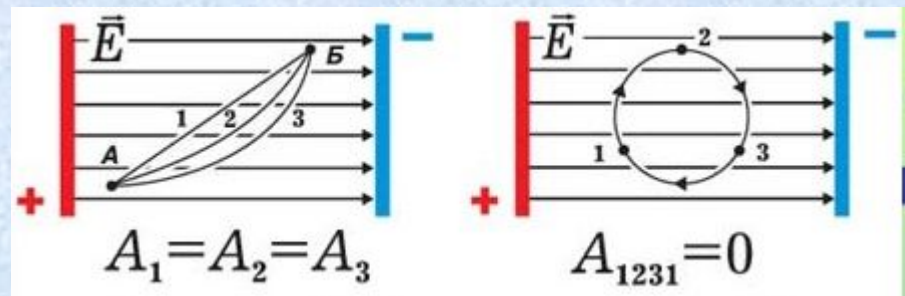


где  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  - потенциалы начальной (1) и конечной (2) точек соответственно;  $\Delta\varphi$  — разность потенциалов.

В однородном поле:

$$\Delta\varphi = E \cdot d$$

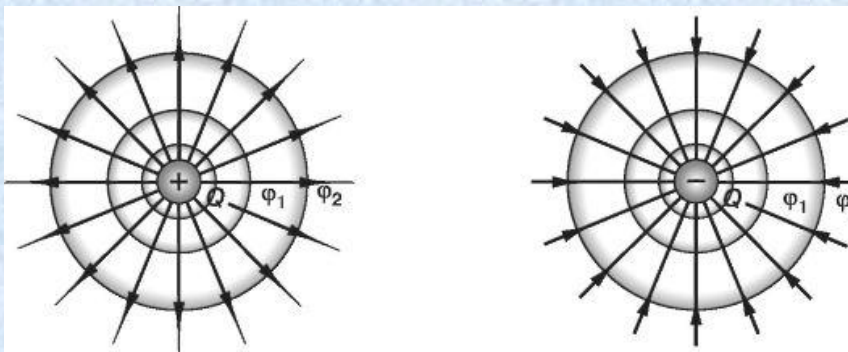
$d$  — расстояние между точками с потенциалами  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ .



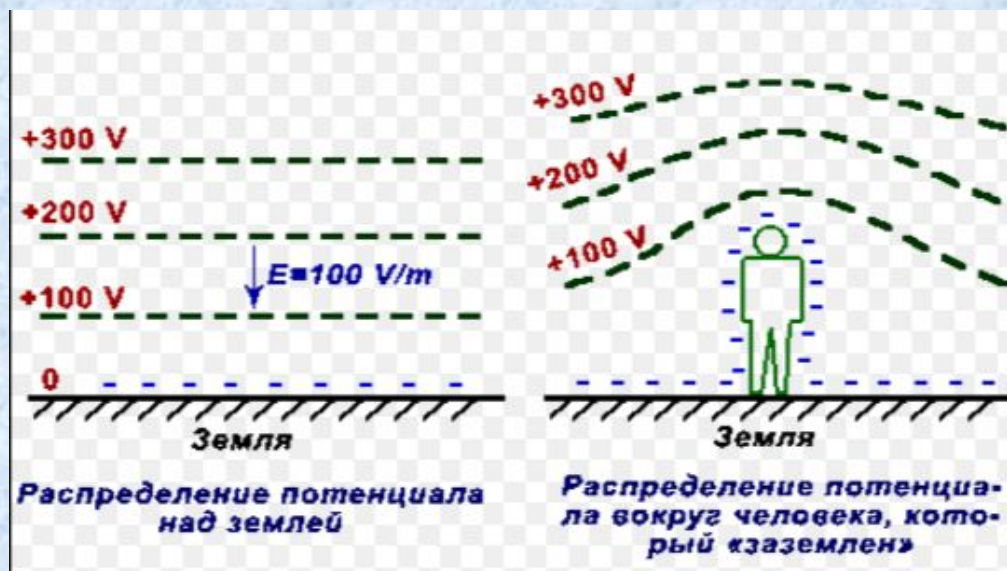
**Работа сил электрического поля не зависит от пути!**

# Эквипотенциальная поверхность

Эквипотенциальная поверхность - поверхность, все точки которой имеют одинаковый потенциал. Силовые линии перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.



Эквипотенциальные поверхности и силовые линии точечных зарядов



# Мембранные потенциалы клетки

На мембране, разделяющей цитоплазму и межклеточную жидкость, существует разность электрических потенциалов, которую называют **мембранным потенциалом**.

Мембранный потенциал покоящейся живой клетки называется **потенциалом покоя клетки**.

