

*Частное учреждение образовательная организация  
высшего образования Медицинский университет “Реавиз”*



## ***Лекция***

***2***

***Постоянный и переменный  
электрический ток.  
Электрические свойства  
биологических тканей.***

# План

## ЛЕКЦИИ:

- 1. Понятие электромагнитного поля.**
- 2. Электрический диполь и его поле.**
- 3. Постоянный электрический ток.  
Характеристики электрического тока.**
- 4. Переменный электрический ток. Закон Ома для полной цепи. Импеданс тканей организма.**
- 5. Электроодонтодиагностика**

1

*Электромагнитное поле – особая форма материи*

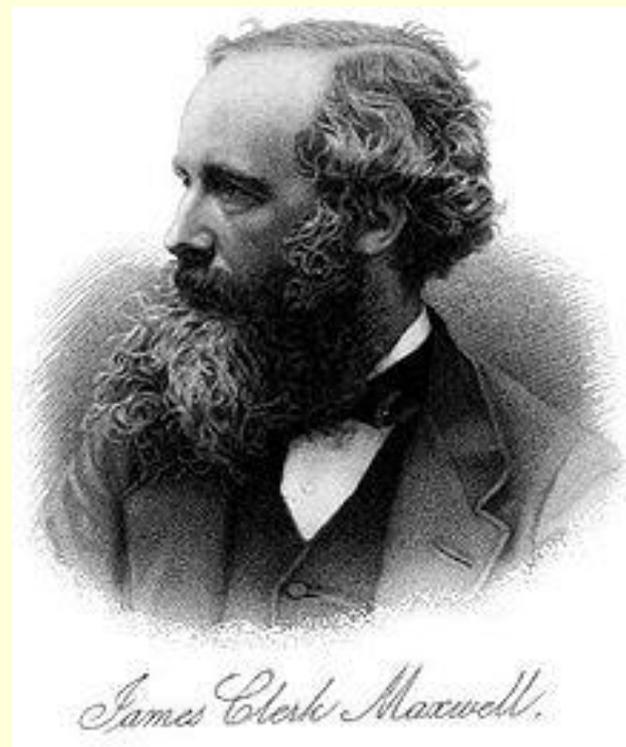
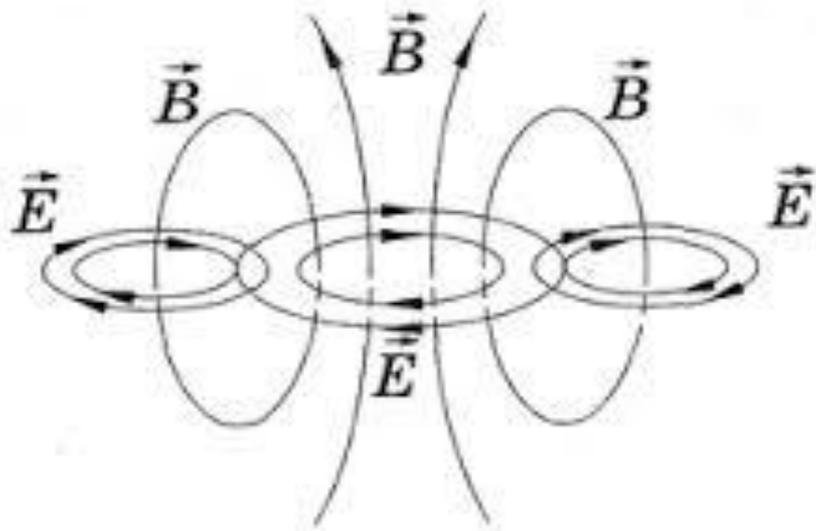
## **Направления медико-биологических приложений электромагнитных полей**

- 1. Понимание электрических процессов, происходящих в организмах**
- 2. Выяснение механизмов воздействия электромагнитных полей на организмы.**
- 3. Приборное аппаратное направление, связанное с созданием медицинской аппаратурой.**

# Уравнения Максвелла

*Электромагнитное поле представляет собой совокупность порождающих друг друга электрических и магнитных полей.*

**В 1873 г. Джеймс Клерк Максвелл теоретическим путем вывел уравнения, описывающие электромагнитные поля в материальных средах**



**$E$**  – напряженность электрического поля.  **$D = \epsilon\epsilon_0 E$**  – вектор электрической индукции  
 **$B$**  – вектор магнитной индукции.  **$B = \mu\mu_0 H$** ,  **$H$**  – напряженность магнитного поля

# Уравнения Максвелла

**Электростатика**

**Магнитостатика**

## **Электродинамика**

*Эл. токи в различных  
средах*

### **Электромагнитное поле**

*Радиоволны*

*СВЧ – излучение*

*Микроволновое излучение*

*ИК, УФ - излучение*

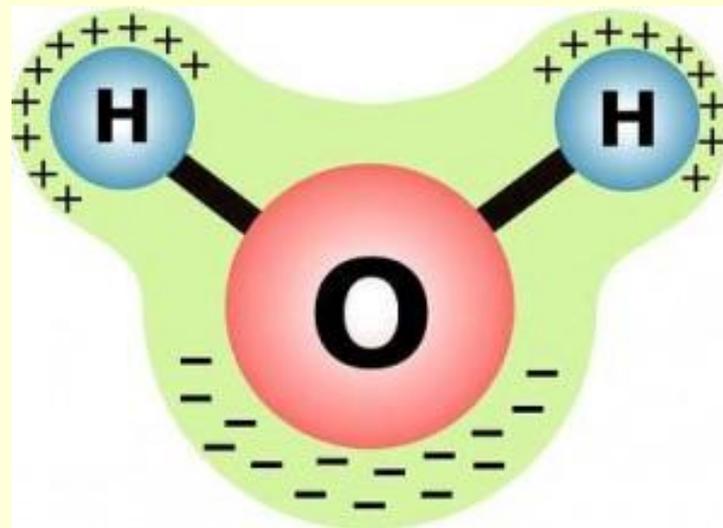
*Видимое излучение (свет)*

*Рентгеновское излучение*

## 2

# Электрический диполь и его поле.

Для описания электрических полей в диэлектриках и полупроводниках а также изучения молекул существует понятие электрического диполя



**Электрическим диполем** называют систему, состоящую из двух равных, но противоположных по знаку точечных электрических зарядов, расположенных на некотором расстоянии друг от друга.

