

*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

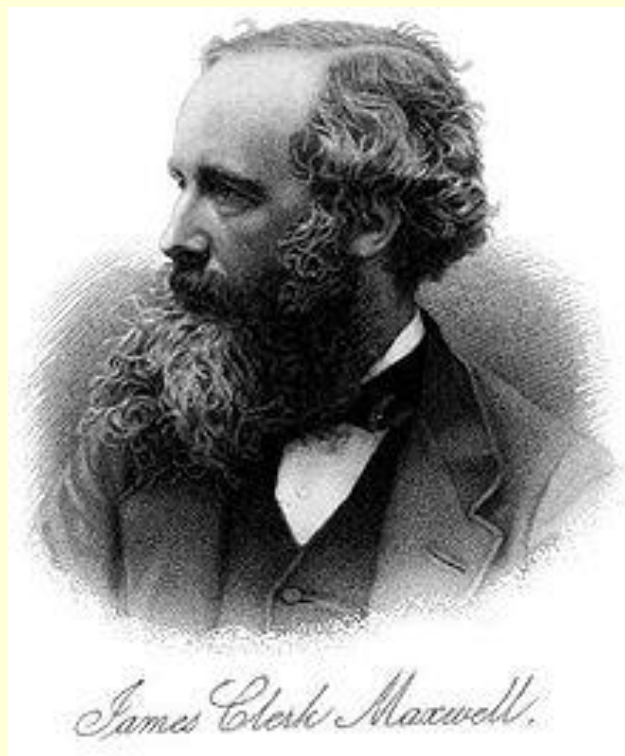
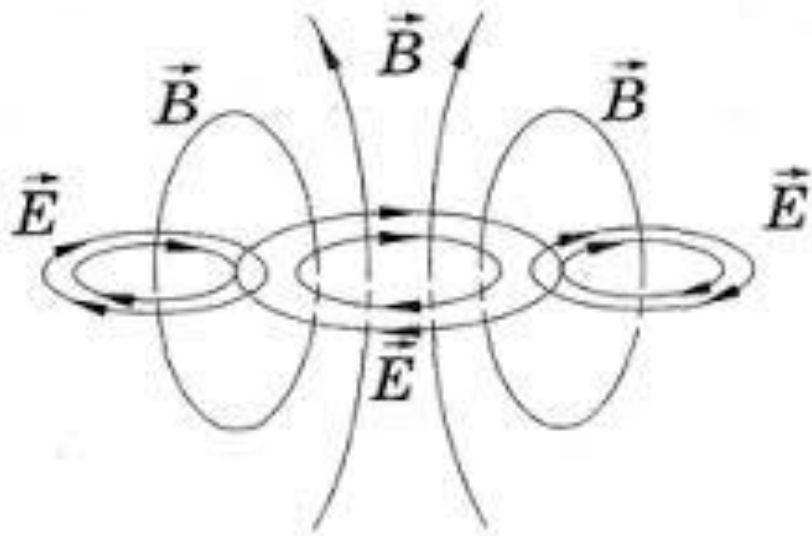
Направления медико-биологических приложений электромагнитных полей

- 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

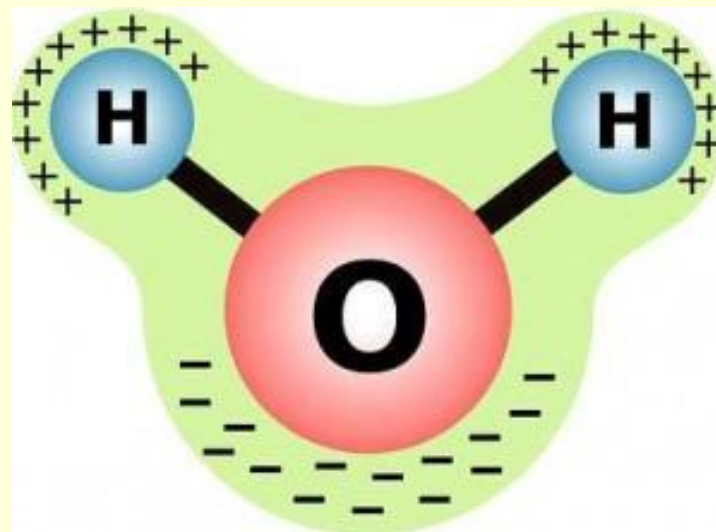
Видимое излучение (свет)

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.