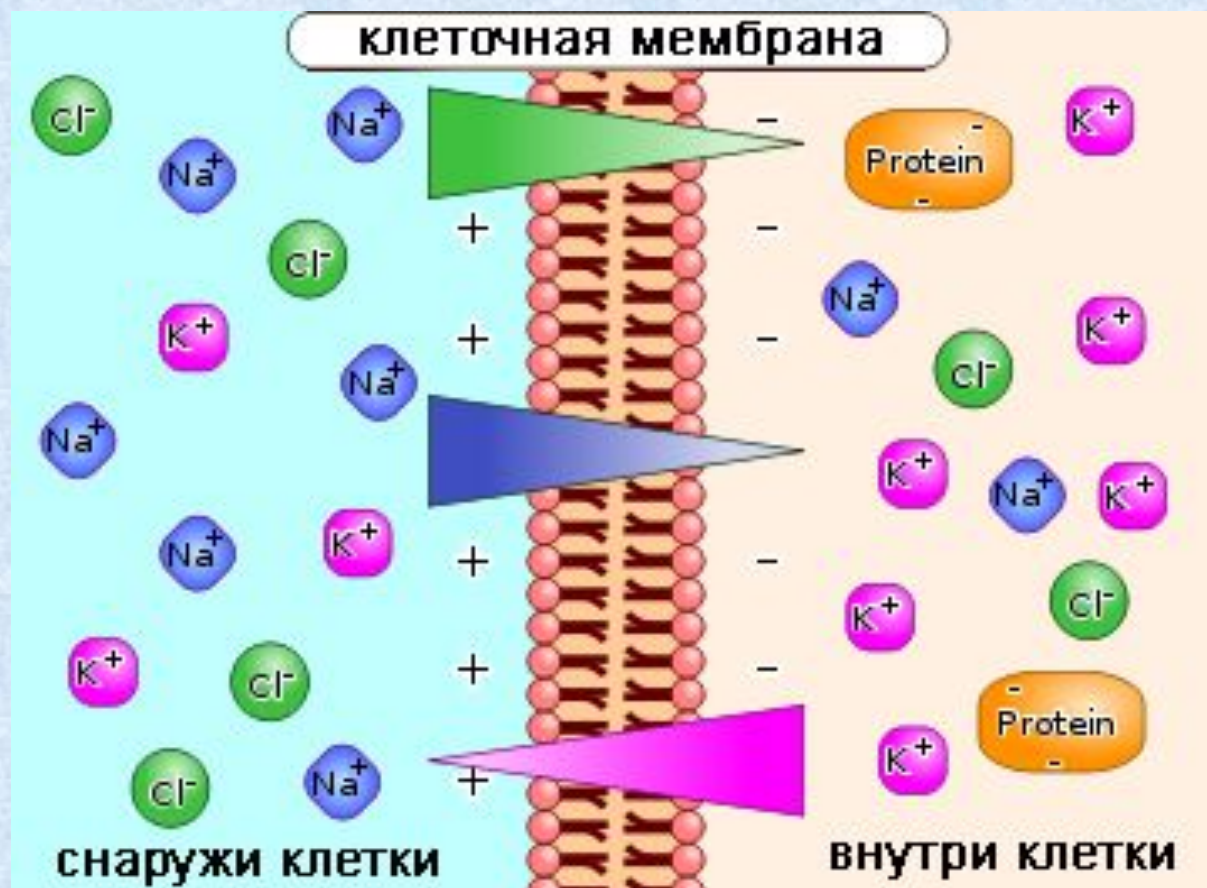
Потенциал внутри клетки относительно межклеточной жидкости составляет в покое от  $-60$  мВ до  $-100$  мВ, в зависимости от вида клетки.

В процессе деятельности клетки мембранный потенциал может изменяться, эти изменения в нервных и рецепторных клетках связаны с переработкой и передачей информации, а в мышечных волокнах – с их сокращением.

# Мембранные потенциалы клетки

Наиболее важными ионами, определяющими мембранные потенциалы клеток, являются  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$ .

*Концентрации этих ионов в цитоплазме (внутри клетки) и межклеточной жидкости различаются в десятки раз.*



# Равновесные потенциалы Нернста

Найдем равновесный мембранный потенциал, возникающий вследствие диффузии ионов одного типа через мембрану, учитывая, что равновесное состояние достигается при равенстве электрохимических потенциалов по обе стороны мембраны  $\mu_i = \mu_e$  :

Электрохимический потенциал **внутри клетки**:

$$\mu_i = \mu_{0i} + RT \ln C_i + ZF\phi_i,$$

Электрохимический потенциал **вне клетки**:

$$\mu_e = \mu_{0e} + RT \ln C_e + ZF\phi_e$$

где  $\mu_{0i}$ ,  $\mu_{0e}$  – стандартный химический потенциал, зависящий от растворителя внутри и вне клетки;

$R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – температура;

$C_i$ ,  $C_e$  – концентрация ионов внутри и вне клетки;

$Z$  – валентность иона;  $F$  – постоянная Фарадея;

$\phi_i$ ,  $\phi_e$  – электрический потенциал внутри и вне клетки.



# Равновесные потенциалы Нернста

Так как с обеих сторон мембраны ионы находятся в одном растворителе — воде, то  $\mu_{0i} = \mu_{0e}$  и условие термодинамического равновесия принимает вид:

$$RT \ln C_i + ZF\varphi_i = RT \ln C_e + ZF\varphi_e$$

или

$$ZF(\varphi_i - \varphi_e) = RT(\ln C_i - \ln C_e)$$

Отсюда получаем **уравнение Нернста для равновесного мембранного потенциала:**

$$\varphi_i - \varphi_e = \frac{RT}{ZF} \ln \frac{C_i}{C_e}$$

**R** — универсальная газовая постоянная; **T** — температура;  
**C<sub>i</sub>**, **C<sub>e</sub>** — концентрация ионов внутри и вне клетки;  
**Z** — валентность иона; **F** — постоянная Фарадея;

# Равновесные потенциалы Нернста и потенциалы покоя в различных тканях

Клетка	Ионы	Межклеточная жидкость, мМ/л	Цитоплазма, мМ/л	Потенциал Нернста, <i>mV</i>	Потенциал покоя, $\varphi_0$ , <i>mV</i>
Мышцы млекопитающих	Na <sup>+</sup>	142	12	+ 64	-90
	K <sup>+</sup>	4	140	-92	
	Cl <sup>-</sup>	120	4	-89	
Мышцы лягушки	Na <sup>+</sup>	120	9,2	+ 67	-90
	K <sup>+</sup>	2,5	140	-105	
	Cl <sup>-</sup>	120	3,5	-92	
Аксон кальмара	Na <sup>+</sup>	460	50	+ 58	-70
	K <sup>+</sup>	10	400	-96	
	Cl <sup>-</sup>	540	40	-68	

