

БИОПОТЕНЦИАЛЫ.

Введение

**Биопотенциалы, их виды и
применение в медицине**

Потенциал покоя

**Равновесный потенциал. Уравнение
Нернста.**

**Уравнение Гольдмана-Ходжкина-
Катца**

ВВЕДЕНИЕ

- В основе возбуждения клеток, регуляции внутриклеточных процессов, работы нервной, мышечной и сенсорных систем лежит наиболее важное явление в живых клетках и тканях - **генерация и распространение биологических потенциалов**. Нарушение электрических характеристик клеток и тканей приводит к возникновению и развитию различных патологических процессов.

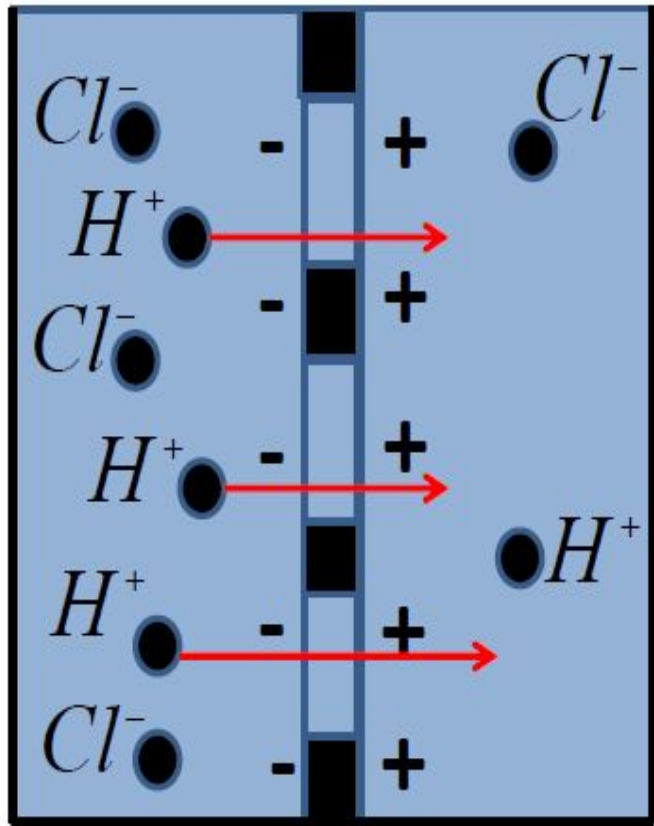
Применение Б.П. в медицине

- В медицине исследование электрических полей, созданных биопотенциалами органов и тканей, лежит в основе различных диагностических методов, например, таких как:
электрокардиография,
электроэнцефалография,
электромиография и другие.

ВИДЫ БИОПОТЕНЦИАЛОВ (Б.П.)

- По своей природе Б.П. подразделяют на *диффузионные, фазовые и мембранные*.
- **Диффузионные** – потенциалы, возникающие на границе раздела двух жидких сред в результате наличия градиента концентраций веществ и различной подвижности ионов (катионов и анионов). Их величину можно найти из уравнения Гендерсона:

Диффузионный потенциал



$$C_{1HCl} > C_{2HCl}$$

$$\Delta\varphi_{\text{диф.}} = \frac{u_k - u_a}{u_k + u_a} \frac{RT}{nF} \ln \frac{a_1}{a_2}$$