$$p = ql$$

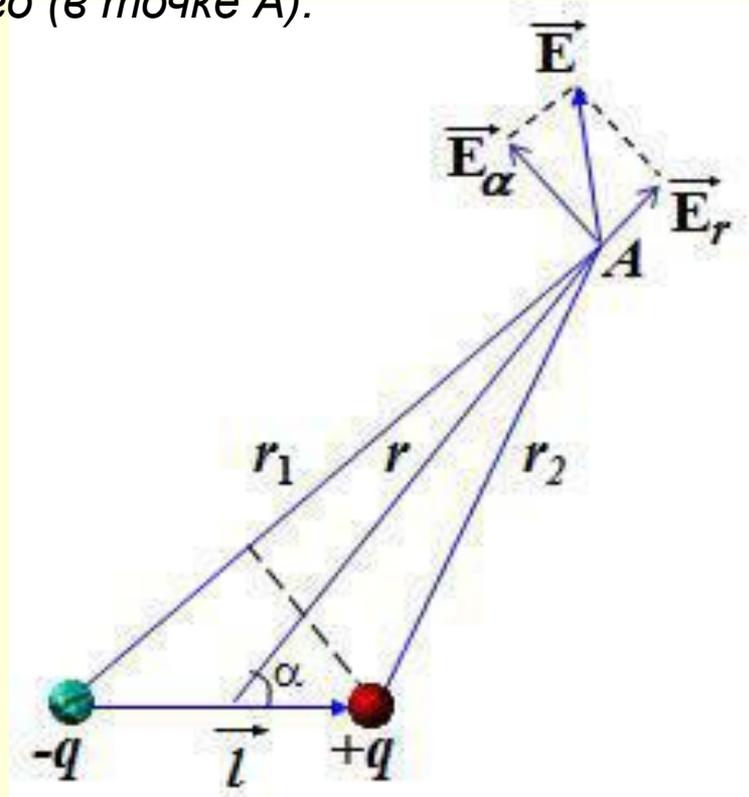
(4.11)

# Потенциал электрического диполя

Рассмотрим произвольный электрический диполь, и рассчитаем его потенциал на значительном расстоянии от него (в точке A).

$$\begin{aligned}\varphi_A &= \varphi_+ + \varphi_- = k \frac{q}{\varepsilon r_1} - k \frac{q}{\varepsilon r_2} = \\ &= k \frac{q}{\varepsilon} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = k \frac{q}{\varepsilon} \left( \frac{r_2 - r_1}{r_1 r_2} \right) = \\ &= k \frac{q}{\varepsilon} \left( \frac{r_2 - r_1}{r^2} \right) \quad r_1 r_2 \approx r^2\end{aligned}$$

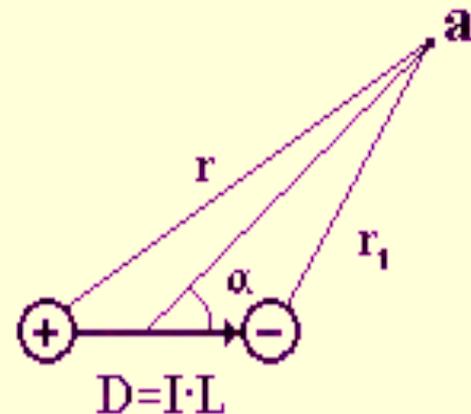
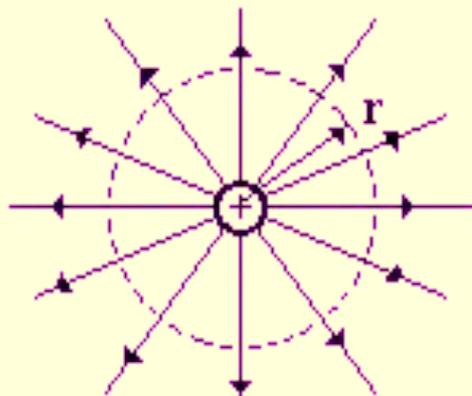
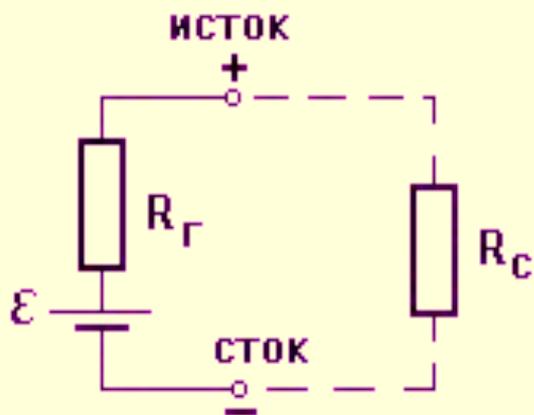
$$\varphi_A = k \frac{ql \cos \alpha}{\varepsilon r^2} = k \frac{p \cos \alpha}{\varepsilon r^2}$$



$$(r_2 - r_1) \approx l \cos \alpha$$

**(4.2)**

Рассмотренный диполь хорошо описывает электрическое поле в непроводящих средах, в диэлектриках, где нет свободных зарядов и нет токов проводимости. Однако многие биоткани – кровь, лимфа, спинномозговая жидкость, мышцы, нервная ткань и др. – являются хорошими проводниками и в них под действием полей возникают электрические токи.



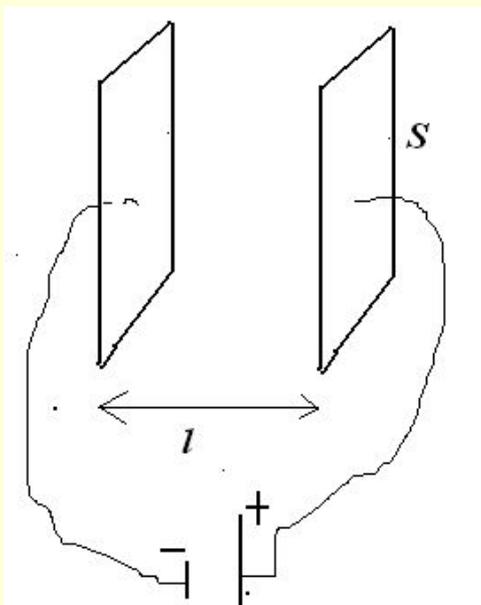
$$\varphi_A = \rho \frac{D \cos \alpha}{4\pi r^2} \approx \frac{D \cos \alpha}{r^2}$$