$$p = ql$$

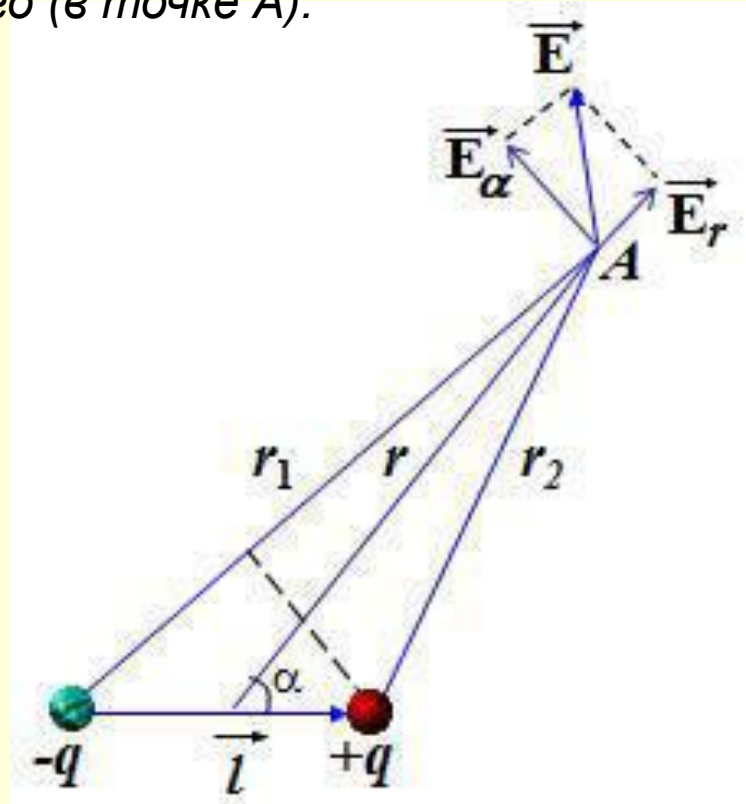
(4.11)

Потенциал электрического диполя

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

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

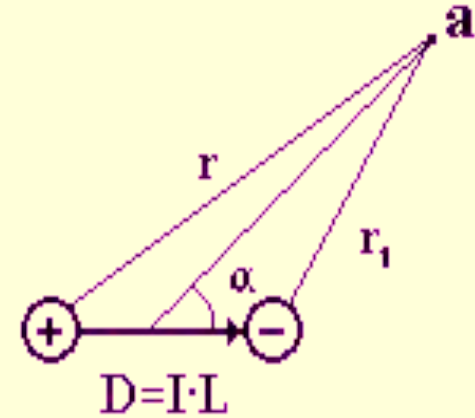
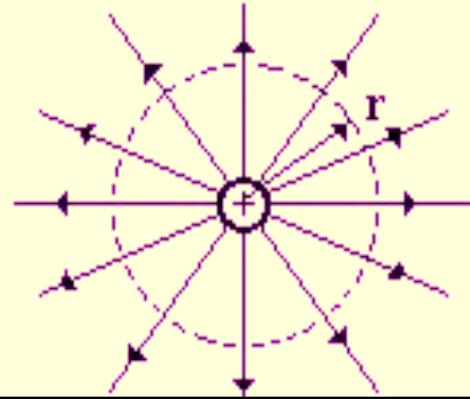
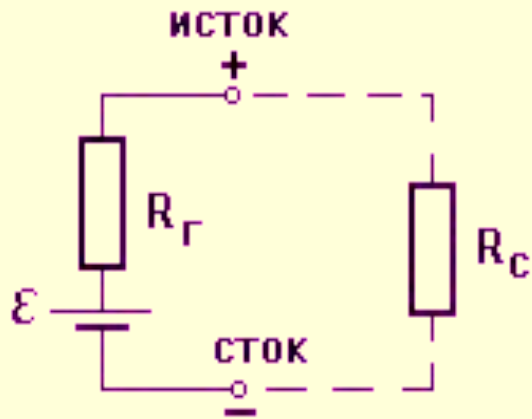
$$\varphi_A = k \frac{ql \cos \alpha}{\varepsilon r^2} = k \frac{p \cos \alpha}{\varepsilon r^2}$$



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

(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.



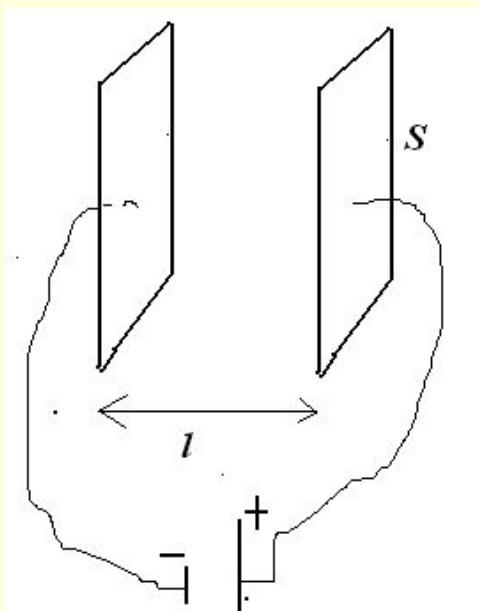
$$\varphi_A = \rho \frac{D \cos \alpha}{4\pi r^2} \approx \frac{D \cos \alpha}{r^2}$$