u_k - подвижность катионов

u_a - подвижность анионов

R - универсальная газовая постоянная

T - абсолютная температура

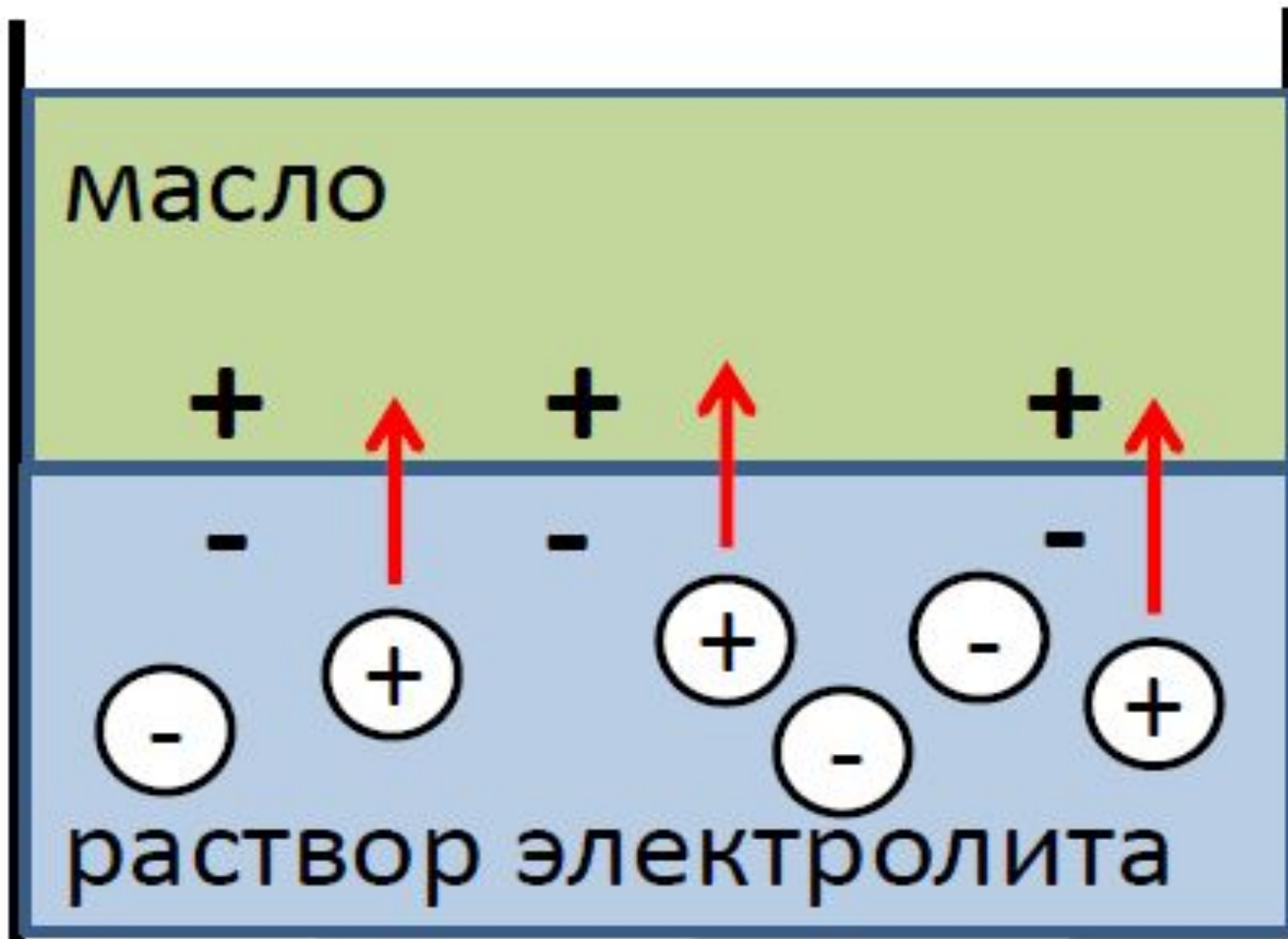
n - валентность ионов

F - постоянная Фарадея

a_1 - активная концентрация в области откуда идет диффузия

a_2 - активная концентрация в области куда идет диффузия

Фазовый потенциал



Фазовые потенциалы (Ф.П.)