**Токовый диполь**  
**(4.3)**

Поэтому, в проводящей среде, разность потенциалов между точками **A** и **B** можно записать :

$$U_{AB} \approx \frac{D \cos \alpha}{r^2} \quad (4.4)$$

# Подобие электрического и токового диполей



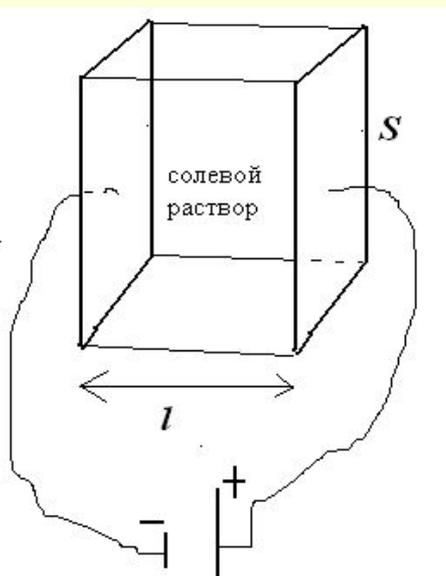
*Конденсатор, между пластинами диэлектрик или вакуум.*

$$C = \rho \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l}$$

*Между пластинами проводящая среда.*

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{S} \quad G = \frac{1}{R} = \gamma \frac{S}{l}$$

**Формулы для  $C$  и  $G$  подобны**



## Диэлектрик

- *Линии электростатического поля*

- *Ёмкость*

$$C = \rho \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{l}$$

- *Заряд* **q**

- *Дипольный момент*  $P = q * l$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \frac{P \cos \alpha}{\varepsilon r^2}$$

## Проводящая среда

- *Линии тока*

- *Электропроводность*

$$G = \frac{1}{R} = \gamma \frac{S}{l}$$

- *Ток* **I**

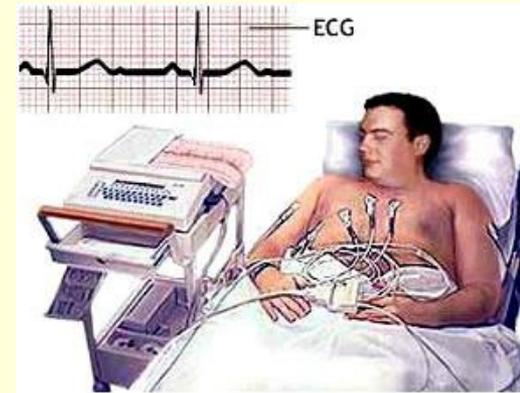
- *Дипольный момент* *т.*  
*диполя*  $P_T = I * l$

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\gamma} \frac{P_T \cos \alpha}{r^2}$$

*Живые ткани организма являются источником биопотенциалов. Регистрация биопотенциалов называется **электрографией**.*

## - **Электрокардиография**

*(запись биопотенциалов сердца )*



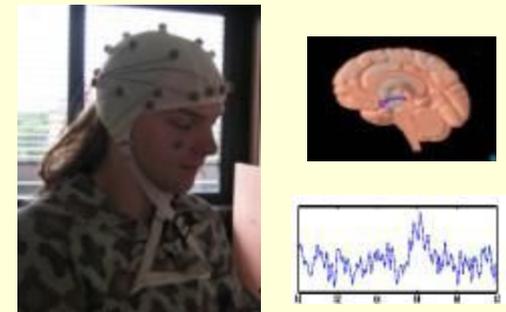
## - **Электромиография**

*(запись электрической активности мышц)*



## - **Электроэнцефалография**

*(запись биопотенциалов мозга)*



*Поскольку биоткани и органы в целом электрически нейтральны, то создаваемое ими электрическое поле можно рассматривать как электрическое поле, образуемое некоторым **токовым диполем**.*

3

## Постоянный электрический ток. Характеристики электрического тока.

**Электрическим током** называют **упорядоченное движение заряженных** частиц.

### **Электрический ток**

- **в металлах** - упорядоченное движение электронов
- **в полупроводниках** - упорядоченное движение электронов или дырок
- **в жидкостях** - упорядоченное движение ионов
- **в газах** - упорядоченное движение ионов и электронов

Для возникновения постоянного тока в некоторой среде необходимы два условия:

- 1) Наличие свободных заряженных частиц
- 2) Наличие электрического поля, вызывающего направленное движение этих зарядов.

Выделим некоторый объем проводника.

**S** – площадь поперечного сечения

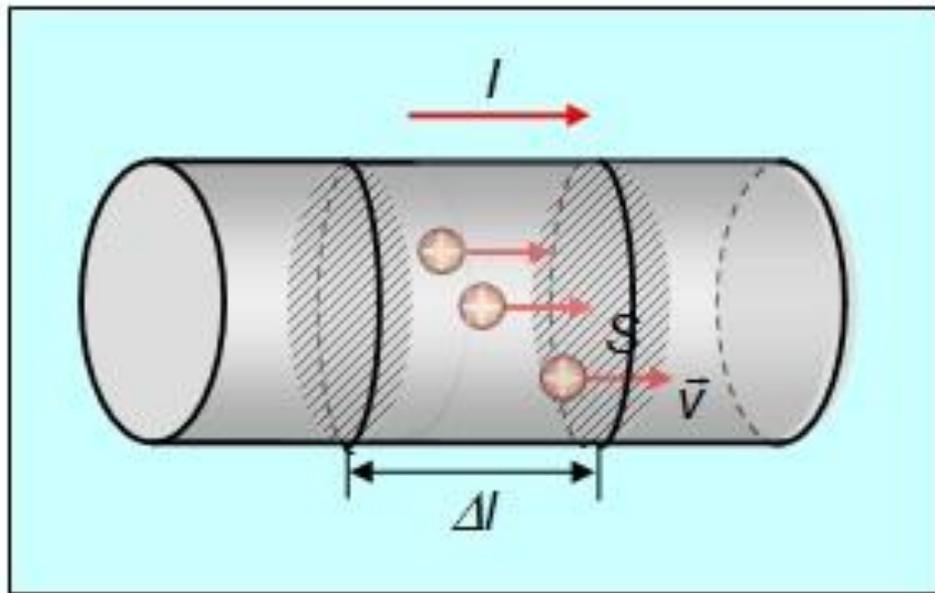
**v** – скорость частиц

$\Delta l$  – длина выделенного участка

**n** - концентрация частиц

*Определение.*

**Сила тока** – это отношение заряда  $\Delta q$ , прошедшего через рассматриваемую поверхность **S** ко времени  $\Delta t$  прохождения.



