

*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. Электрооодонтодиагностика**

1

Электромагнитное поле – особая форма материи

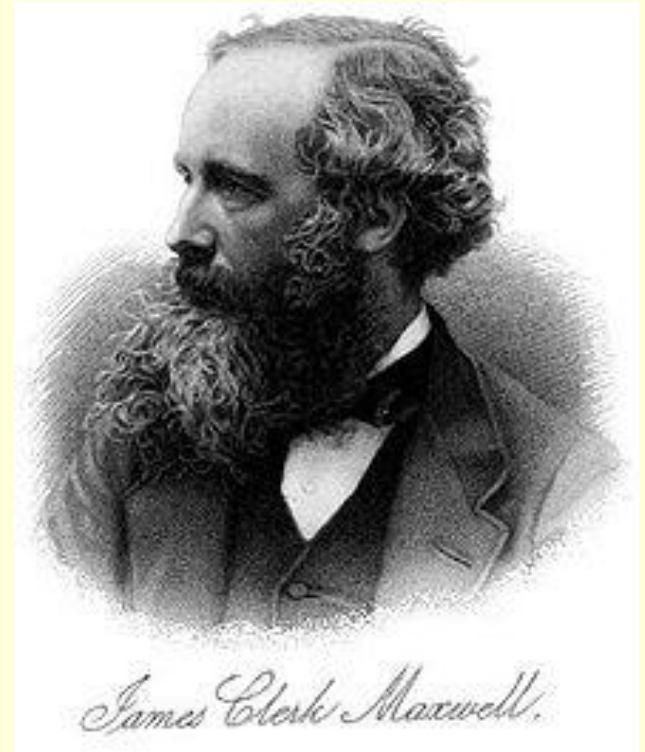
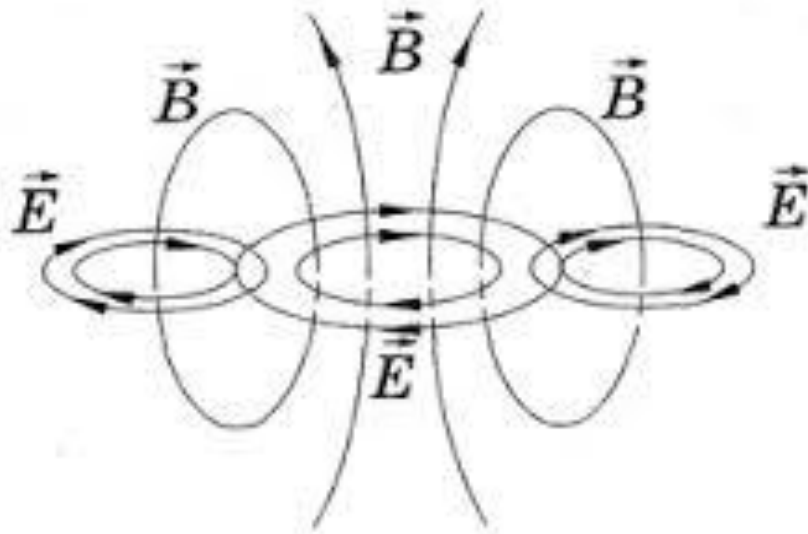
Направления медико-биологических приложений электромагнитных полей

- 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

```
graph TD; A[Уравнения Максвелла] --> B(Электростатика); A --> C(Магнитостатика); A --> D(Электродинамика);
```

Электростатика

Магнитостатика

Электродинамика

*Эл. токи в различных
средах*

Электромагнитное поле

Радиоволны

СВЧ – излучение

Микроволновое излучение

ИК, УФ - излучение

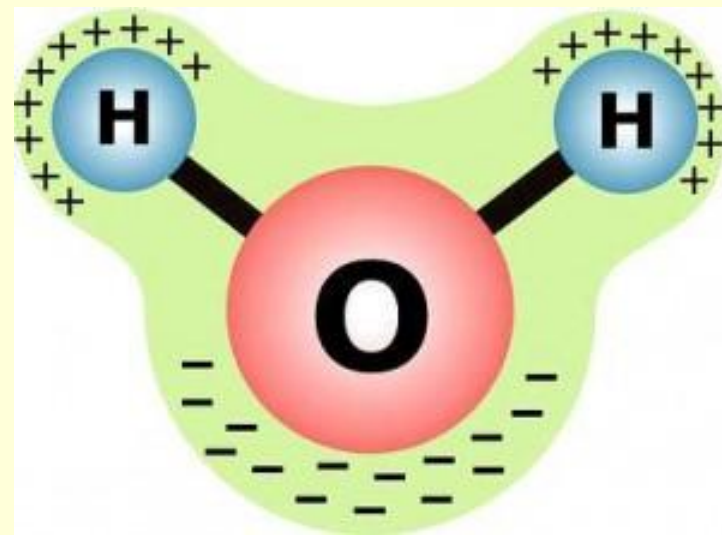
Видимое излучение (свет)

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.