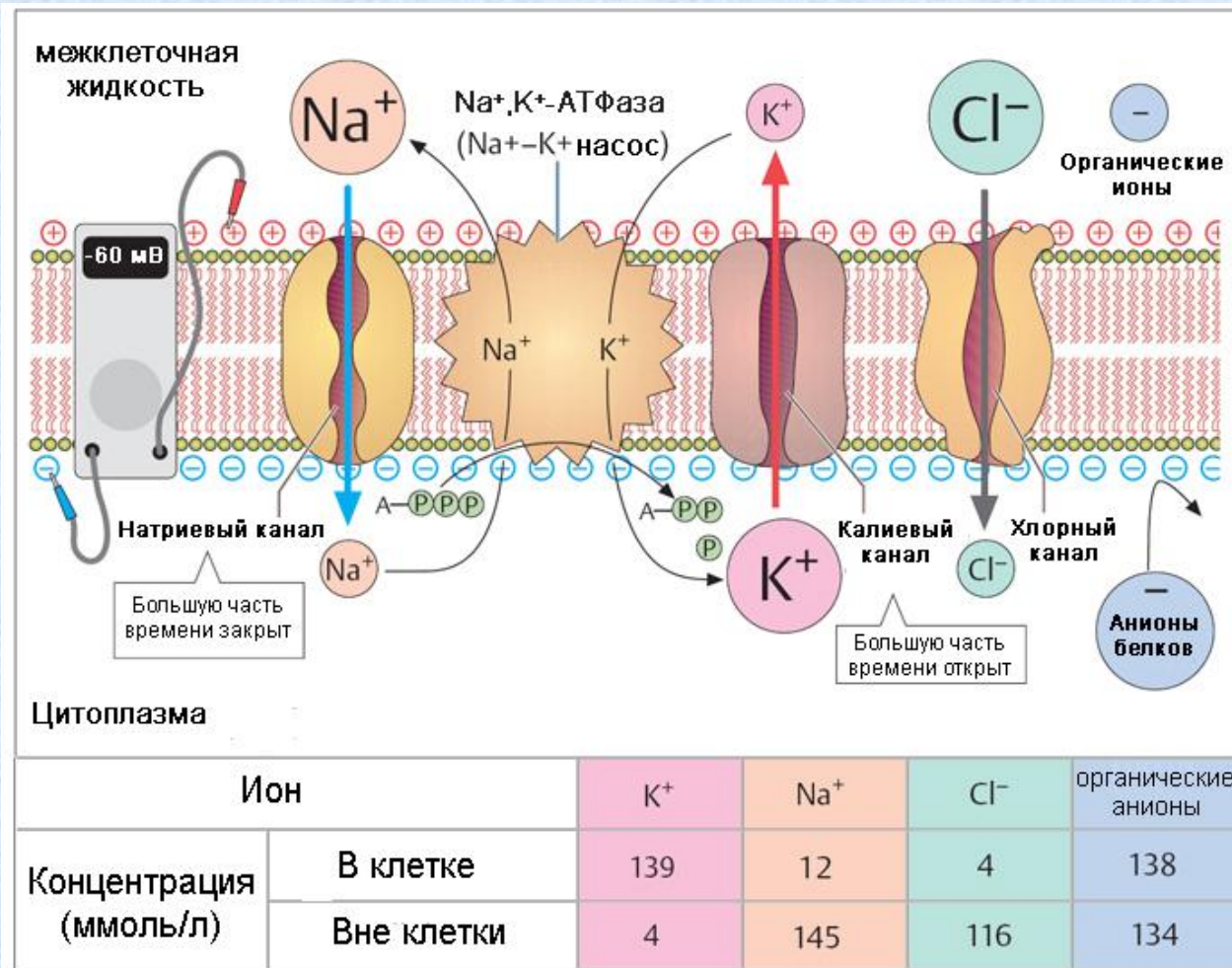
**Напряженность электрического поля в клеточной мембране:**

$$E = \frac{\varphi_0}{d} \approx \frac{80 \text{ мВ}}{8 \text{ нм}} = \frac{8 \cdot 10^{-2} \text{ В}}{8 \cdot 10^{-9} \text{ м}} = 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 10^5 \frac{\text{В}}{\text{см}}$$

# Потенциал покоя

$$\varphi_{\text{м}} = -\frac{RT}{F} \ln \frac{P_{\text{K}} C_i(\text{K}^+) + P_{\text{Na}} C_i(\text{Na}^+) + P_{\text{Cl}} C_e(\text{Cl}^-)}{P_{\text{K}} C_e(\text{K}^+) + P_{\text{Na}} C_e(\text{Na}^+) + P_{\text{Cl}} C_i(\text{Cl}^-)}$$

где  $P_{\text{K}}$ ,  $P_{\text{Na}}$ ,  $P_{\text{Cl}}$  — проницаемость мембраны для соответствующих ионов (1; 0,04; 0,45).



# Потенциал действия

Все клетки возбудимых тканей (нервная и мышечная) при действии раздражителей достаточной силы способны переходить в состояние возбуждения.

Действие раздражителя в конечном итоге приводит к изменению мембранного потенциала клетки на некоторую величину  $U$ , зависящую от силы раздражителя, в результате чего **потенциал на мембране изменяется и становится равным:**

$$\varphi_M = \varphi_0 + U$$

где  $\varphi_0$  – потенциал покоя клетки.