$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}$$

(4.5)

$$j = \frac{I}{S}$$

$$i = \int_S j ds$$
 - Сила тока через произвольное сечение проводника

Заряд, который проходит через выделенный цилиндр равен числу заряженных частиц. Отсюда найдем плотность тока

$$j = \frac{I}{S} = \frac{q_e n S v}{S} = q_e n v$$

Итак, для проводника любой природы можно записать

$$j = q_e n v \quad (4.6)$$

# **Электрический ток в электролитах.**

*В растворах электролитов свободные электрические заряды (положительные и отрицательные) возникают в результате электролитической диссоциации, а под действием приложенной внешней разности потенциалов  $U$  происходит направленное движение ионов в растворе – идет электрический ток.*

$$I = I_{+} + I_{-} \text{ - полная сила тока (4.7)}$$

**Биологические жидкости** преимущественно являются электролитами.

Из практики известно, что :

$$I = \frac{U}{R}$$

- закон Ома (4.8)

Если проводник однородный, то

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (4.9)$$

$\rho$  – удельное сопротивление  
 $l$  – длина проводника  
 $S$  – площадь поперечного сечения

Если проводник неоднородный, то используют закон Ома в дифференциальной форме.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l} \quad E = \frac{U}{l} \quad \frac{I}{S} = j$$

получим :

$$j = \frac{E}{\rho} \quad \text{обозначим} \quad \gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$\boxed{j = \gamma E}$$

- **Закон Ома** в дифференциальной и векторной форме **(4.10)**

$\gamma$  – *проводимость*  
(удельная электропроводимость)

$$[\gamma] = \text{Ом}^{-1} * \text{м}^{-1}$$

Скорость упорядоченного движения ионов электролита пропорциональна напряженности электрического поля, вызывающего это движение:

$$\boxed{v = bE}$$

$b$  – *подвижность ионов*  
зависит от массы иона, его заряда и формы  
**(4.11)**

Подставляя это выражение в формулу для плотности тока, получим:

$$j = q_e n b E$$

соответственно получим, что

$$\boxed{\gamma = q_e n b} \quad \text{(4.12)}$$

*Поскольку в электролите имеется движение ионов двух типов , то полная удельная электропроводимость будет складываться из проводимостей:*

$$\gamma = q_+ n_+ b_+ + q_- n_- b_- \quad (4.13)$$

*Учитывая коэффициент диссоциации  $\alpha$  , получим*

$$\gamma = \alpha q_e n (b_+ + b_-) \quad (4.14)$$

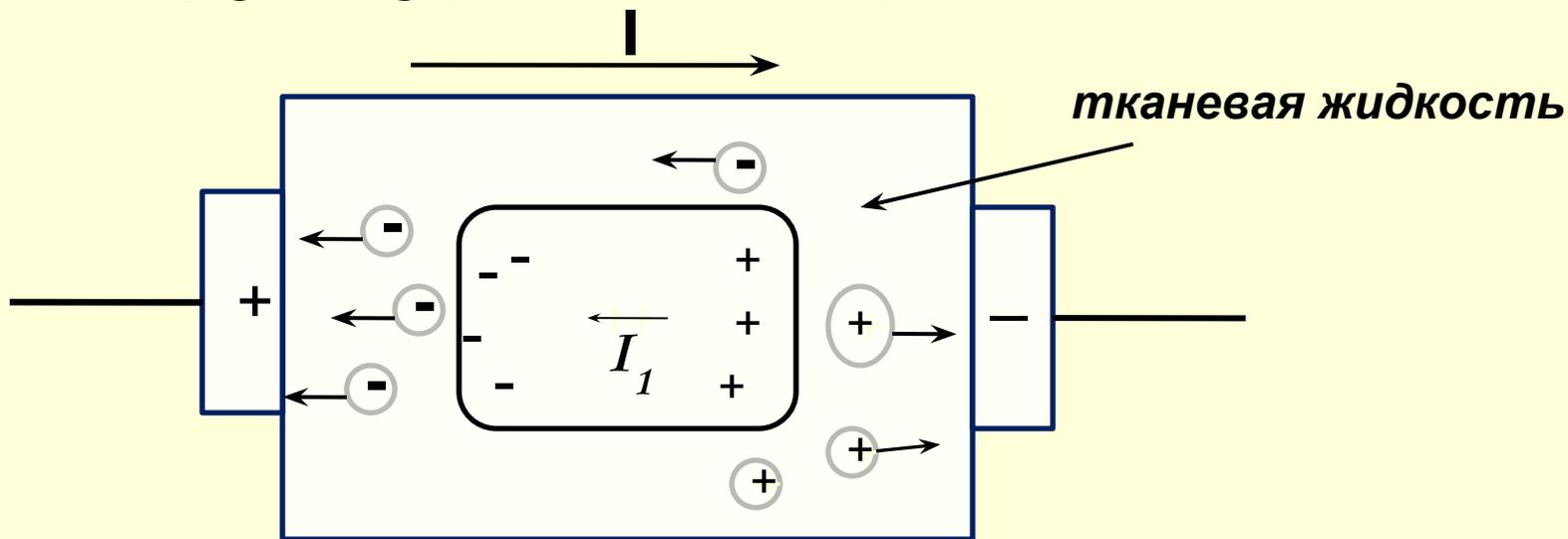
**Удельная проводимость** электролита тем больше, чем больше заряд ионов, их концентрация и подвижность ионов. С увеличением температуры увеличивается подвижность ионов и возрастает проводимость электролита.