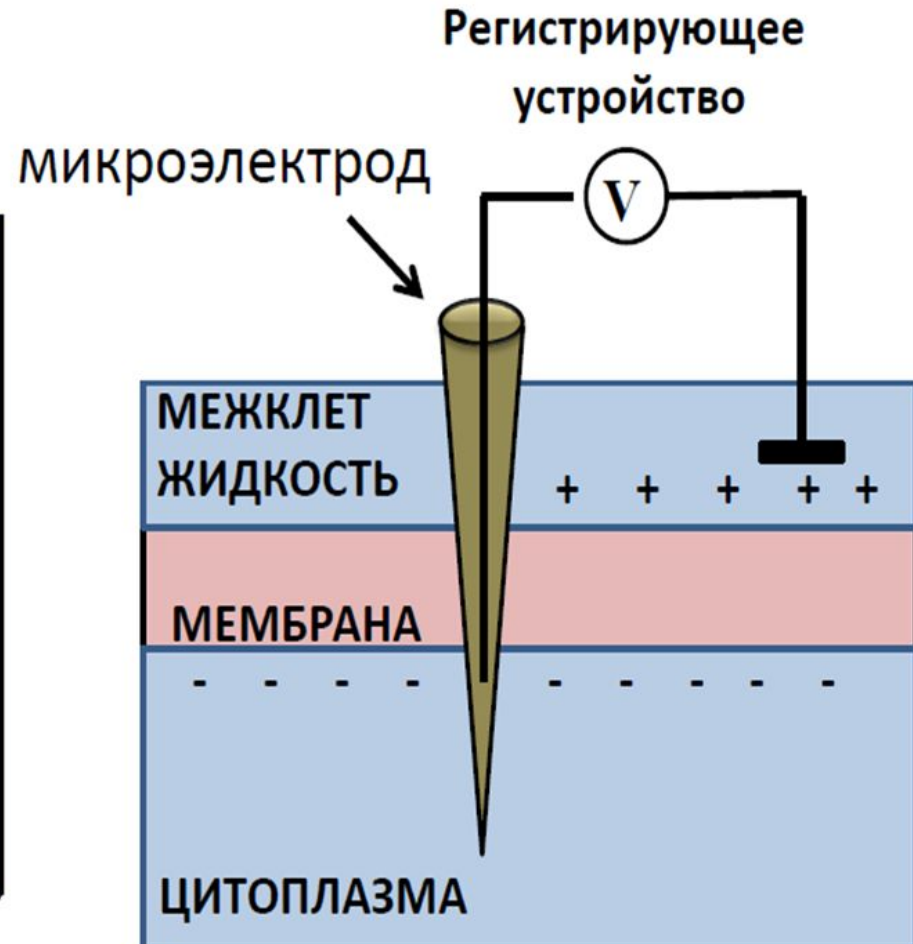
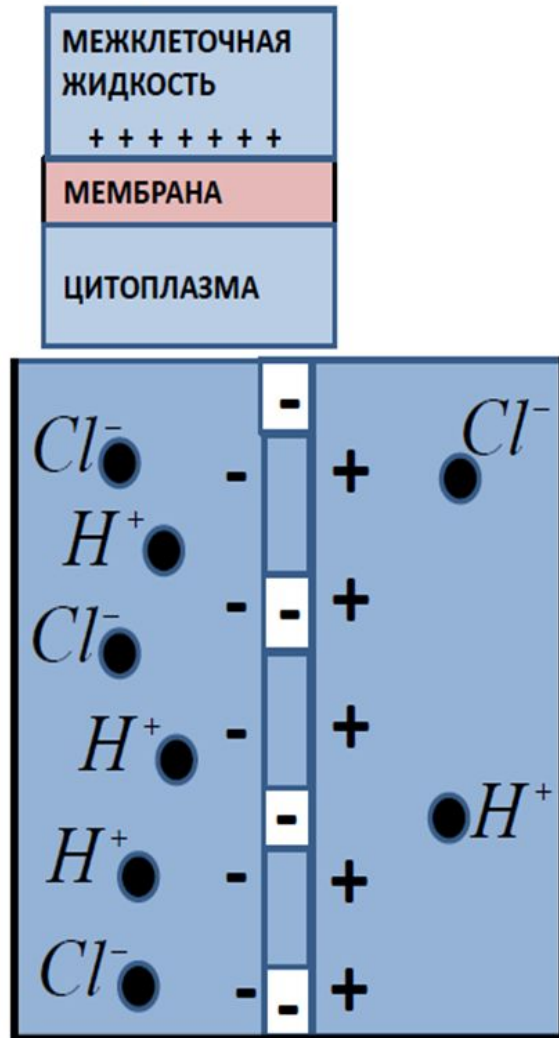
- **Фазовыми называют** потенциалы, возникающие на границе раздела двух не смешивающихся фаз в результате наличия градиента концентраций веществ и различной скорости проникновения ионов (катионов и анионов) в неводную фазу. Их величину можно найти из уравнения Гендерсона.