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



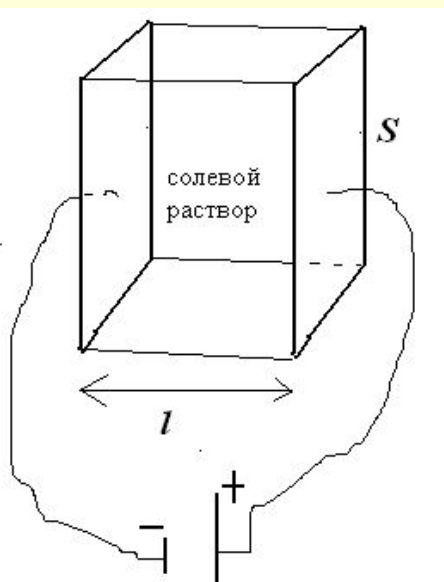
Конденсатор, между пластинами диэлектрик или вакуум.

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

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**

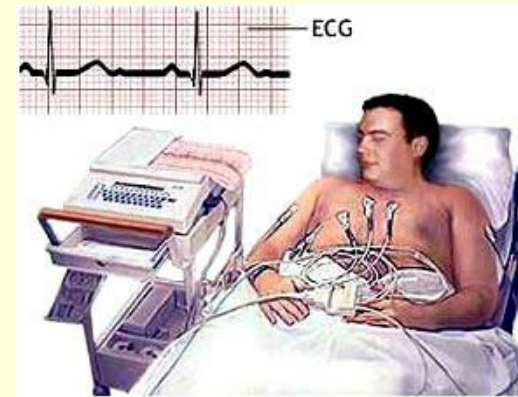
- *Дипольный момент* *т.*
диполя $P_T = I * l$

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

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

- Электрокардиография

(запись биопотенциалов сердца)



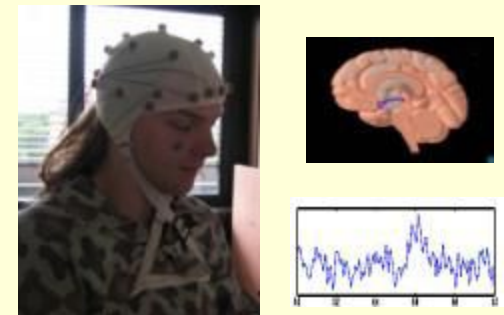
- Электромиография

(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

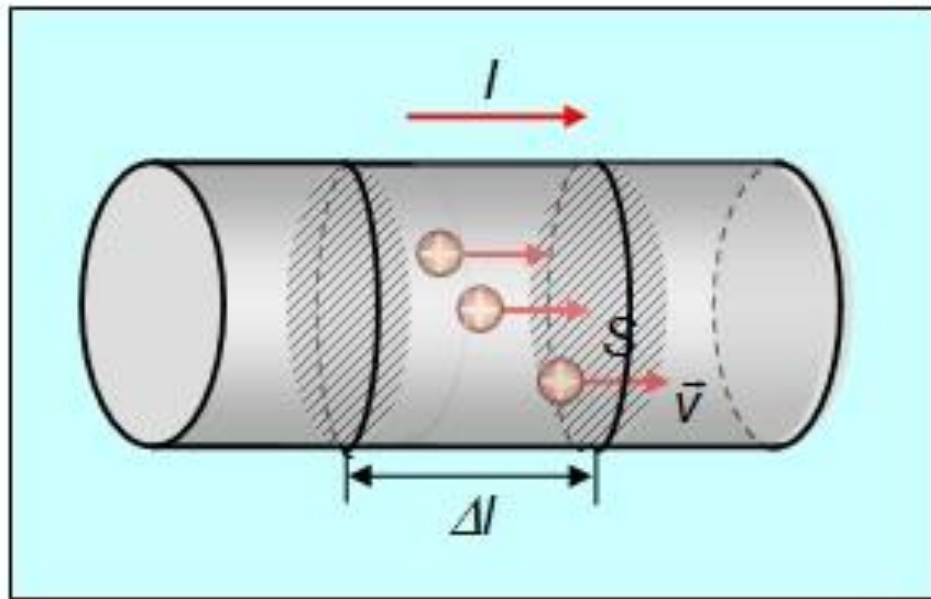
v – скорость частиц

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.

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

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.