# Особенности электропроводимости биологических тканей.

*Поскольку в структуру живых тканей входят электролиты, то при прохождении тока через ткань в определенной степени проявляются общие законы прохождения тока через электролиты. Однако биологические ткани содержат и элементы, обладающие выраженными свойствами диэлектриков – клеточные мембраны, которые играют большую роль в формировании механизмов прохождения тока через живую ткань.*

*Для биологических тканей характерна*

## **структурная поляризация**



<b><i>Ткань, электролит</i></b>	<b><i><math>\rho</math>, Ом*м</i></b>
<b>Спинномозговая жидкость</b>	<b>0.55</b>
<b>Кровь</b>	<b>1.66</b>
<b>Мышечная ткань</b>	<b>2</b>
<b>Ткань мозговая и нервная</b>	<b>14.3</b>
<b>Ткань жировая</b>	<b>33.3</b>
<b>Кожа (сухая)</b>	<b><math>10^5</math></b>
<b>Кость без надкостницы</b>	<b><math>10^7</math></b>



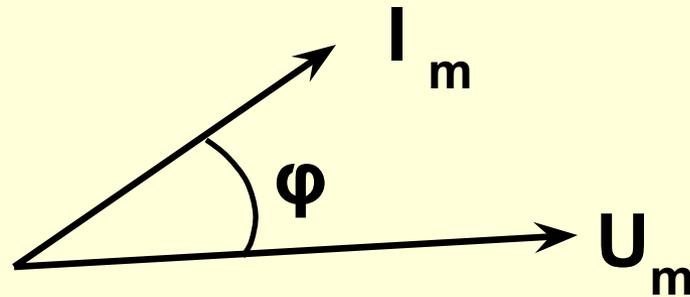
$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad U = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

$U, I$  – мгновенные значения напряжения и силы тока

$U_m, I_m$  – амплитудные значения напряжения и силы тока

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi / T \quad (4.17)$$

$\varphi$  – фазовый сдвиг между напряжением и силой тока



$$U_R = U_{Rm} \cos(\omega t - \varphi)$$

- в фазе с током

$$U_L = U_{Lm} \cos(\omega t - \varphi + \pi / 2)$$

- опережает силу тока по фазе

$$U_C = U_{Cm} \cos(\omega t - \varphi - \pi / 2)$$

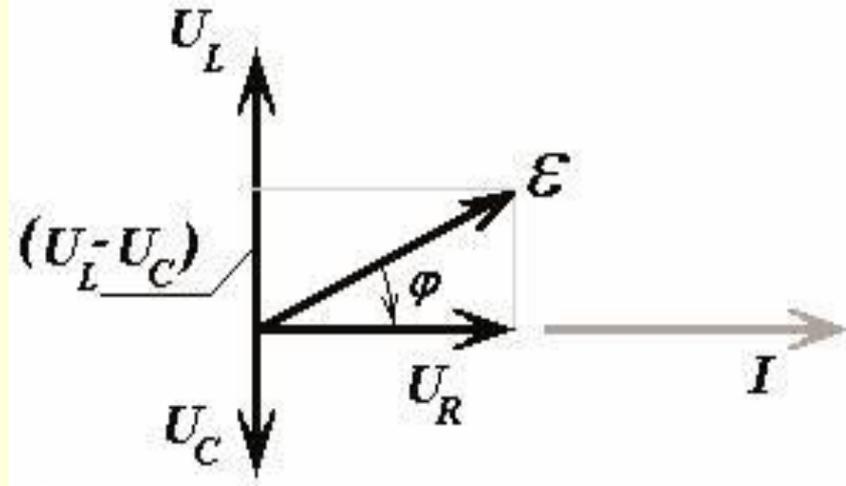
- отстает от силы тока по фазе

$$U_m^2 = U_{Rm}^2 + (U_{Lm} - U_{Cm})^2$$

Запишем выражения для сопротивлений катушки индуктивности и конденсатора

$$X_L = L\omega \text{ индуктивное сопротивление}$$

$$X_C = 1 / C\omega \text{ емкостное сопротивление}$$



$$I_m^2 Z^2 = I_m^2 R^2 + [I_m L\omega - I_m / (C\omega)]^2 \quad (4.18)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + [L\omega - 1/(C\omega)]^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

**Z** – полное сопротивление цепи или *импеданс*

Тогда закон **Ома** для полной цепи выглядит так :

$$I_m = U_m / Z = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (4.19)$$

Вычислим разность фаз  $\varphi$ :

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{Lm} - U_{Cm}}{U_{Rm}} = \frac{I_m L\omega - I_m / (C\omega)}{I_m R} = \frac{X_L - X_C}{R}$$

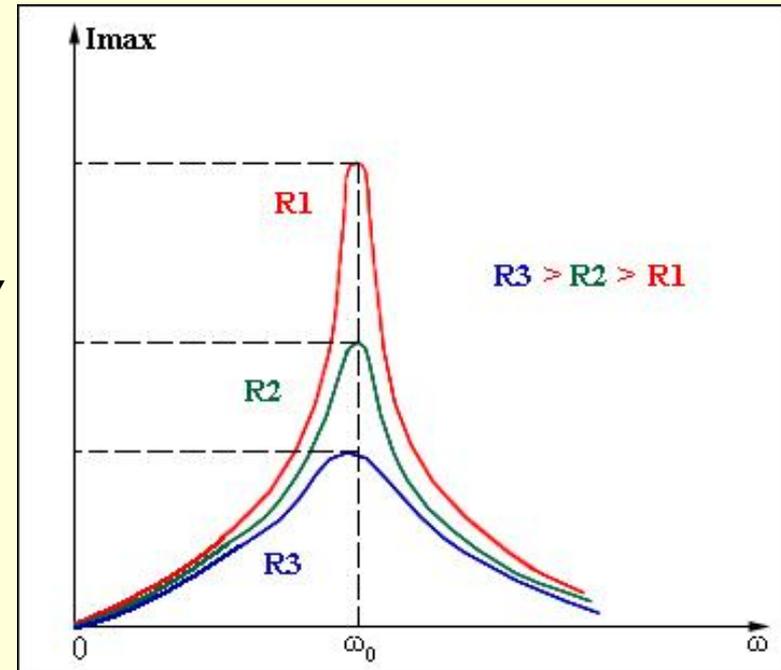
# Резонанс напряжений.