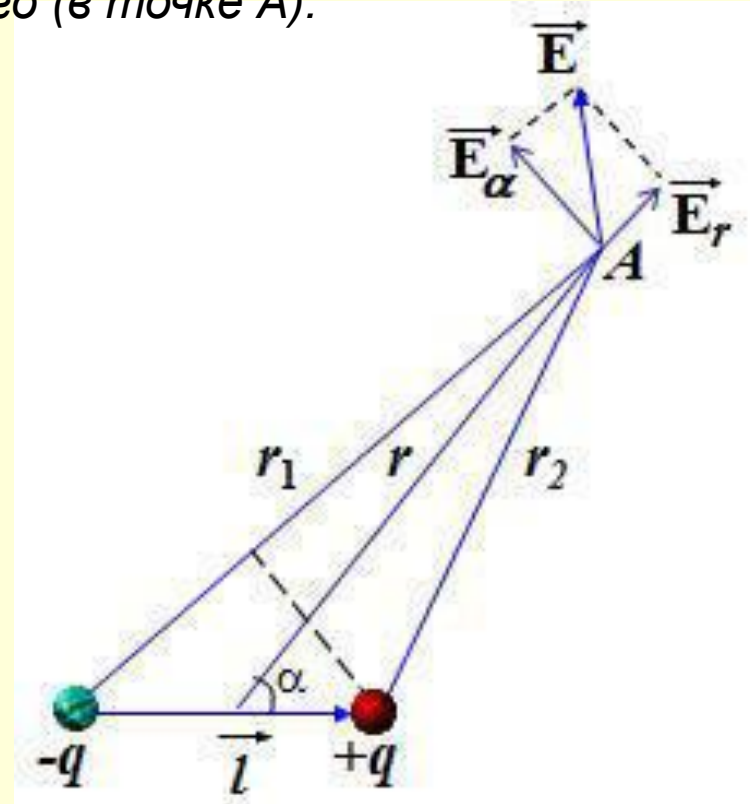
$$p = ql \quad (4.11)$$

Потенциал электрического диполя

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

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

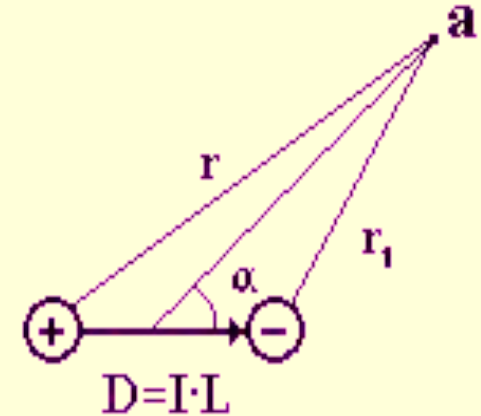
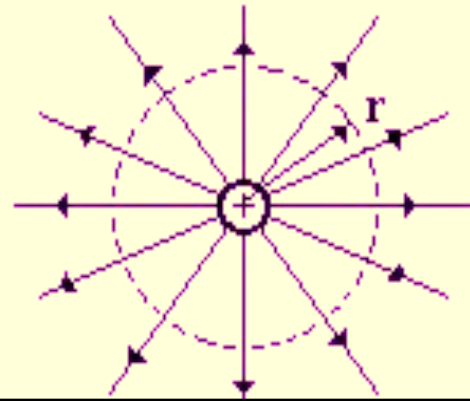
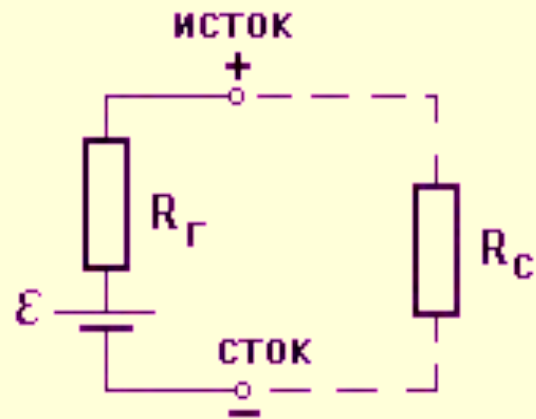
$$\varphi_A = k \frac{ql \cos \alpha}{\varepsilon r^2} = k \frac{p \cos \alpha}{\varepsilon r^2}$$



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

(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.



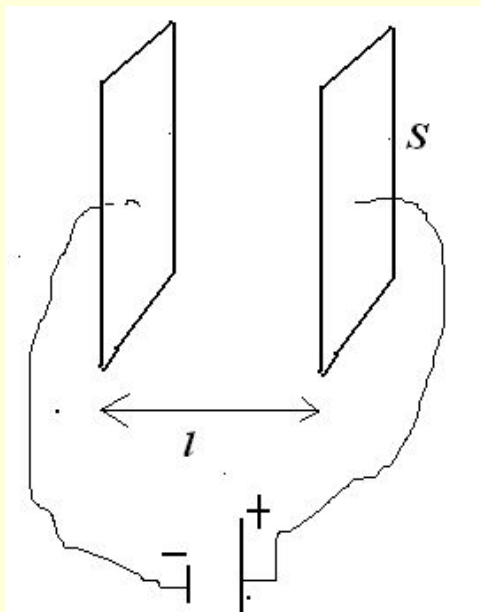
$$\varphi_A = \rho \frac{D \cos \alpha}{4\pi r^2} \approx \frac{D \cos \alpha}{r^2}$$