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

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)**

γ – *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 α , получим

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

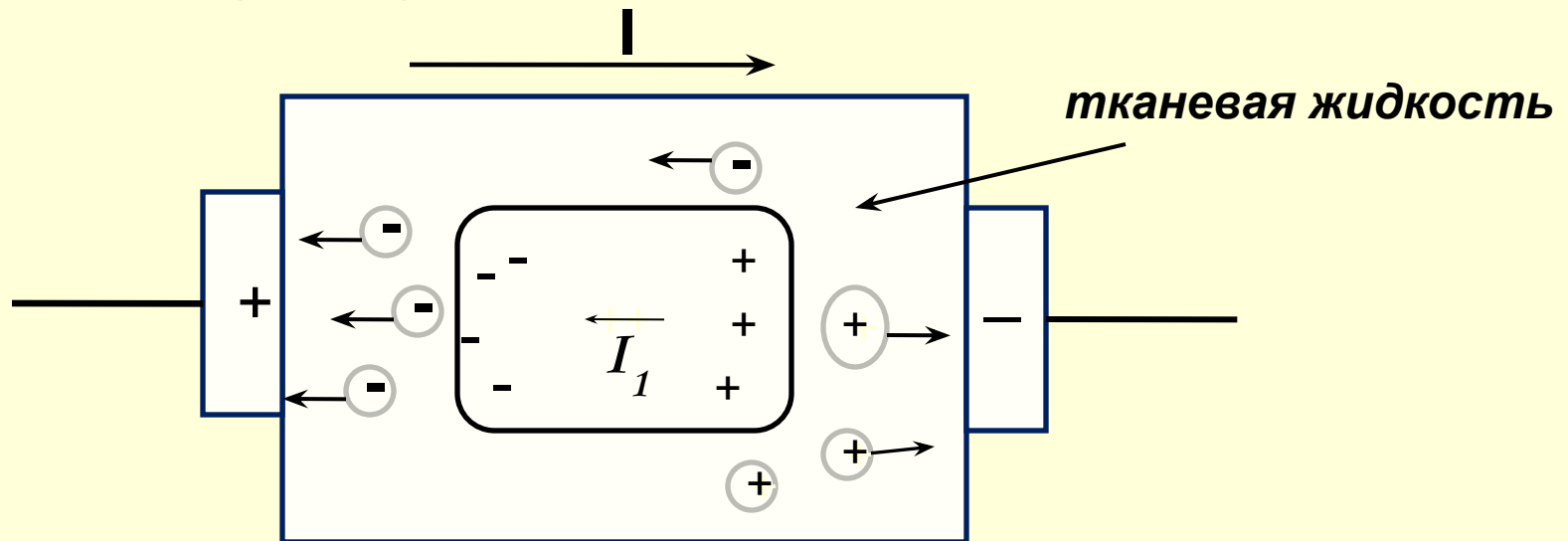
Удельная проводимость электролита тем больше, чем больше заряд ионов, их концентрация и подвижность ионов. С увеличением температуры увеличивается подвижность ионов и возрастает проводимость электролита.

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

4

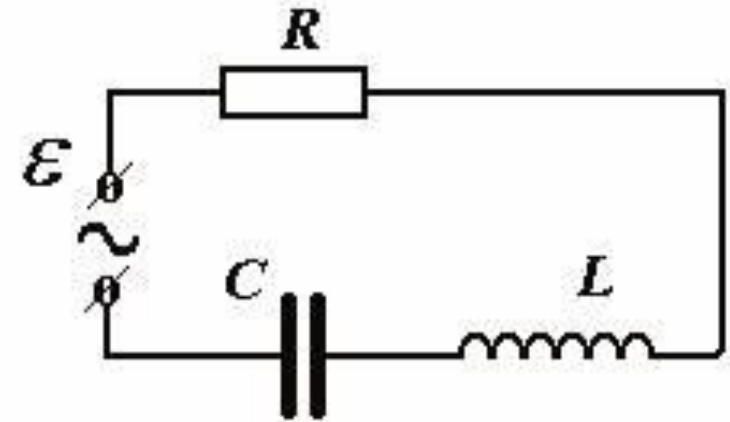
Переменный электрический ток. Закон Ома для полной цепи.

Электрический ток - это направленное движение электрически заряженных частиц .

Электрический ток в металлах – направленное движение электронов

- в газах заряженных **ионов и электронов**
- в жидкостях **заряженных ионов**
- в живых организмах **электронов, ионов**

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

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

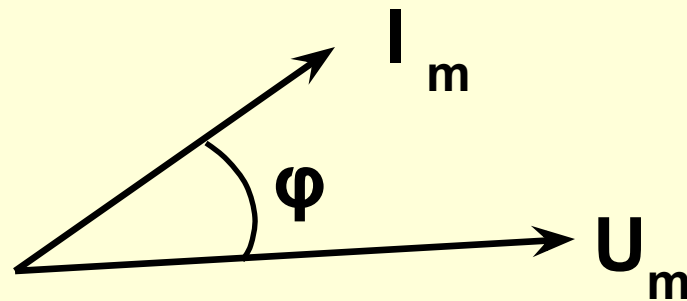
$$I = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad U = U_m \cos(\omega t + \varphi)$$