Рассмотрим случай, когда  $X_L = X_C$

В этом случае полное сопротивление цепи становится минимальным и равно **активному** сопротивлению **R**, а **ток становится максимальным**, наступает

## Резонанс напряжений

$$U_{Lm} = U_{Cm} \quad L\omega_{рез} = 1/(C\omega_{рез})$$

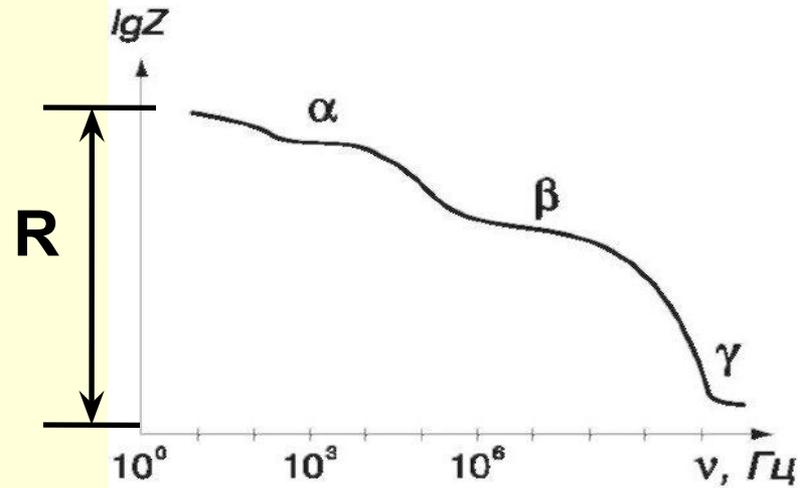


$$\omega_{рез} = 1 / \sqrt{LC}$$

(4.20)

# Импеданс тканей организма.

Ткани живых организмов являются проводниками как постоянного, так и переменного токов. Опыт показывает, что емкостное сопротивление больше индуктивного.



Импеданс мышечной ткани

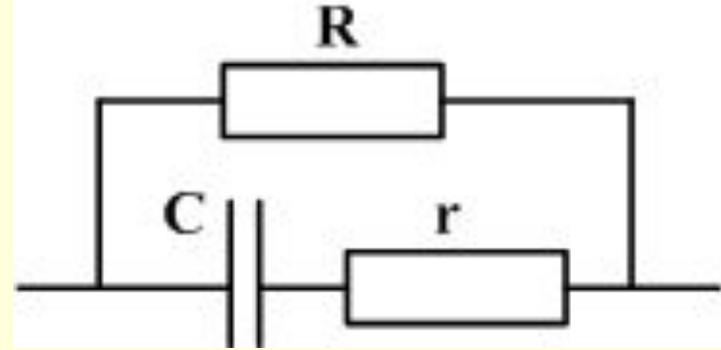
Объяснение зависимости:

При воздействии переменным полем имеется зависимость  $\epsilon$  от частоты поля, что приводит к зависимости емкости а значит и импеданса от частоты электромагнитного поля.

$\gamma$  - соответствует поляризации молекул воды  $\approx 20$  ГГц

$\beta$  - соответствует поляризации крупных органических молекул (белков)  
 $\approx 1 - 10$  МГц

$\alpha$  - соответствует поляризации клеток  $0.1 - 10$  КГц



Эквивалентная электрическая схема мышечной ткани

$$Z = \frac{R\sqrt{1+r^2\omega^2C^2}}{\sqrt{1+(R+r)^2\omega^2C^2}} \quad L = 0 \quad (4.21)$$

*Ткани организма обладают свойствами как диэлектрика, так и электролита. Поляризация диэлектриков во внешнем магнитном поле происходит не мгновенно, а зависит от времени.*

$$P_e = f(t) \quad \text{При } E = \text{const.}$$

$$P_{em} = f(\omega) \quad \text{при } E = E_m \cos \omega t$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

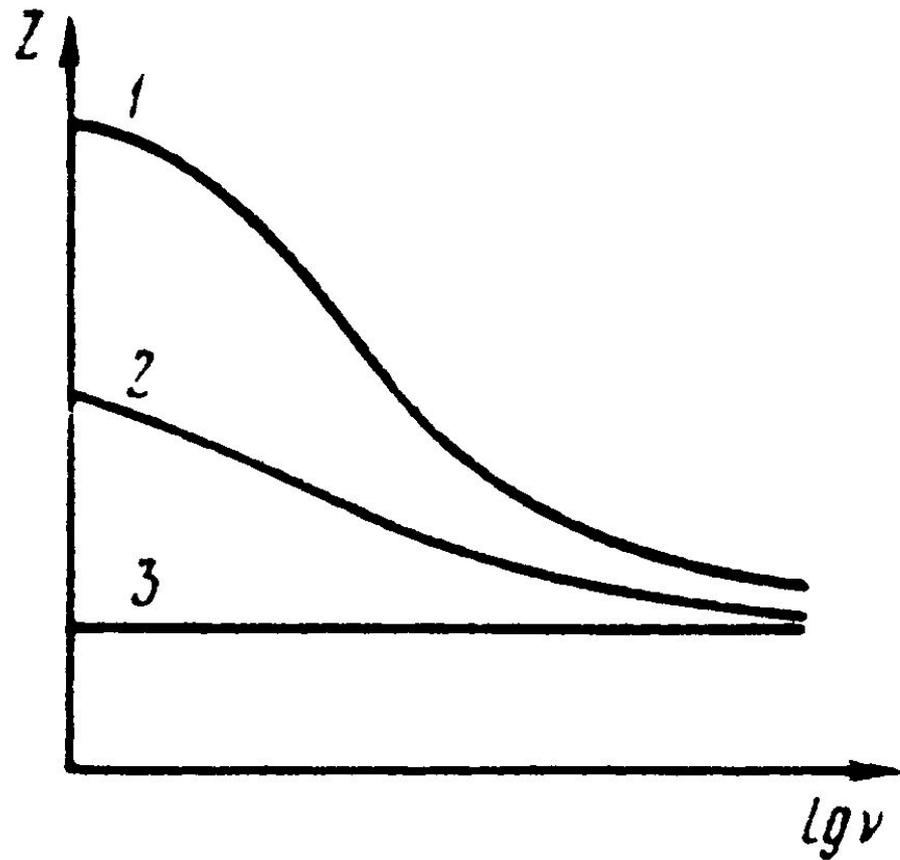


**(4.22)**

$$\varepsilon = 1 + \frac{P_{em}}{\varepsilon_0 E_m}$$

*Имеется частотная зависимость диэлектрической проницаемости при воздействии гармоническим электрическим полем. Изменение диэлектрической проницаемости означает изменение электроемкости и, как следствие, изменение импеданса.*

Для **КОЖИ** сопротивление на **постоянном токе** велико  $R \sim 10^4 - 10^6$  Ом. На высоких частотах падает в **10- 20 раз!**