Токовый диполь
(4.3)

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

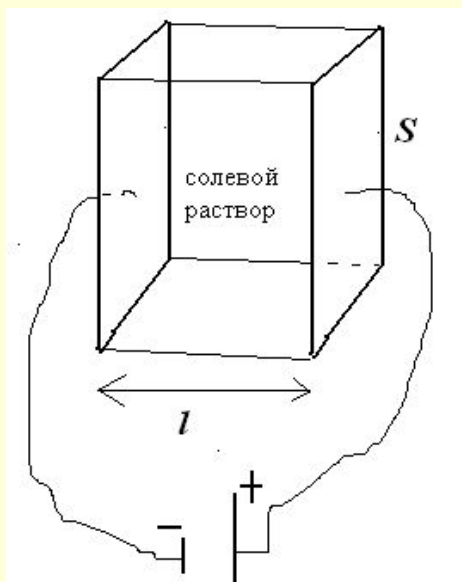
$$U_{AB} \approx \frac{D \cos \alpha}{r^2} \quad (4.4)$$

Подобие электрического и токового диполей



Конденсатор, между пластинами диэлектрик или вакуум.

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



Между пластинами проводящая среда.

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

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***

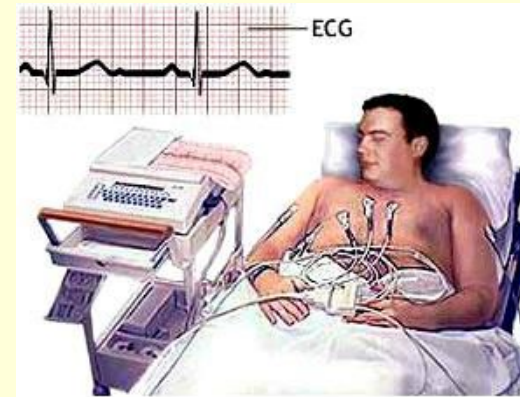
- *Дипольный момент* ***т. диполя P_T = I * l***

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

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

- Электрокардиография

(запись биопотенциалов сердца)



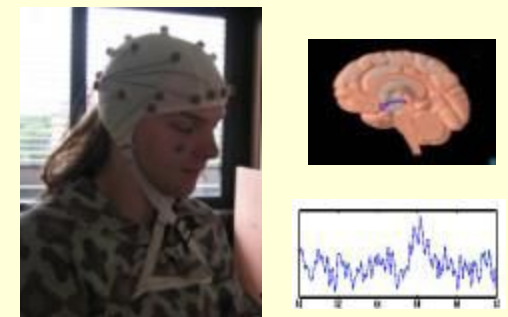
- Электромиография

(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

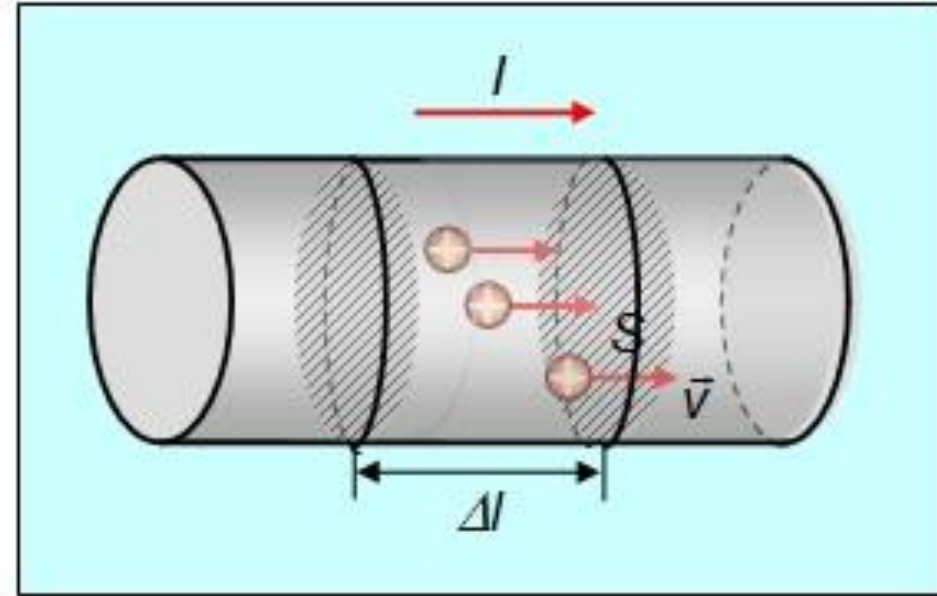
v – скорость частиц

Δl – длина выделенного участка

n - концентрация частиц

Определение.

Сила тока – это отношение **заряда** Δq , прошедшего через рассматриваемую поверхность **S** ко времени времени прохождения Δt .



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

(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

$$j = q_e n v$$

(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**.*

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

Биологические жидкости преимущественно являются электролитами.