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

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

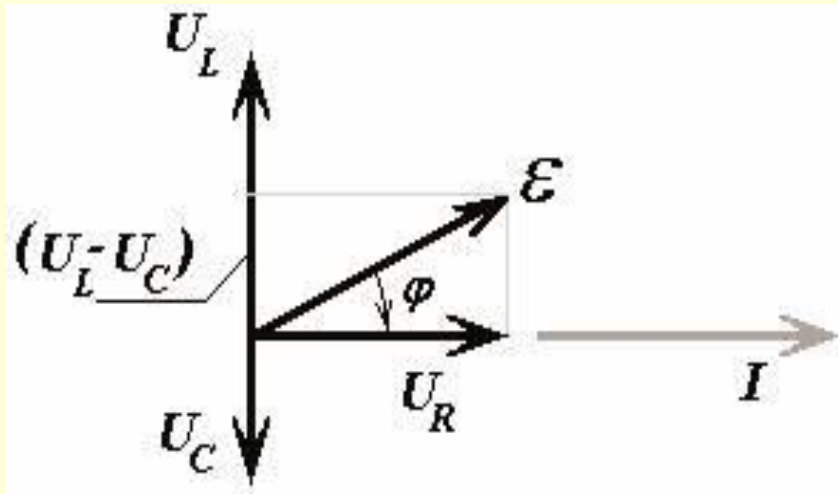
- отстает от силы тока по фазе

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

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 :

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

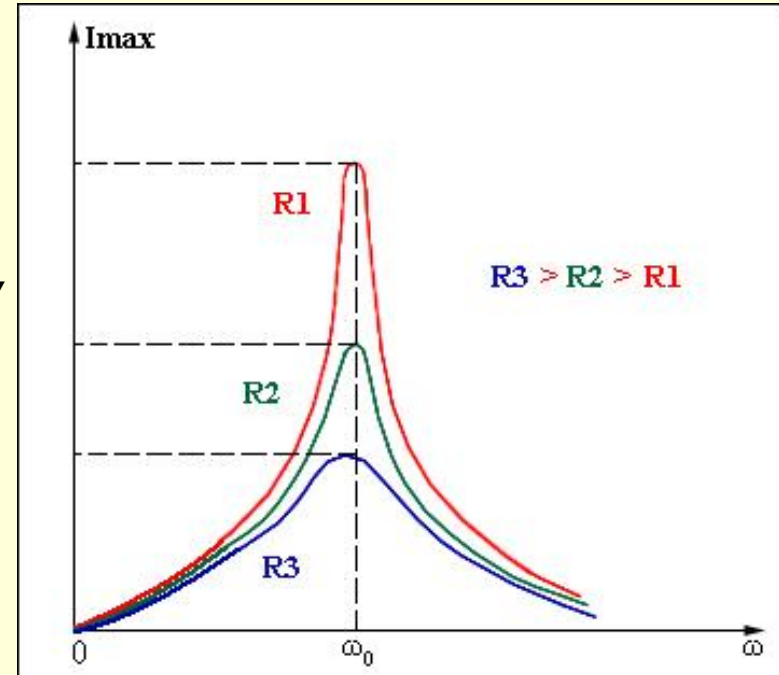
Резонанс напряжений.

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

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

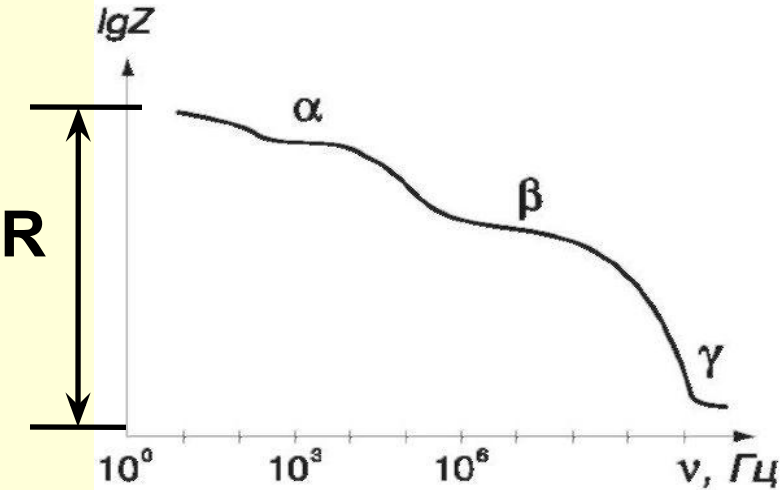


$$\omega_{рез} = 1 / \sqrt{LC}$$

(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

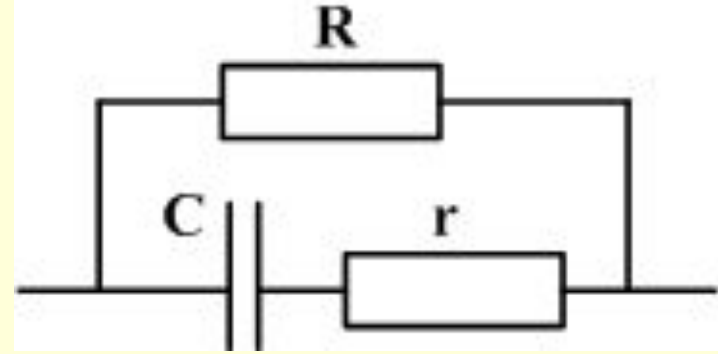
Объяснение зависимости:

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.