Мембранные потенциалы (М.П.)

- **Мембранными** называют потенциалы, возникающие на границе раздела двух жидких сред в результате наличия мембран, обладающих избирательной проницаемостью и градиента концентраций веществ внутри и снаружи мембран. Их величину можно найти из уравнения Нернста.

Мембранный потенциал

$$\Delta\varphi_m = \varphi_{вн} - \varphi_{нар}$$



Уравнение Нернста

$$\Delta\varphi_M = -\frac{RT}{zF} \ln \frac{c_i}{c_o}$$

$\Delta\varphi_M$ - равновесный мембранный потенциал

R - Универсальная газовая постоянная

T - абсолютная температура

z - заряд иона

F - число Фарадея

c_i - концентрация какого-либо иона внутри клетки

c_o - концентрация какого-либо иона снаружи клетки

Мембранные потенциалы

МЕМБРАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

```
graph TD; A[МЕМБРАННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ] --> B[ПОТЕНЦИАЛ ПОКОЯ]; A --> C[ПОТЕНЦИАЛ ДЕЙСТВИЯ];
```

ПОТЕНЦИАЛ ПОКОЯ

ПОТЕНЦИАЛ ДЕЙСТВИЯ

Потенциал покоя

- **Потенциалом покоя** называют разность потенциалов между внутренней и наружной оболочкой мембран, измеренную в состоянии физиологического покоя клетки:

$$\bullet \phi_{\text{д}} = \phi_{\text{вн}} - \phi_{\text{н}}$$

Факторы, влияющие на величину потенциала покоя:

- Концентрация калия (K^+) внутри клетки в 20 -40 раз больше чем снаружи;
- Концентрация натрия (Na^+) снаружи клетки в 10 -20 раз больше чем внутри;
- Концентрация калия (Cl^-) снаружи клетки в 10 -20 раз больше чем внутри;
- Избирательная проницаемость мембраны.

Отношение проницаемости мембраны для ионов (K^+ , Na^+ и Cl^-) равно:

$$\bullet P_{K^+} : P_{Na^+} : P_{Cl^-} = 1 : 0,04 : 0,45$$

Химический потенциал (μ)

- Возможности любой системы, в данном случае клетки определяет ее внутренняя энергия (U), которая может быть представлена в виде суммы «свободной» (A) и «связанной» (Q) энергий: $U = Q + A$
- Часть свободной энергии, приходящаяся на 1 моль любого химического элемента при постоянном давлении, температуре и массе других веществ называется химическим потенциалом

Химический потенциал (μ)

- Для веществ, находящихся в растворе химический потенциал можно найти по формуле:
- $\mu = \mu_0 + R \cdot T \cdot \ln C$
- где μ_0 – стандартный химический потенциал при концентрации 1 моль на литр

Электрохимический потенциал

$$\bar{\mu} = \mu_0 + R \cdot T \cdot \ln C + Z \cdot F \cdot \varphi;$$

Электрохимический потенциал

- где Z – валентность химического элемента;
- T – абсолютная температура;
- $R=8,31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная;
- $F=96500$ Кл/моль – постоянная Фарадея;
- ϕ - потенциал электрического поля

Уравнение Нернста для П.П.

$$R \cdot T \cdot \ln [K^+] + Z \cdot F \cdot \phi_{\text{вн}} = R \cdot T \cdot \ln [K^+] + Z \cdot F \cdot \phi_{\text{н}}$$

$$\phi_{\text{п}} = \phi_{\text{вн}} - \phi_{\text{н}} = (R \cdot T / Z \cdot F) \cdot \ln ([K^+]_{\text{н}} / [K^+]_{\text{вн}})$$