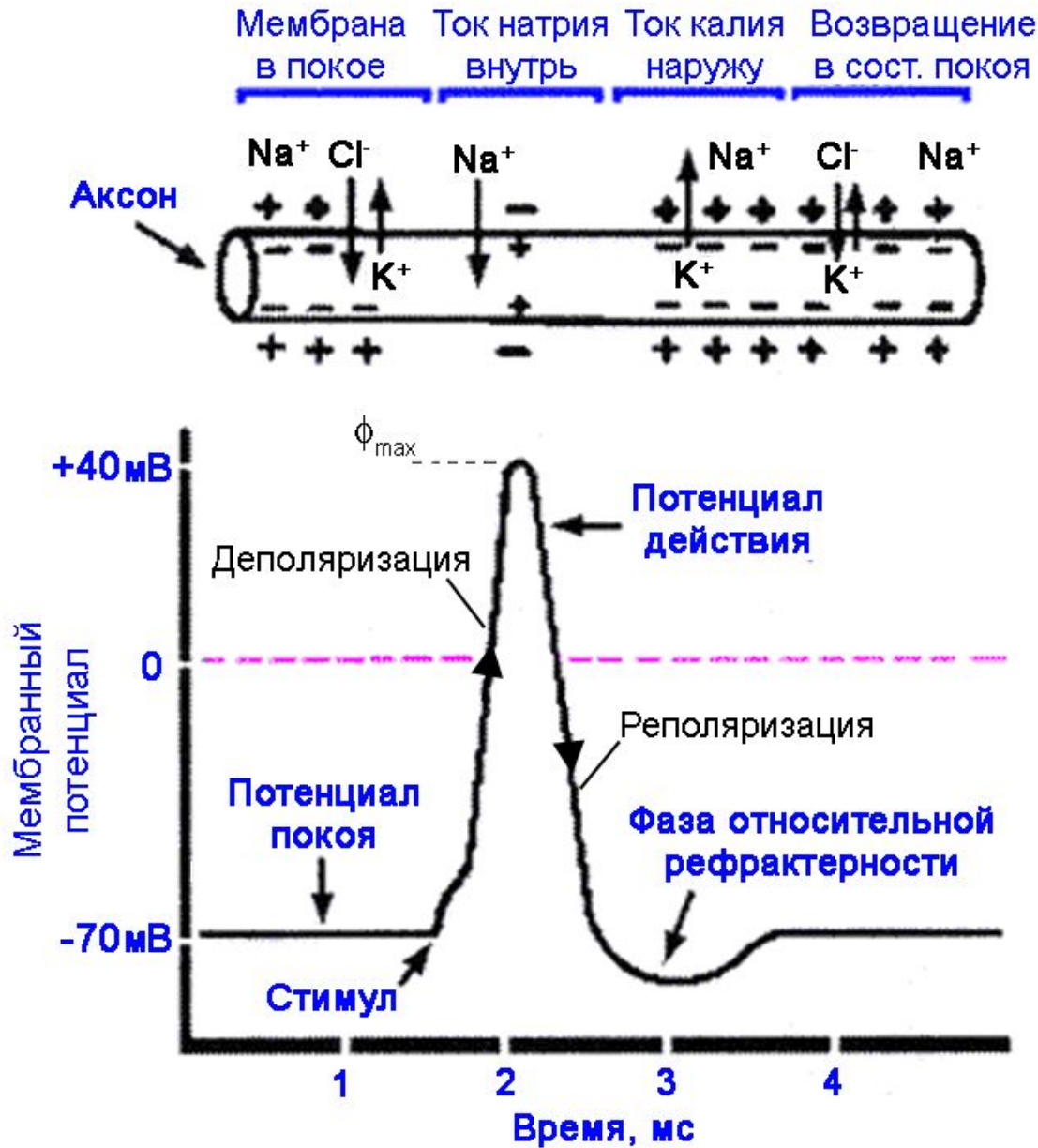
Если  $U > 0$  – Деполяризация;    Если  $U < 0$  - Гиперполяризация

**Изменение во времени мембранного потенциала клетки, происходящее при ее возбуждении, называется *потенциалом действия*.**

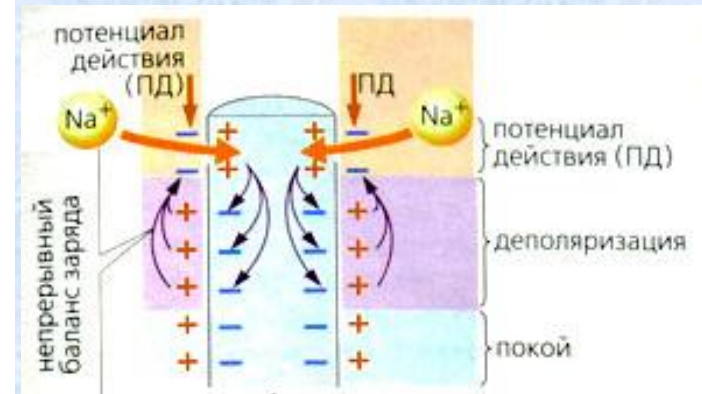
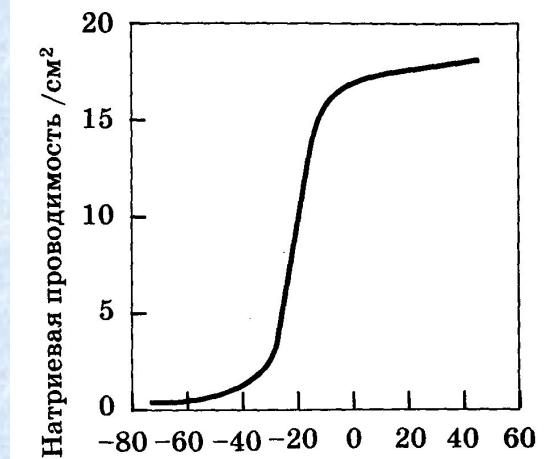
*Возбуждение клетки происходит только при деполяризации при*

$$\varphi_M > E_{кр} \text{ (критический потенциал)}$$

# Потенциал действия



- 1) При  $\phi_m > E_{кр}$  открываются натриевые каналы (ток Na<sup>+</sup> внутрь клетки),  $\phi_m$  растет - *деполяризация*;
- 2) При  $\phi_m = \phi_{max}$  натриевые каналы закрываются, а проводимость калиевых каналов увеличивается (ток K<sup>+</sup> наружу)  $\phi_m$  уменьшается - *реполяризация*;



# Электрография

Живые ткани являются источником электрических потенциалов (биопотенциалов).

Регистрация биопотенциалов тканей и органов с диагностической (исследовательской) целью получила название **электрографии**.

## Виды электрографии:

- **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.

## Характеристика биопотенциалов

Биопотенциалы	Интервал частот, Гц	Амплитуда, мкВ	
		максимальная	минимальная
ЭКГ	0,2–120	1500–2000	100–300
ЭМГ	3–600	1000–1500	30–40
ЭЭГ	1–300	200–300	5–10

# Электрокардиография

При синхронном возбуждении множества волокон сердечной мышцы в среде, окружающей сердце, течет ток, который даже на поверхности тела создает разности потенциалов порядка нескольких мВ. Эта разность потенциалов регистрируется при записи *электрокардиограммы*.

## Теория Эйнтховена:

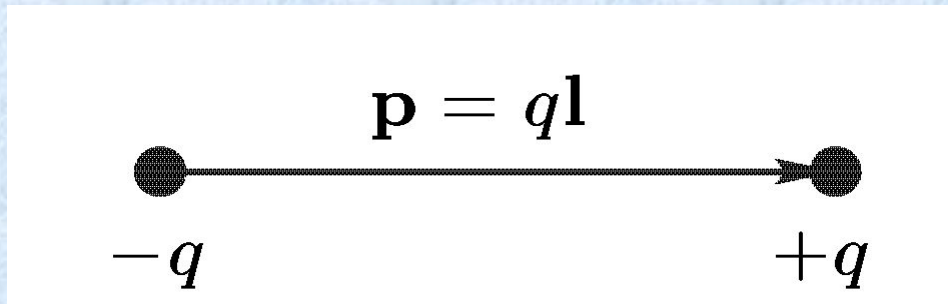
**Сердце есть диполь** с дипольным моментом  $P_C$  который поворачивается, изменяет свое положение и точку приложения (изменением точки приложения этого вектора часто пренебрегают) за время сердечного цикла



*В 1924 г. удостоен Нобелевской премии по физиологии и медицине за изобретение электрокардиографа и расшифровку электрокардиограмм.*

# Электрический диполь

Электрическим диполем (диполем) называют систему, состоящую из двух равных, но противоположных по знаку точечных электрических зарядов ( $+q$  и  $-q$ ), расположенных на некотором расстоянии  $l$  друг от друга (плечо диполя).