Из практики известно, что :

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

- закон Ома (4.8)

Если проводник однородный, то

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

ρ – удельное сопротивление

l – длина проводника

S – площадь поперечного сечения

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

$$I = \frac{U}{R} = \frac{US}{\rho l}$$

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

получим :

$$j = \frac{E}{\rho}$$

обозначим

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

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

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

γ – *проводимость*
(удельная электропроводимость)

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

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

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

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 α , получим

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

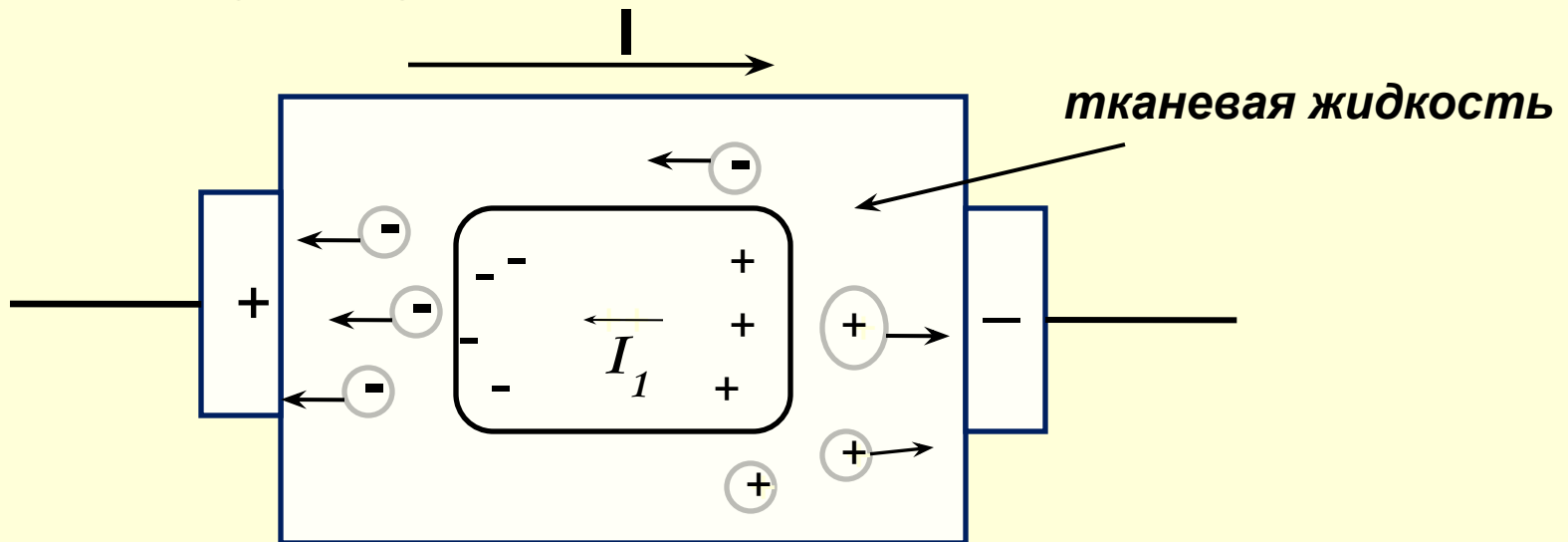
Удельная проводимость электролита тем больше, чем больше заряд ионов, их концентрация и подвижность ионов. С увеличением температуры увеличивается подвижность ионов и возрастает проводимость электролита.

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



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

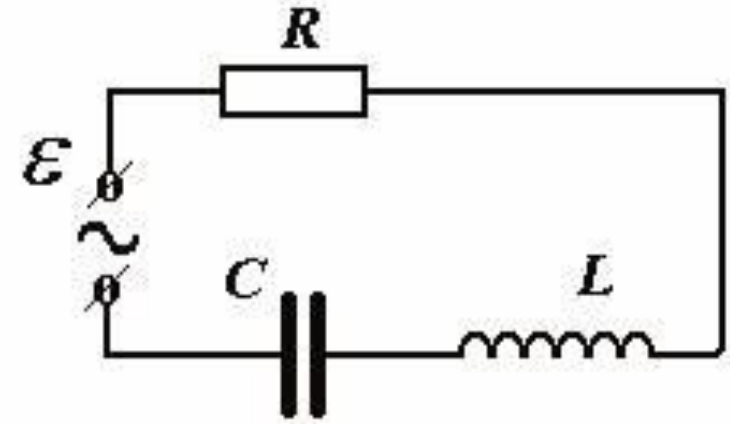
Переменный электрический ток. Закон Ома для полной цепи.

Электрический ток в металлах – направленное движение электронов

- в газах	заряженных <i>ионов и электронов</i>
- в жидкостях	заряженных <i>ионов</i>
- в живых организмах	электронов, <i>ионов</i>

Представим цепь, состоящую из
сопротивления R , катушки индуктивности L
и конденсатора C

$$I = I_m \cos(\omega t - \varphi) \quad (4.15)$$



Сумма напряжений на каждом участке будет равна напряжению источника

$$U = U_m \cos \omega t = U_R + U_L + U_C \quad (4.16)$$

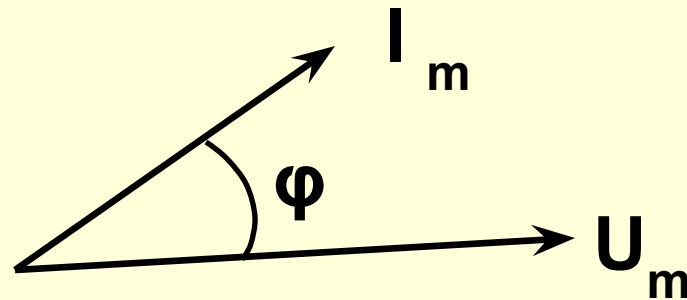
$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad U = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