Рассмотрим вклад в величину потенциала покоя ионов калия, натрия и хлора

Вклад в П.П. ионов калия:

$$\varphi_{m, K^+}^D = -\frac{RT}{F} \ln \frac{[K^+]_{вн}}{[K^+]_{нар}} < 0$$

Вклад в П.П. ионов натрия:

$$\varphi_{\text{м,Na}^+}^{\text{р}} = -\frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{Na}^+]_{\text{вн}}}{[\text{Na}^+]_{\text{нар}}} > 0.$$

Вклад в П.П. ионов хлора

$$\varphi_{\text{м, Cl}^-}^{\text{р}} = -\frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{Cl}^-]_{\text{вн}}}{[\text{Cl}^-]_{\text{нар}}} < 0$$

Уравнение Гольдмана-Ходжкина-Катца

- В стационарном случае, когда, возникая на мембране, разность потенциалов - мембранный потенциал - тормозит дальнейший перенос ионов через мембрану, суммарный поток различных ионов становится равным нулю:

$$\bullet J_{K^+} + J_{Na^+} + J_{Cl^-} = 0$$

Уравнение Гольдмана-Ходжкина-Катца

$$\Delta\varphi = -\frac{RT}{F} \ln \frac{P_{K^+} [K^+]_i + P_{Na^+} [Na^+]_i + P_{Cl^-} [Cl^-]_o}{P_{K^+} [K^+]_o + P_{Na^+} [Na^+]_o + P_{Cl^-} [Cl^-]_i}$$

$\Delta\varphi$ - потенциал покоя

P - проницаемость мембраны

$[]_i$ - концентрация ионов в клетке

$[]_o$ - концентрация ионов в окружающей среде

Уравнение Нернста для П.П.

$$\varphi_{\text{М}}^{\text{П}} = -\frac{RT}{F} \ln \frac{[\text{K}^+]_{\text{вн}}}{[\text{K}^+]_{\text{нар}}}$$