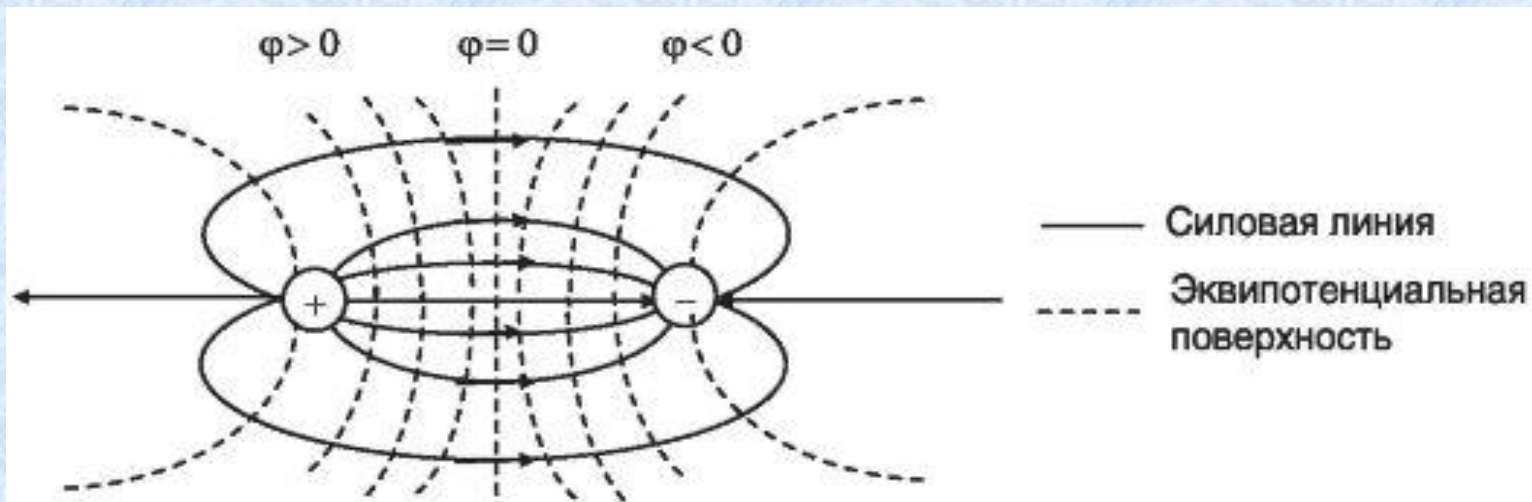
**Электрический дипольный момент:**

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

Единицей электрического момента диполя является кулон-метр [Кл•м].



# Электрическое поле диполя



The diagram shows a dipole with charges  $+q$  and  $-q$  separated by a distance  $l$ . The center of the dipole is labeled  $O$ . A point  $A$  is located at a distance  $r$  from  $O$ . The distance from  $A$  to the positive charge is  $r_1$ , and the distance from  $A$  to the negative charge is  $r_2$ . The angle between the dipole axis and the line  $OA$  is  $\delta$ .

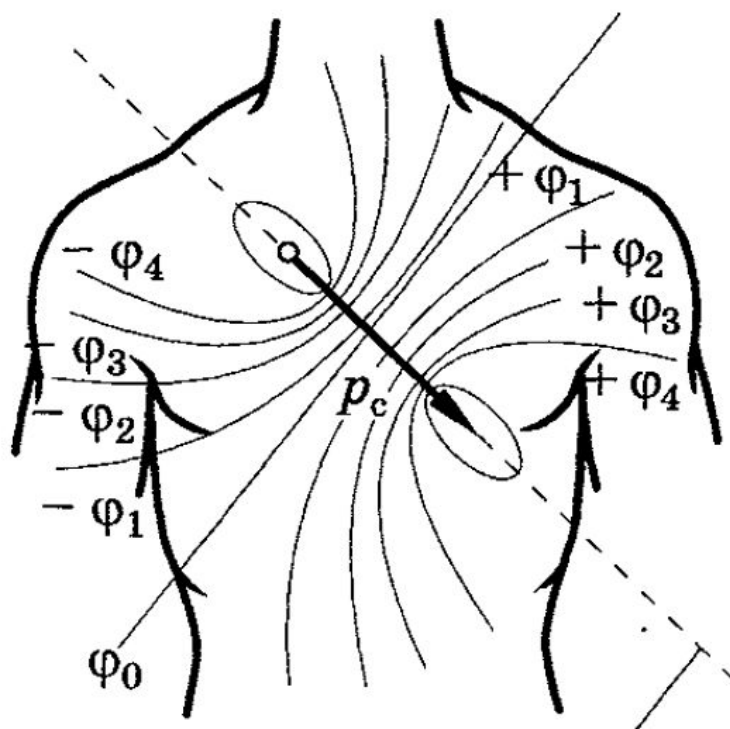
Потенциал диполя  $\varphi$ :

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

# Теория Эйнтховена

**Сердце есть диполь** с дипольным моментом  $p_c$ , который за время сердечного цикла

1. поворачивается,
2. изменяет свое положение,
3. изменяет точку приложения (этим часто пренебрегают).