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

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

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

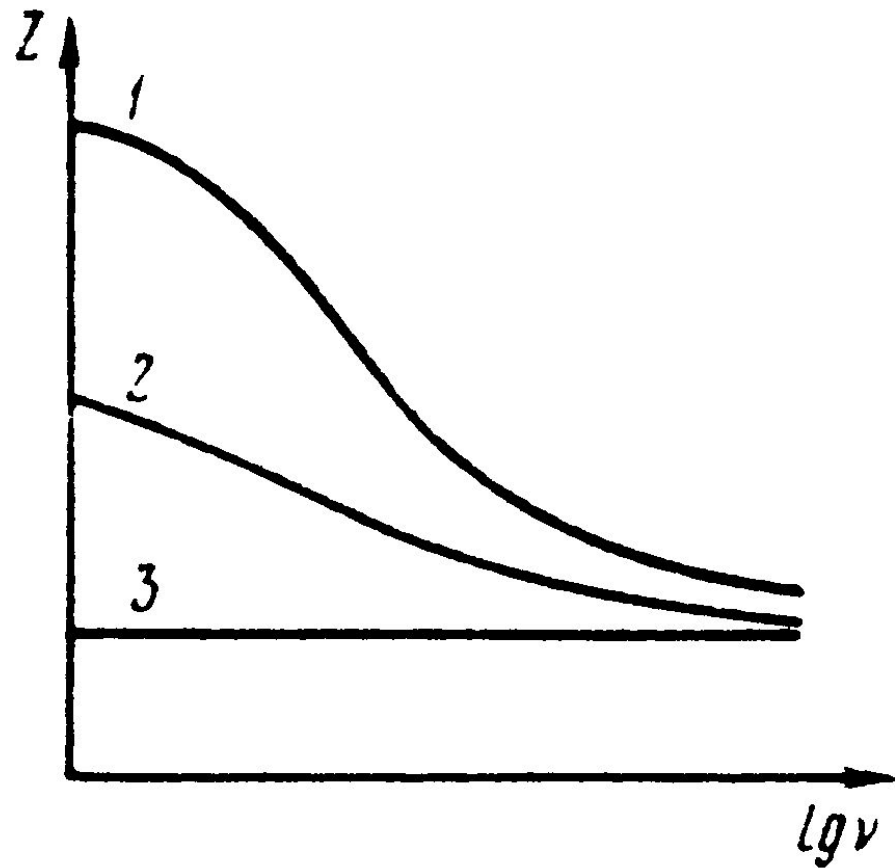


(4.22)

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

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

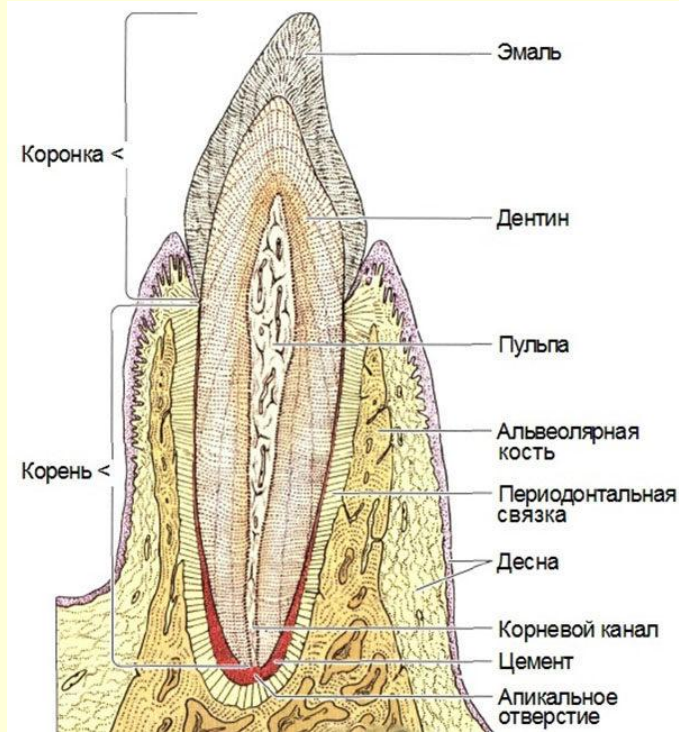
2 – ткань подвергнута кратковременному нагреванию, приводящему к частичному разрушению клеточных структур