Величина П.П. при 27° С

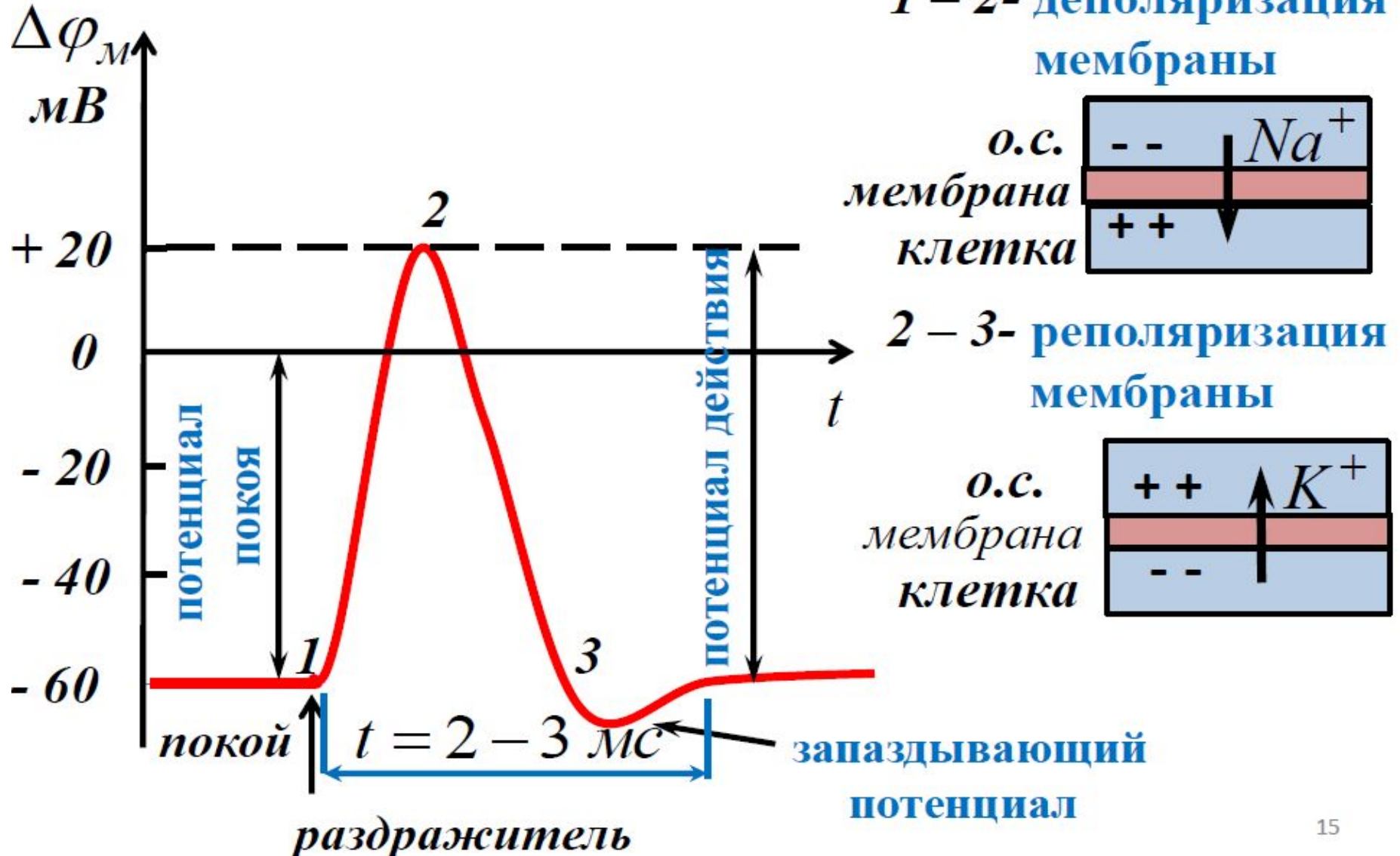
- Если подставить в уравнение Нернста значения постоянных, приведенную температуру и отношение концентраций для калия, то получим величину потенциала покоя равную