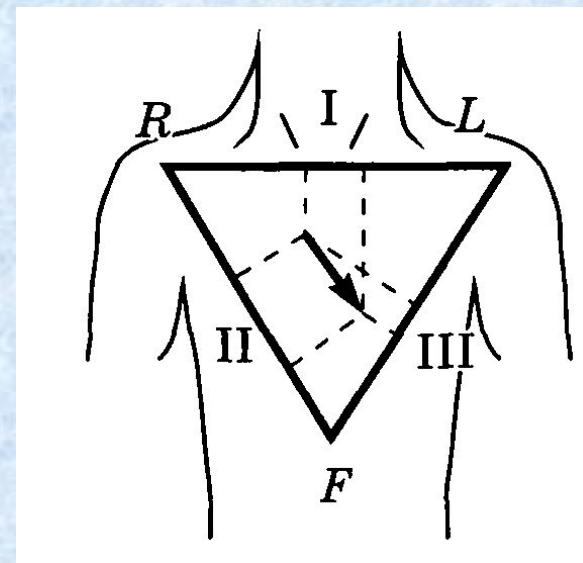
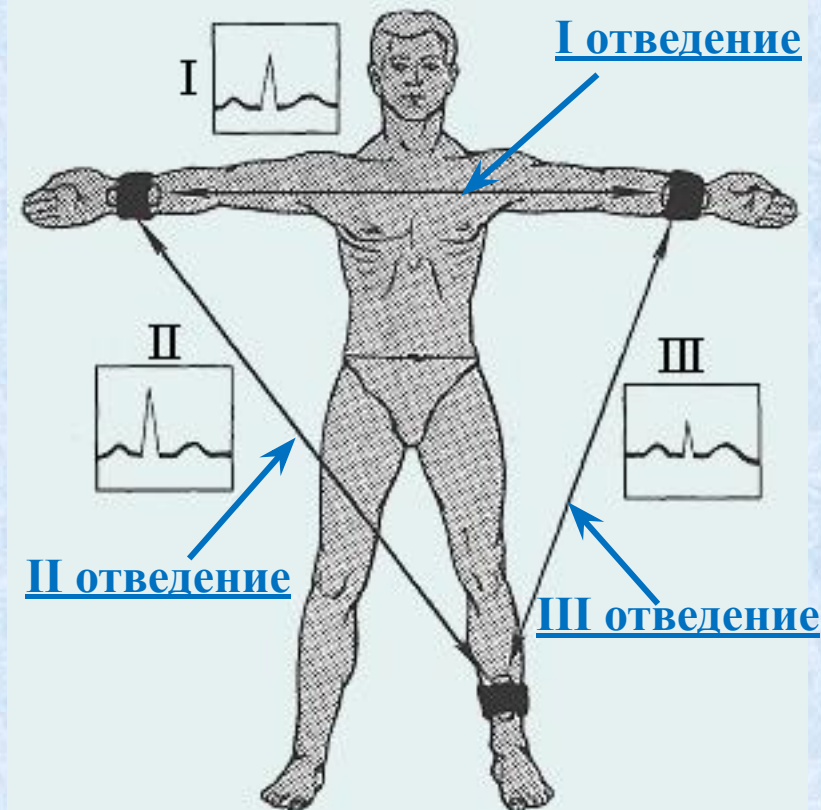


Электрическая  
ось сердца

# Теория отведений Эйнтховена

Разность биопотенциалов  $U$ , регистрируемая между двумя точками тела, называют *отведением*.

В. Эйнтховен предложил снимать разности биопотенциалов  $U$  сердца между вершинами равностороннего треугольника, которые приблизительно расположены в правой руке (ПР), левой руке (ЛР) и левой ноге (ЛН).



Закон Эйнтховена:

$$U_{II} = U_{III} + U_I$$

# Теория отведений Эйнтховена

## Отведение

## Разность потенциалов

**I отведение** (правая рука — левая рука)

**II отведение** (правая рука — левая нога)

**III отведение** (левая рука — левая нога)

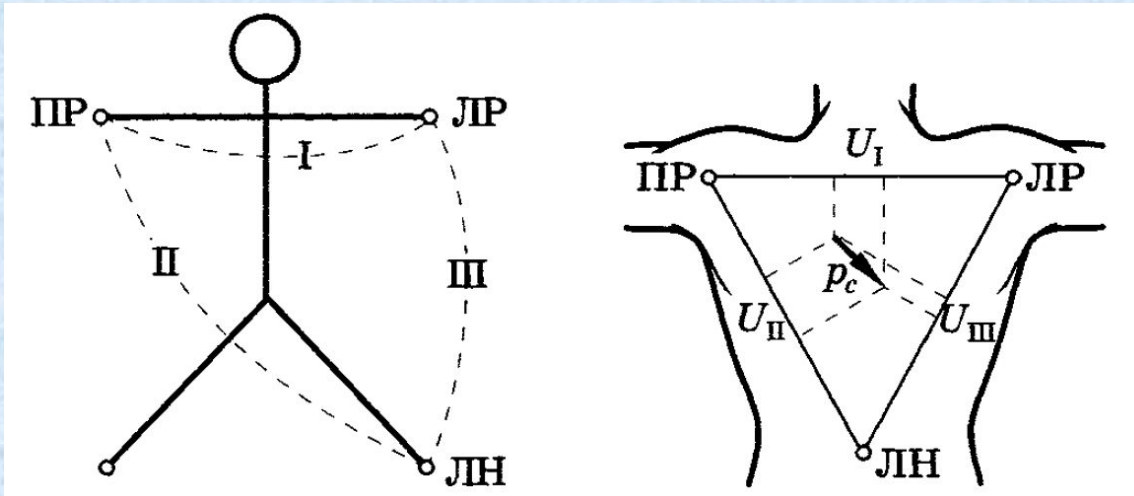
$U_I$

$U_{II}$

$U_{III}$

Отведения позволяют определить соотношение между проекциями электрического момента сердца на стороны треугольника по формуле:

$$U_I : U_{II} : U_{III} = P_{CI} : P_{CII} : P_{CIII}$$



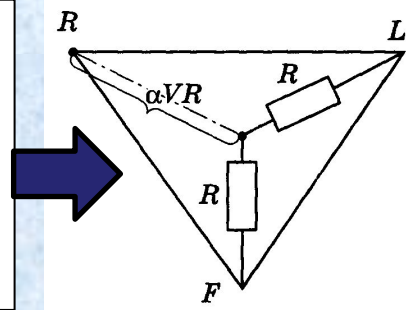
**Закон Эйнтховена:**

$$U_{II} = U_{III} + U_I$$

# Регистрация ЭКГ на практике

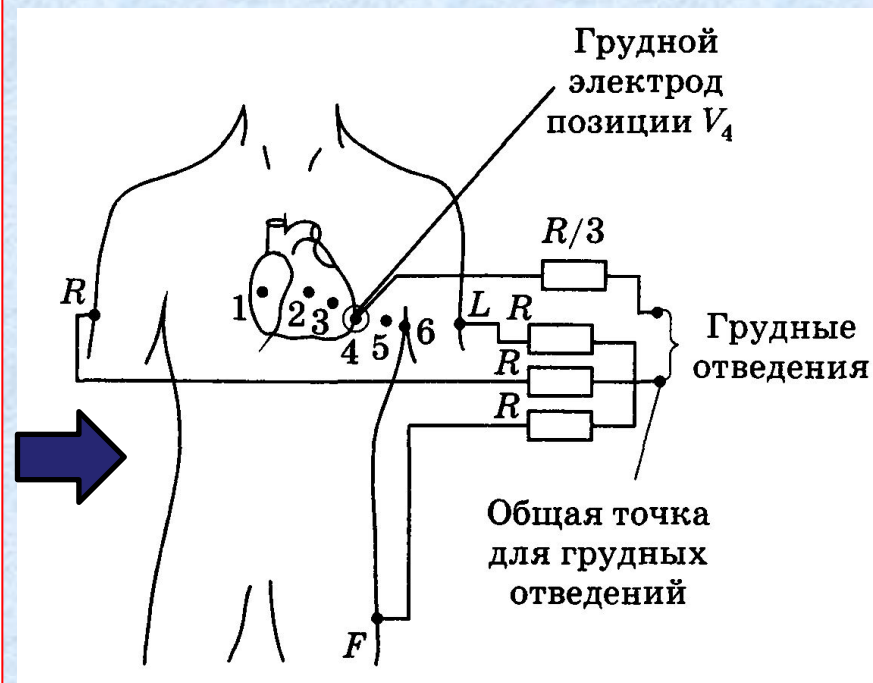
На практике, кроме трех стандартных отведений, регистрируют еще девять отведений: три усиленных униполярных и шесть грудных.

В униполярных усиленных отведениях, обозначаемых как  $\alpha VR$ ,  $\alpha VL$  и  $\alpha VF$ , регистрируют разность потенциалов между одной из вершин треугольника Эйнтховена (R, L или F) и усредненным потенциалом двух других его вершин, для чего последние соединяют между собой равными сопротивлениями  $R$ .



**Три стандартных и три усиленных отведения** определяют поведение электрического вектора сердца лишь в плоскости треугольника Эйнтховена и **не дают информации о проекциях этого вектора на направление, перпендикулярное плоскости**

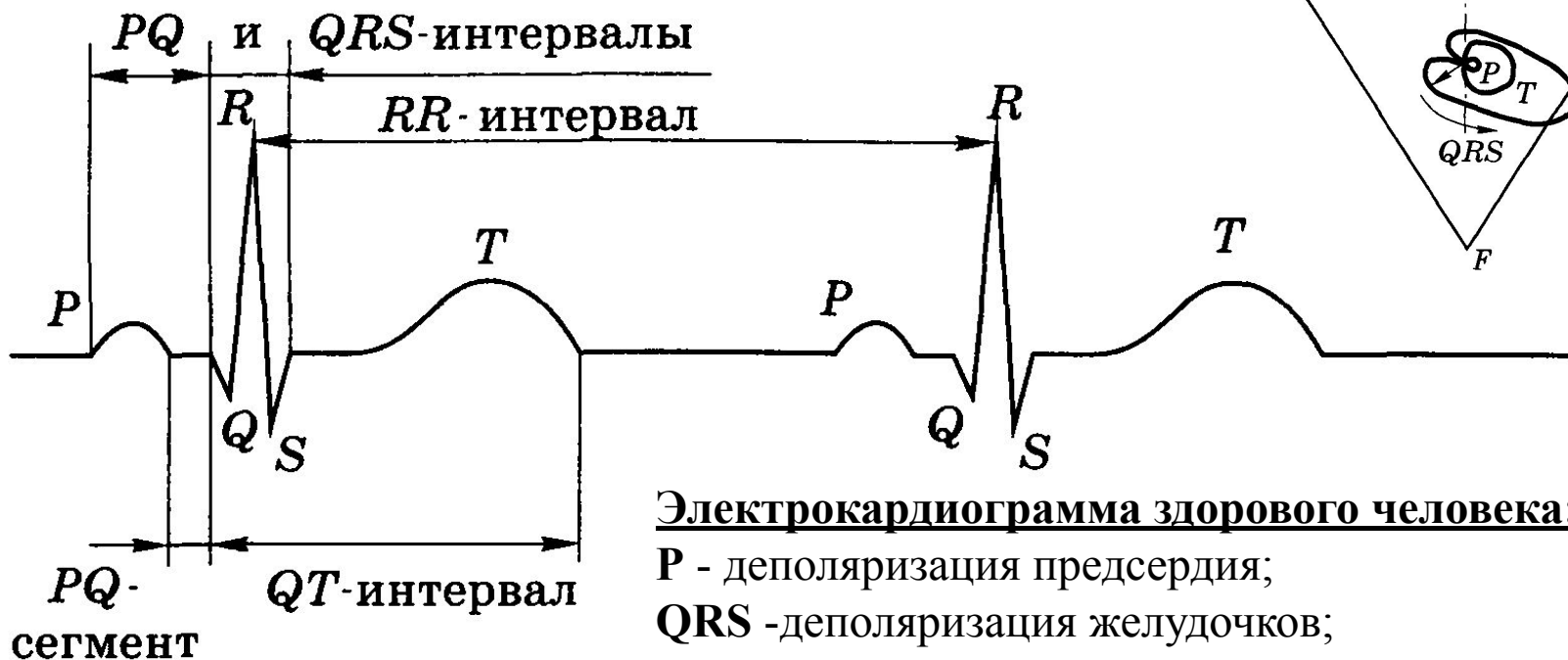
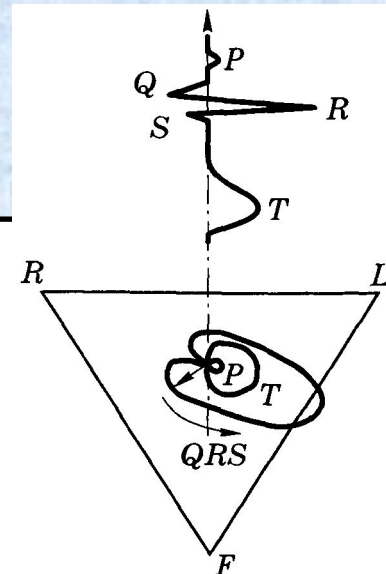
Чтобы получить полное представление об электрическом поле сердца, регистрируют еще **шесть грудных отведений** ( $V_1 - V_6$ ). Они представляют собой разность потенциалов между общей точкой треугольника и одной из шести точек на грудной клетке пациента.