**1** – Образец не подвергался ни каким воздействиям

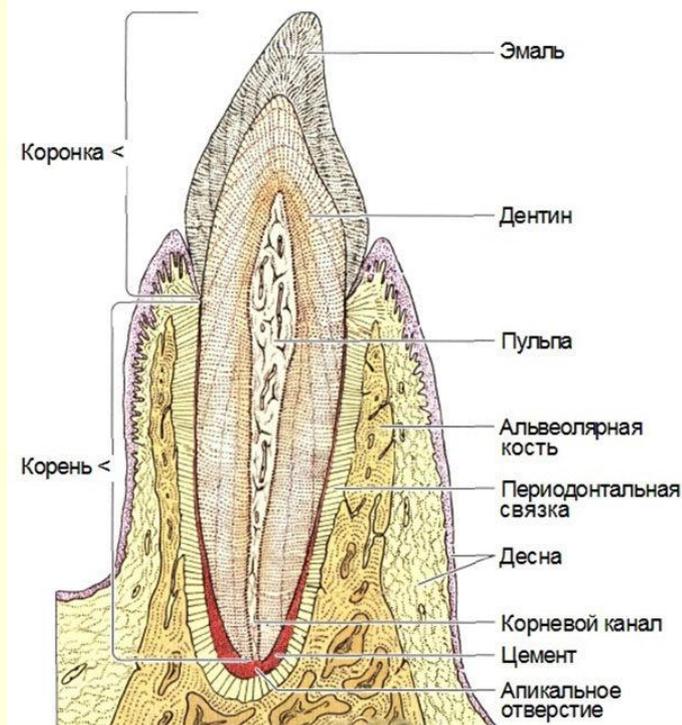
**2** – ткань подвергнута кратковременному нагреванию, приводящему к частичному разрушению клеточных структур

**3** – образец ткани, подвергнутый длительному кипячению, вызывающему полное разрушение мембран (мертвая ткань)

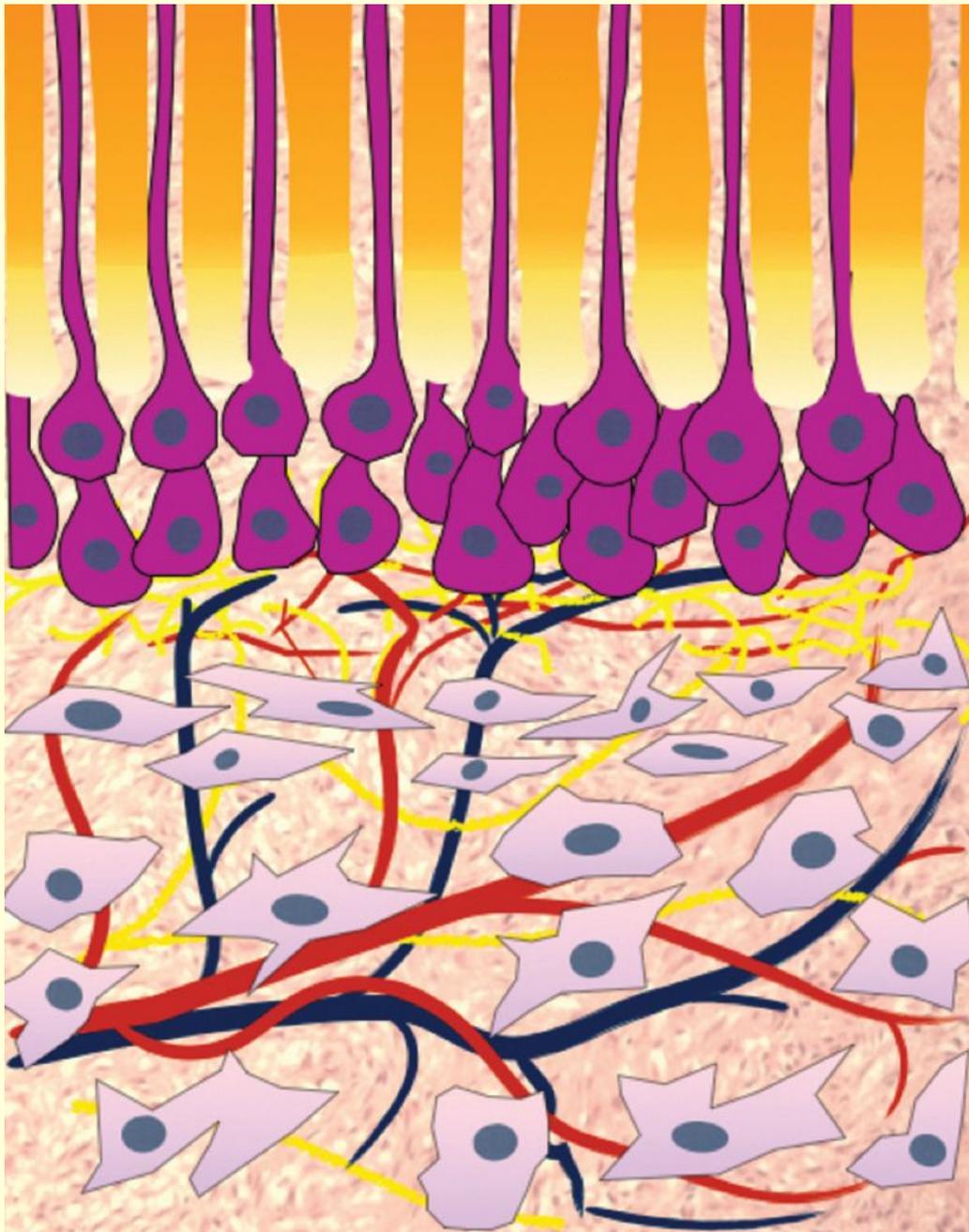
5

# Применение импульсных токов в стоматологии.

## Электроодонтодиагностика.



**Электроодонтодиагностика (ЭОД)** – метод стоматологического исследования, основанный на определении порогового возбуждения болевых и тактильных рецепторов пульпы зуба при прохождении через неё электрического тока.