• – 60 мВ

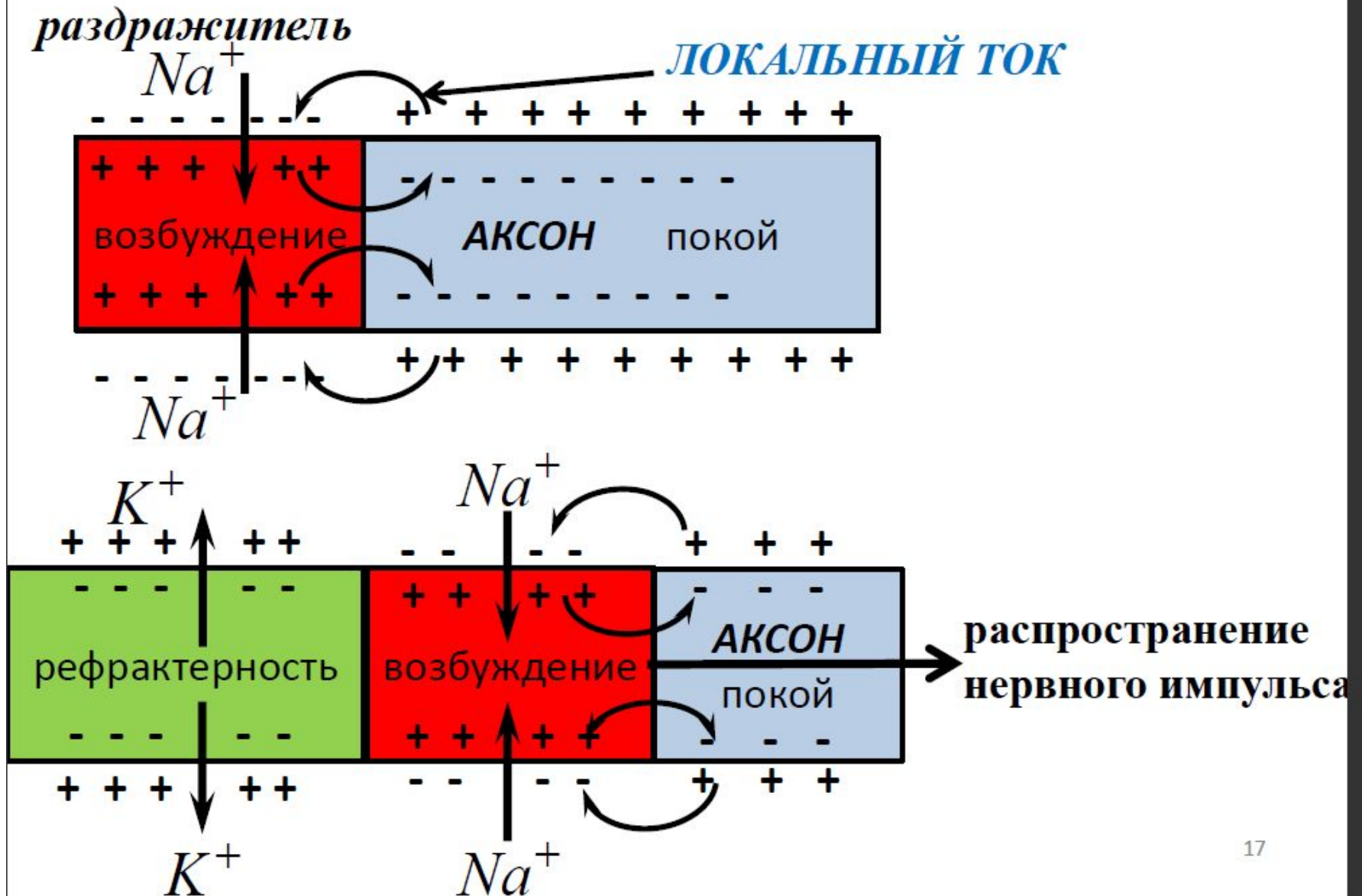
Потенциал действия

- **Потенциалом действия называют кратковременное изменение мембранного потенциала под действием пороговых и сверхпороговых раздражителей**

Потенциал действия



Потенциал действия



Распространение «П.Д.» по нервным волокнам

- Распространение «П.Д.» зависит от вида нервных волокон. В случае, когда волокна не имеют миелиновой оболочки (безмякотные), распространение «П.Д.» происходит вдоль всей поверхности нервного волокна за счет локальных токов, возникающих между возбужденными и невозбужденными участками. Этот процесс происходит с затуханием.