# Электрокардиограмма

Электрокардиограмма представляет собой график изменения во времени разности потенциалов, снимаемой двумя электродами соответствующего отведения за цикл работы сердца.

Интервал ЭКГ	<i>PQ</i>	<i>QRS</i>	<i>QT</i>	<i>RR</i>
Длительность, с	< 0,2	< 0,12	0,3–0,4	0,85



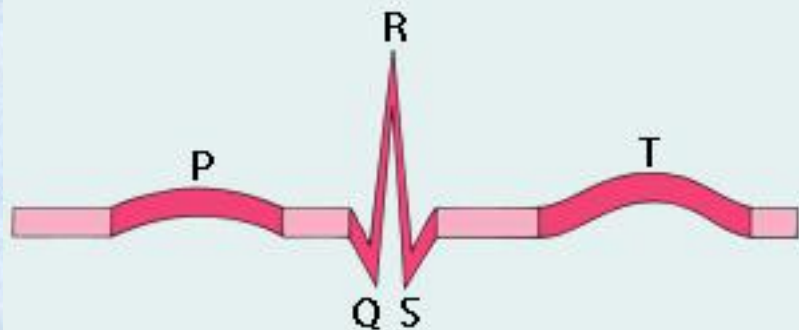
**Электрокардиограмма здорового человека:**

**P** - деполяризация предсердия;

**QRS** - деполяризация желудочков;

**T** - реполяризация

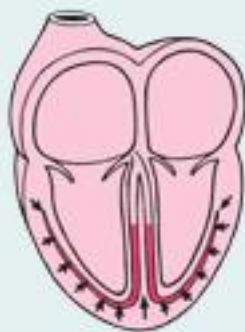
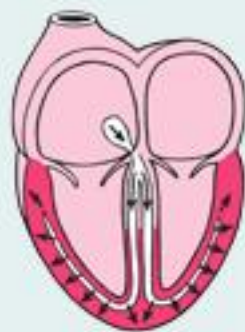
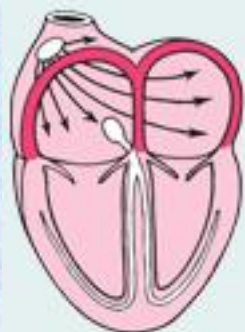
# Электрокардиограмма



P-волна

QRS комплекс

T-волна



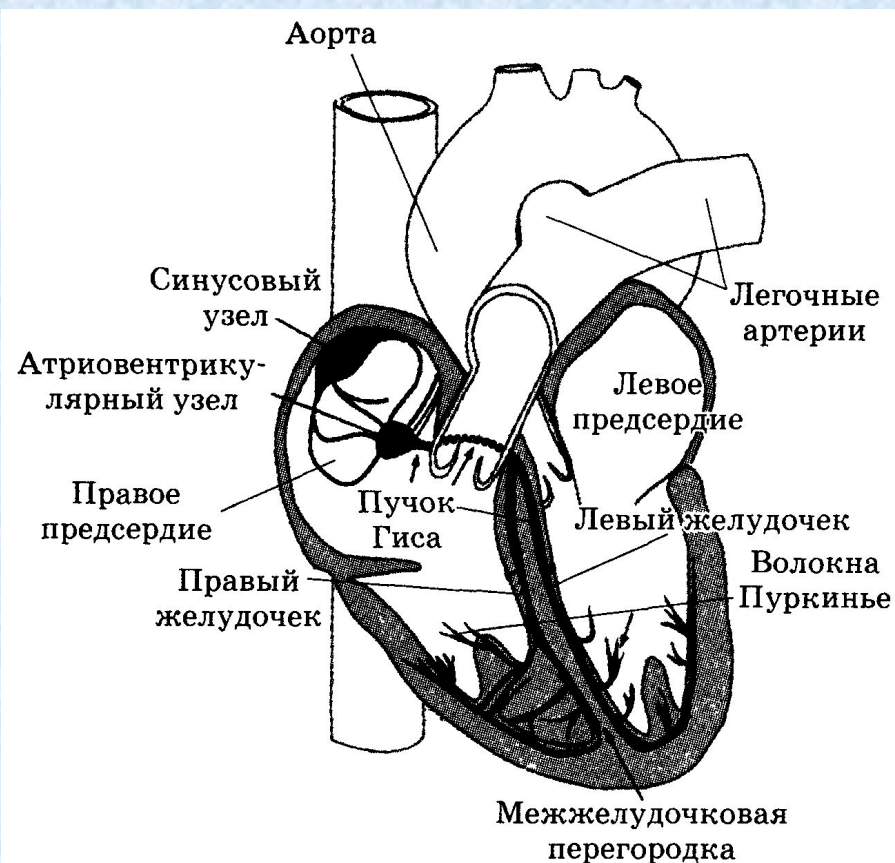
P - деполяризация  
предсердий

QRS - деполяризация  
желудочков

T - реполяризация

## Параметры ЭКГ в норме.

- Длительность зубцов и интервалов в секундах:
  - P = 0,06 – 0,11
  - PQ – 0,12 – 0,20
  - QRS – 0,06 – 0,1
  - T – 0,05 – 0,25
- Амплитуда зубцов в милливольтгах:
  - P – 0,1 – 0,2
  - Q – 0,3
  - R – 1,0 – 2,0
  - S – 0 – 0,06
  - T – 0,2 – 0,6



# Физические факторы, определяющие особенности ЭКГ

**Факторы, определяющие особенности ЭКГ у отдельного человека:**

- 1) положение сердца в грудной клетке,
- 2) положение тела,
- 3) дыхание,
- 4) действие физических раздражителей, в первую очередь физических нагрузок.