U, I – мгновенные значения напряжения и силы тока

U_m, I_m – амплитудные значения напряжения и силы тока

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

φ – 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

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

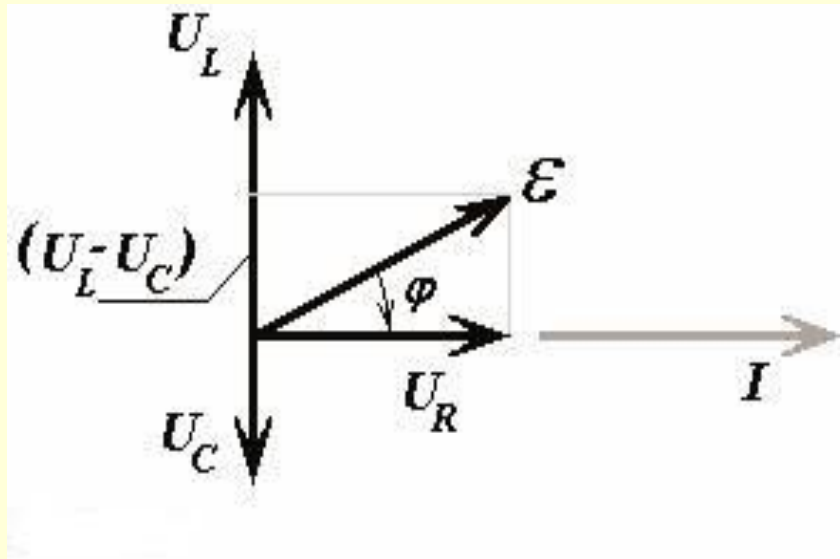
- отстает от силы тока по фазе

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

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 φ** :

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

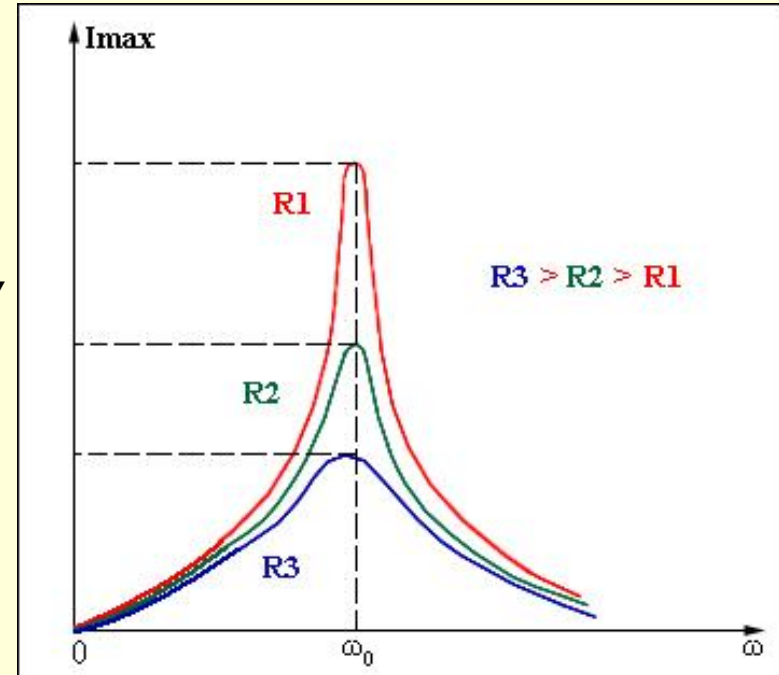
Резонанс напряжений.

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

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

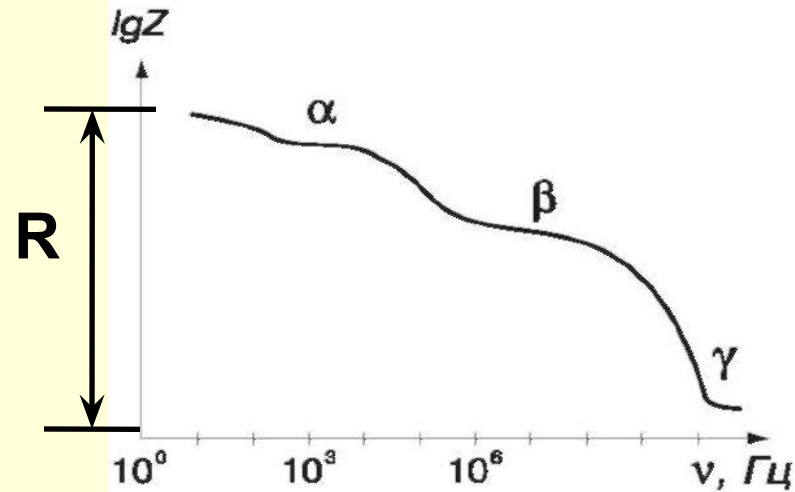


$$\omega_{рез} = 1 / \sqrt{LC}$$

(4.20)

Импеданс тканей организма.