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

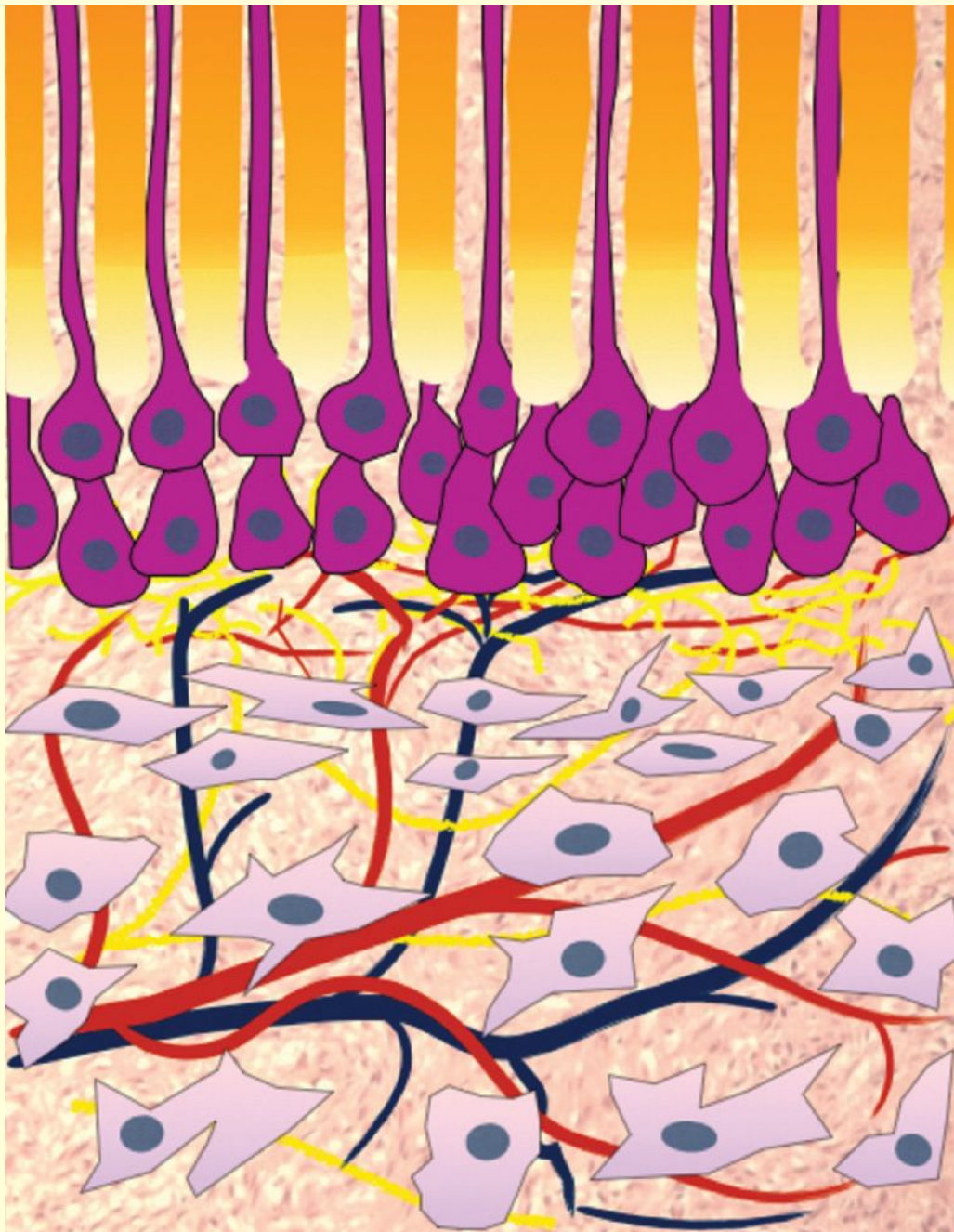
5

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

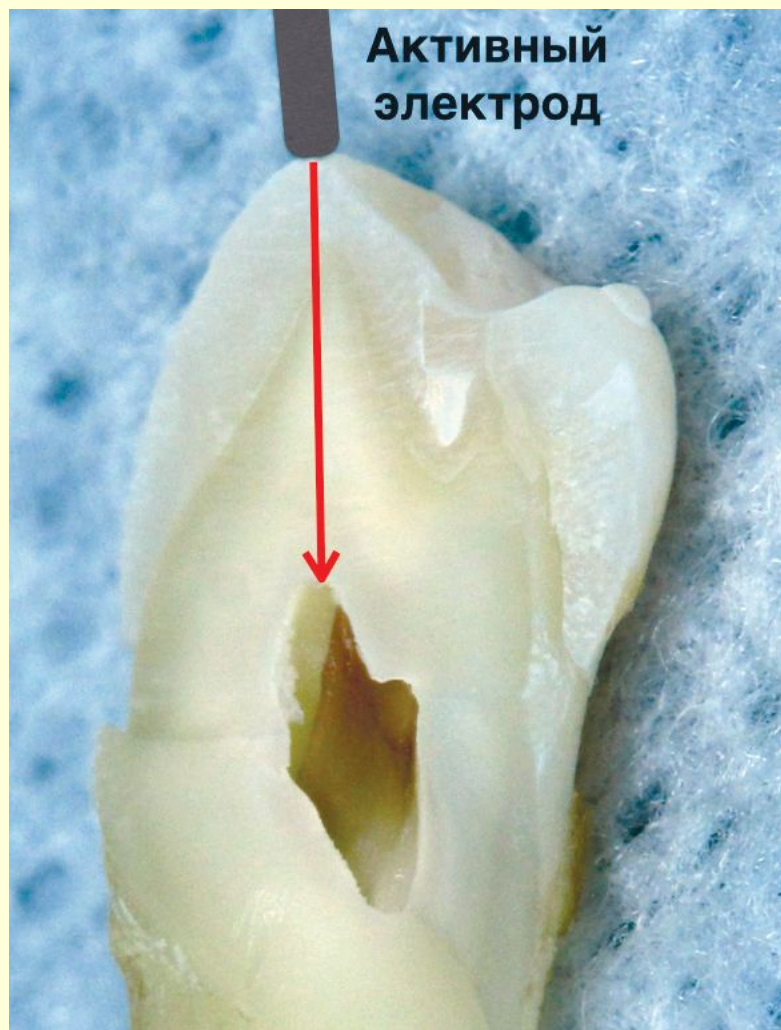
Предентин

Слой одонтобластов

**Субодонтобластическое
нервное сплетение Рашкова**