**Дентин**

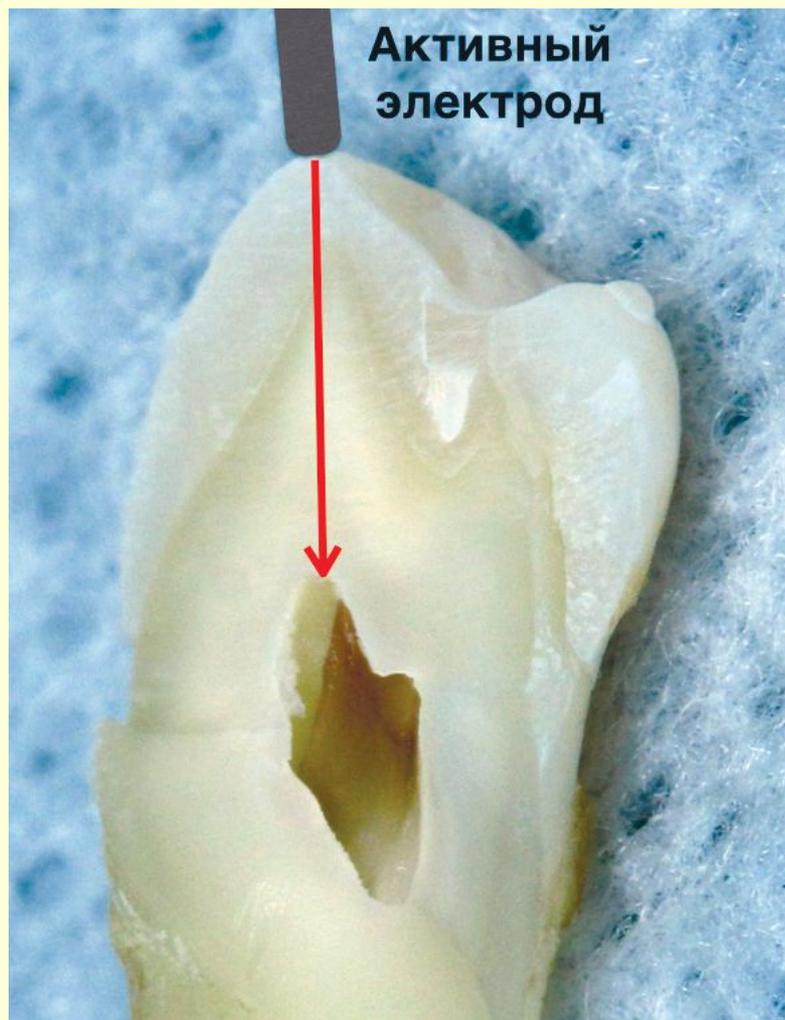
**Предентин**

**Слой одонтобластов**

**Субодонтобластическое  
нервное сплетение Рашкова**

**Центральный слой  
пульпы**

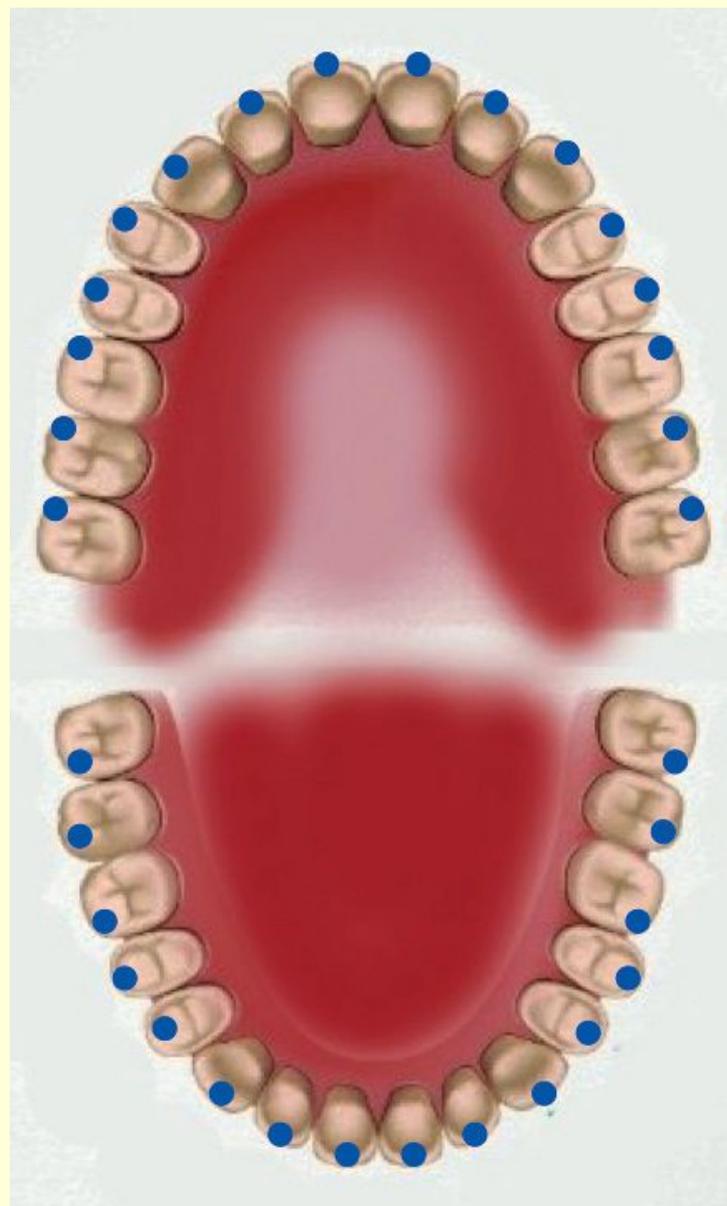
**При проведении ЭОД активный электрод должен располагаться на чувствительной точке исследуемого зуба .**



**Особенности прохождения электрического тока через ткани зуба в зависимости от расположения активного электрода.**



**Расположение врача и пациента при проведении ЭОМ**



**Расположение чувствительных точек на различных зубах**



***Вершина активного электрода электрода, установленная на чувствительную точку зуба***



***Расположение пассивного электрода при проведении ЭОМ***

*Динамика цифровых значений диагностического тока при клинической апробации аппарата Пульп Эст*

<b>Значение диагностического тока, мкА</b>	<b>Диагноз</b>	<b>Увеличение значения ЭОМ по отношению к физиологической норме</b>
<b>2 - 8</b>	<b>Интактный зуб</b>	<b>-</b>
<b>9 - 14</b>	<b>Кариес</b>	<b>в 2 - 3 раза</b>
<b>15 - 24</b>	<b>Глубокий кариес</b>	<b>в 3 - 4 раза</b>
<b>25 - 44</b>	<b>Пульпит</b>	<b>в 4 - 6</b>
<b>45 -80 / реакции нет</b>	<b>Периодонтит</b>	<b>более чем 6 раз</b>