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

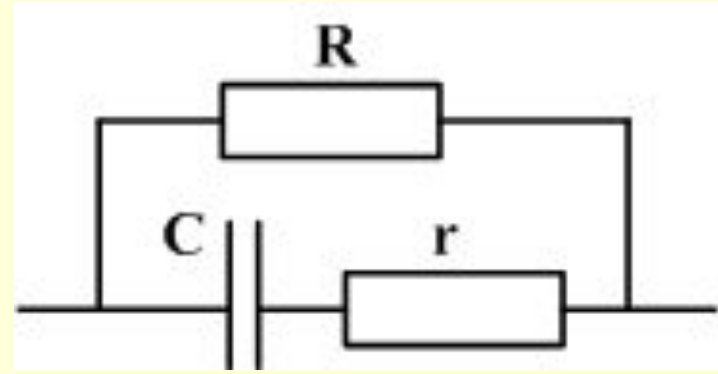


Импеданс мышечной ткани

Объяснение зависимости:

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

- γ - соответствует поляризации молекул воды ≈ 20 ГГц
- β - соответствует поляризации крупных органических молекул (белков)
 $\approx 1 - 10$ МГц
- α - соответствует поляризации клеток **0.1 - 10** КГц



Эквивалентная электрическая схема мышечной ткани

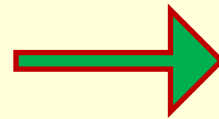
$$Z = \frac{R\sqrt{1 + r^2\omega^2C^2}}{\sqrt{1 + (R + r)^2\omega^2C^2}} \quad L = 0 \quad (4.21)$$

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

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

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

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

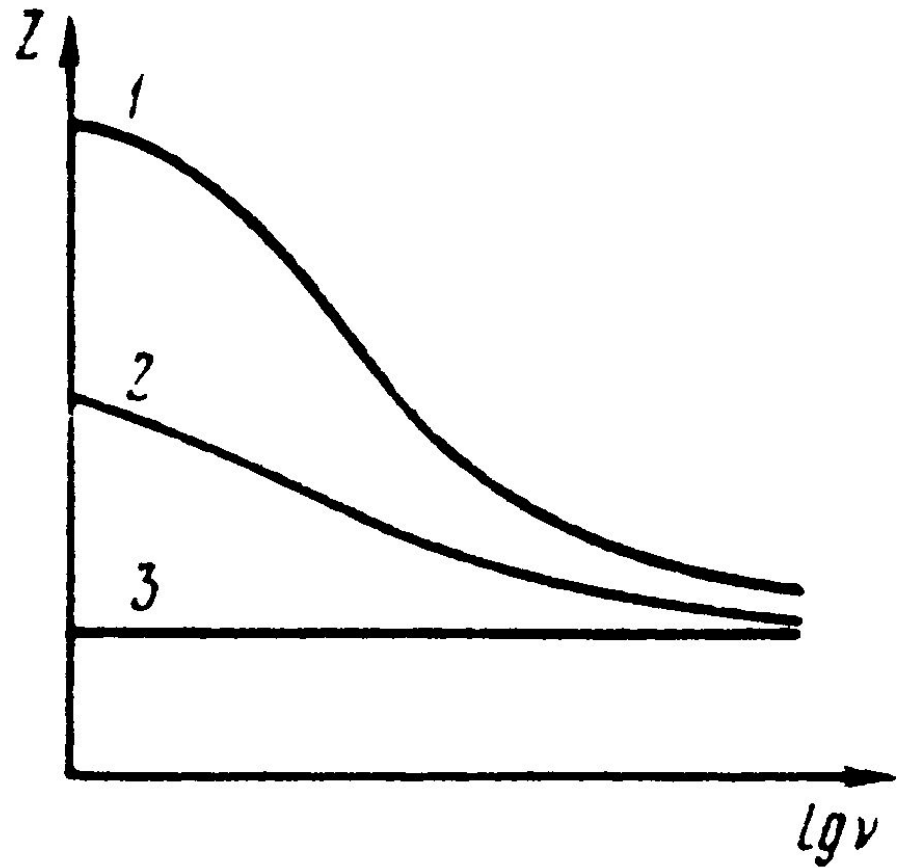


(4.22)

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

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

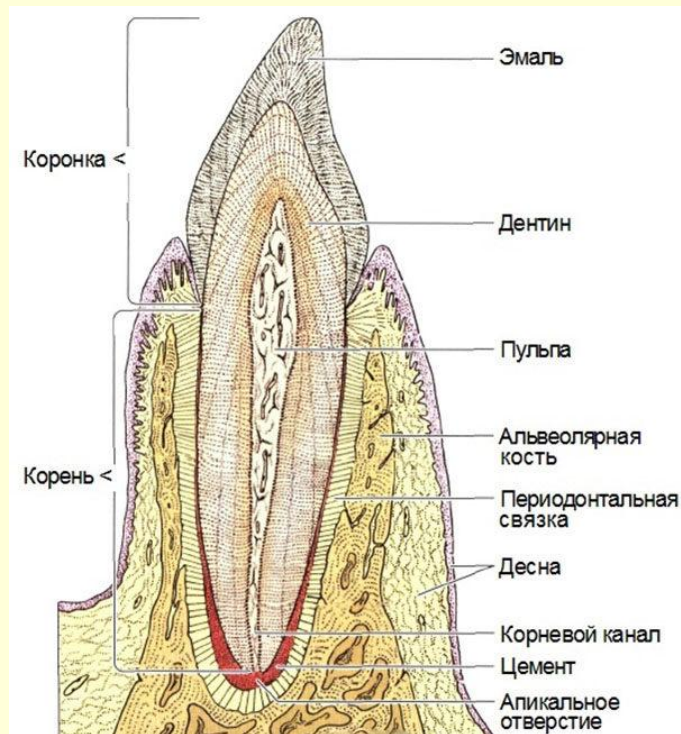
2 – ткань подвергнута кратковременному нагреванию, приводящему к частичному разрушению клеточных структур