**Центральный слой
пульпы**

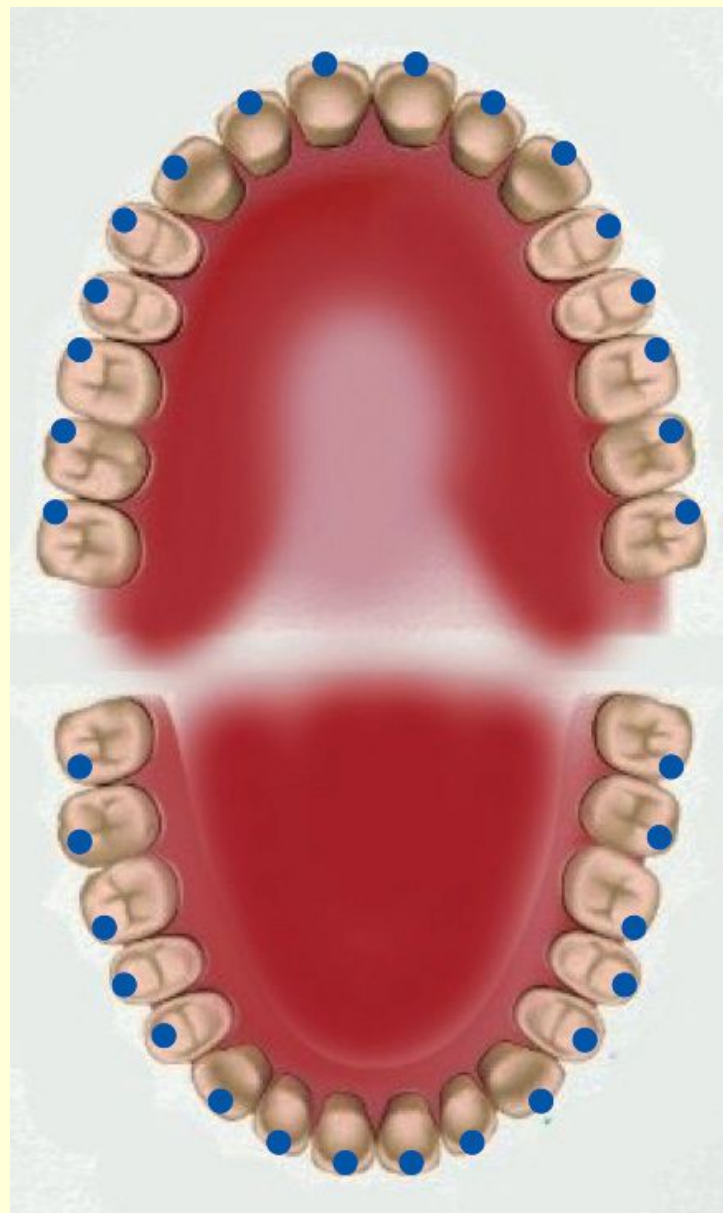
При проведении ЭОД активный электрод должен располагаться на чувствительной точке исследуемого зуба .



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