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

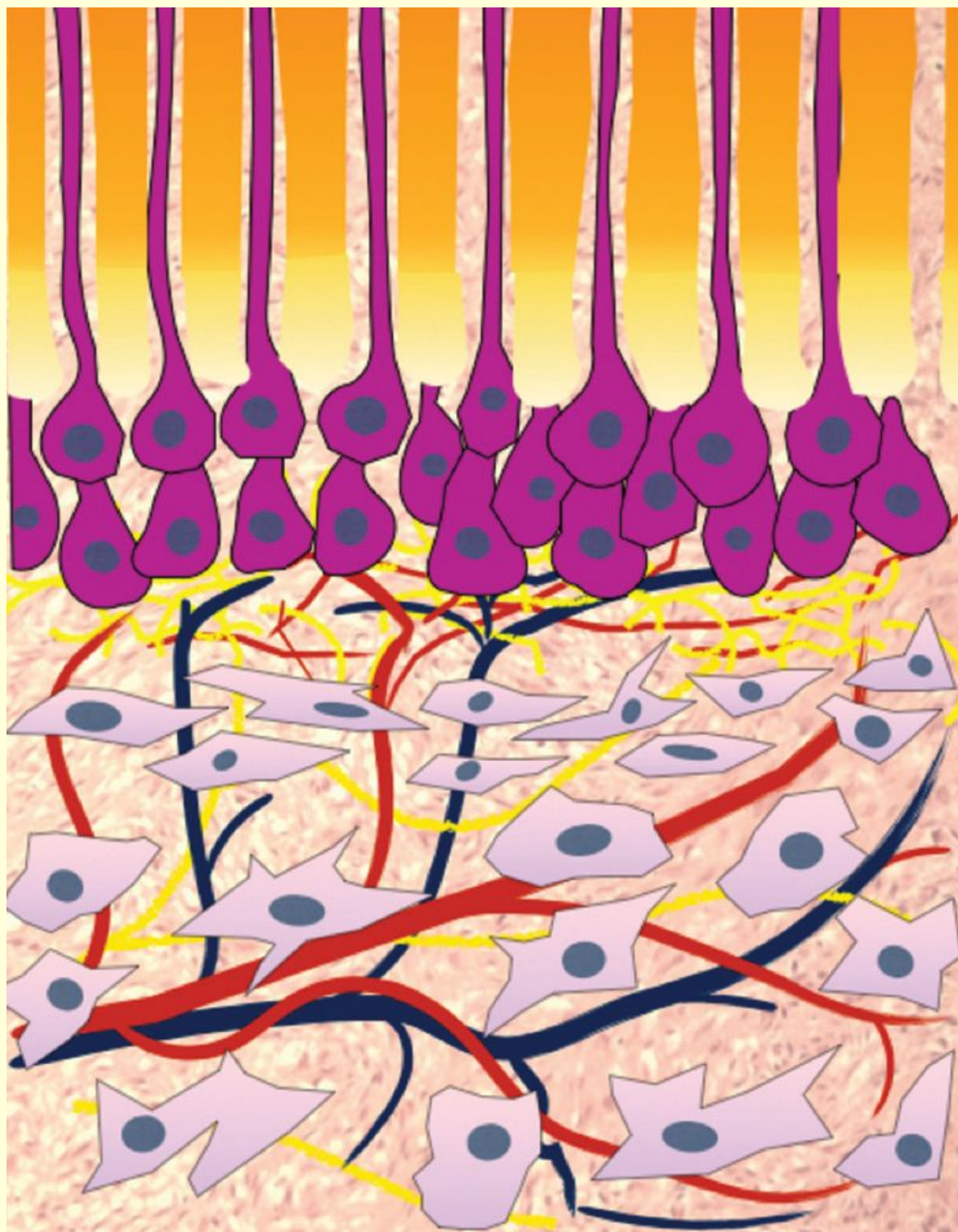
5

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

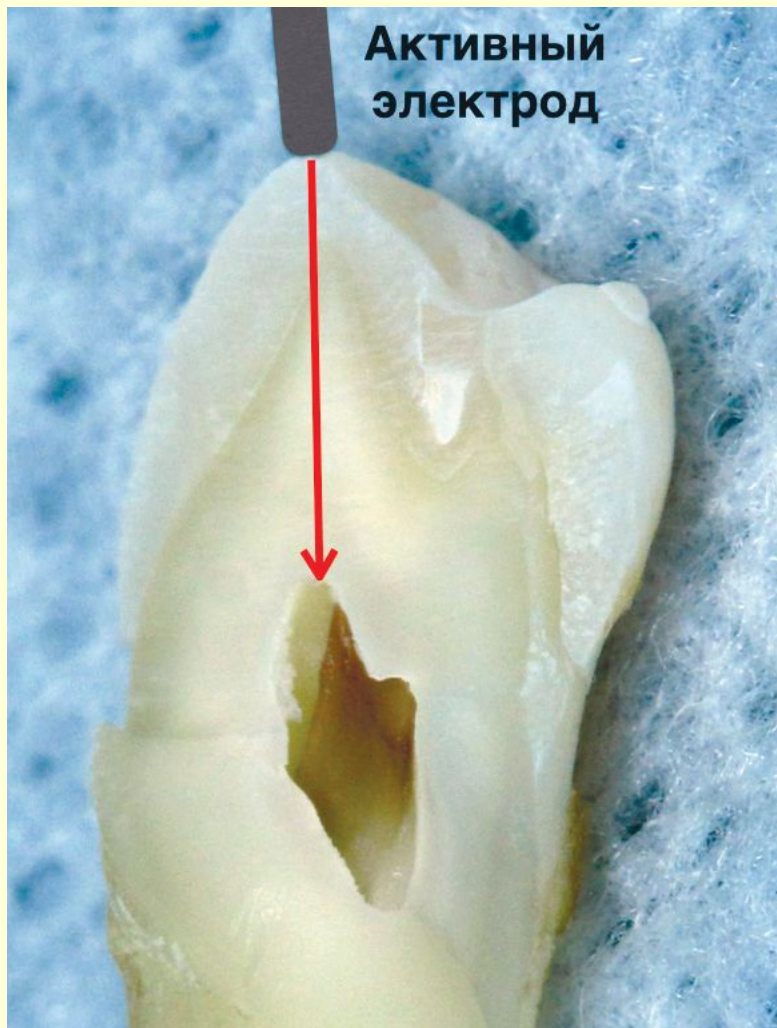
Предентин

Слой одонтобластов

**Субодонтобластическое
нервное сплетение Рашкова**

**Центральный слой
пульпы**

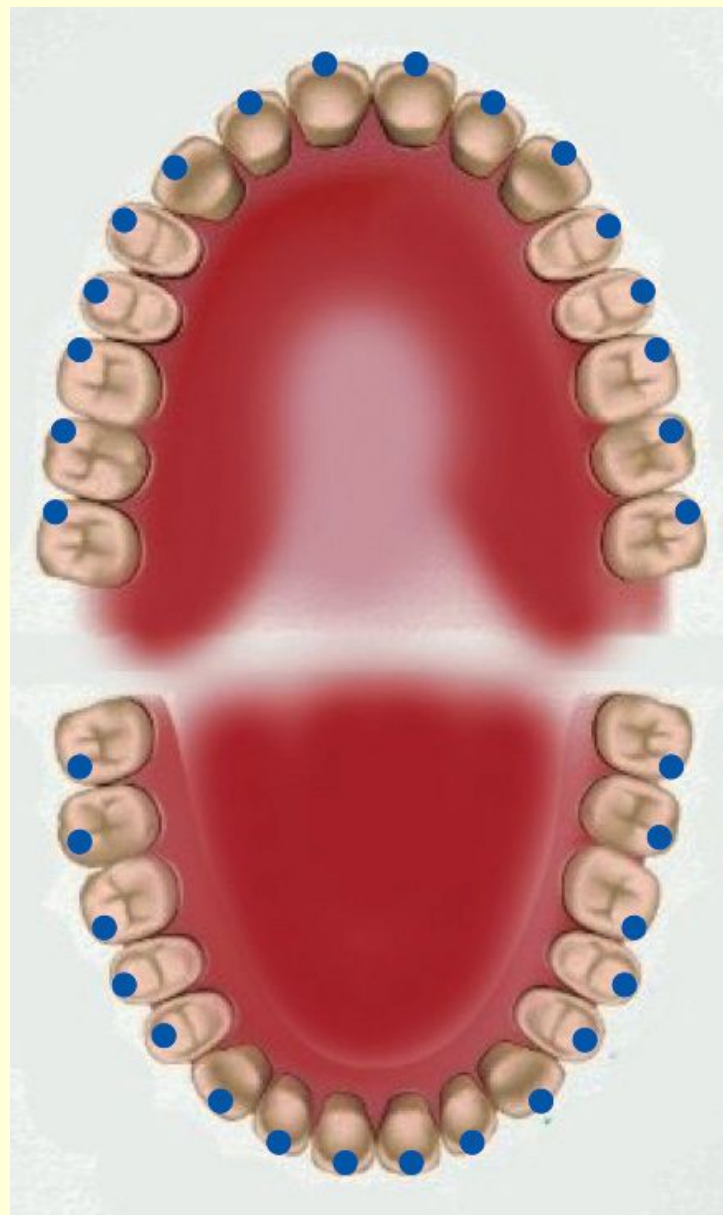
При проведении ЭОД активный электрод должен располагаться на чувствительной точке исследуемого зуба .



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

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