Распространение «П.Д.» по безмякотным волокнам

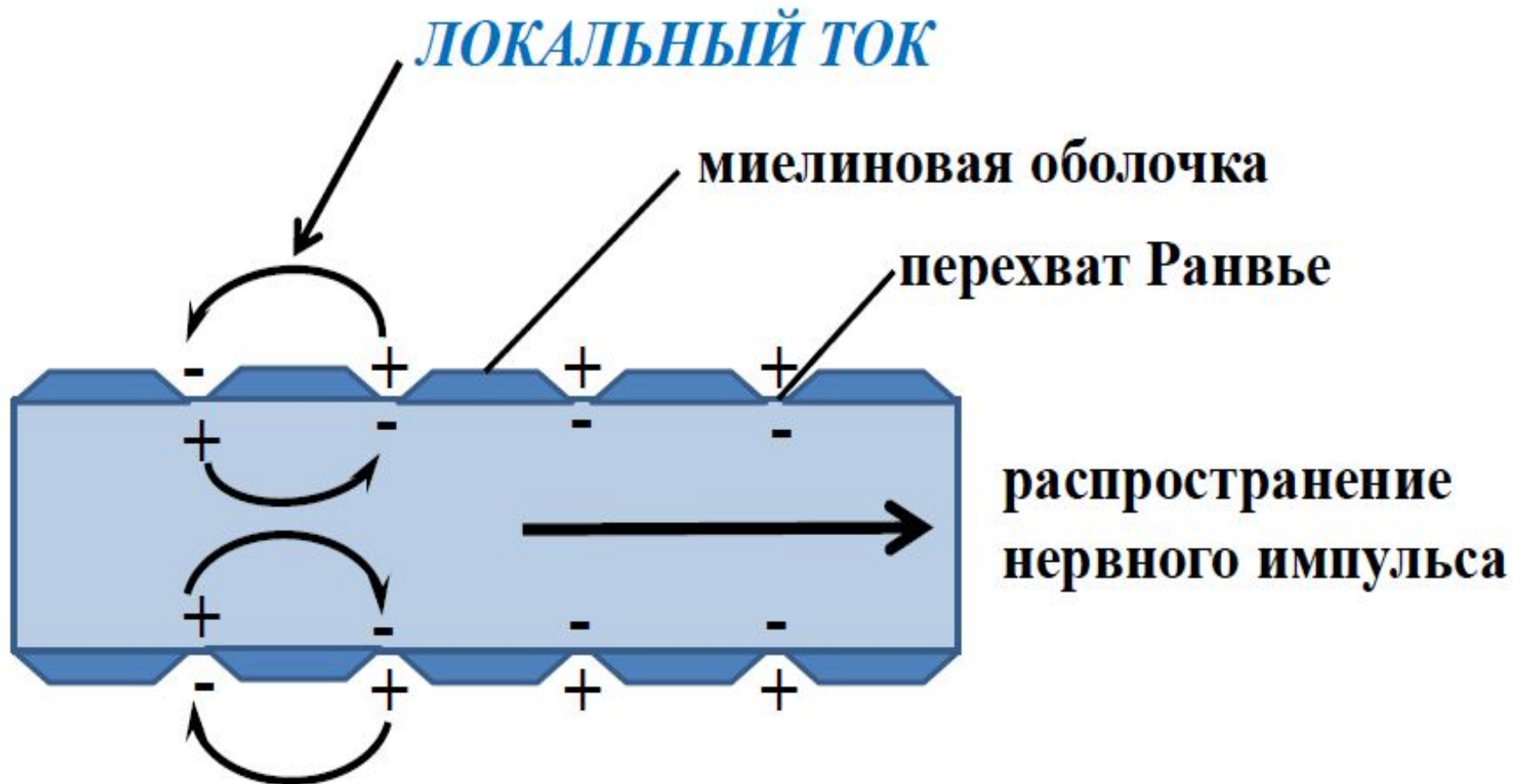
- $U = U_0 \cdot e^{-x/\lambda}$

- Распространение происходит
с затуханием!

Распространение «П.Д.» по МЯКОТНЫМ ВОЛОКНАМ

- Распространение «П.Д.» по
МЯКОТНЫМ ВОЛОКНАМ
происходит без затухания,
сальтаторно (скачкообразно)
от одного перехвата Ранвье к
другому.

Распространение «П.Д.» по МЯКОТНЫМ ВОЛОКНАМ



Примеры задач на уравнение Нернста:

- Изменится ли величина потенциала покоя, если при прочих равных условиях температура повысится от 36°C до 40°C ?
- $\phi_2 / \phi_1 = T_2 / T_1 = (273 + 40) / (273 + 36) = 1,01$

ГЕНЕЗ ЭЛЕКТРОГРАММ

- 1. Биофизические принципы исследования электрических полей в организме. Понятие о токовом диполе
- 2. Дипольный эквивалентный генератор сердца
- 3. Генез электрокардиограммы. Особенности проведения возбуждения по миокарду
- 4. Теория отведений Эйнтховена
- 5. Векторэлектрокардиография
- 6. Анализ ЭКГ

Биофизические принципы исследования электрических полей в организме.

- При функционировании органов и тканей, как и отдельных клеток, сопровождающемся электрической активностью, в организме создается электрическое поле. Так как организм является проводником, то два электрода, приложенные к разным участкам тела, регистрируют разность потенциалов.
- Зависимость от времени разности потенциалов, возникающей при функционировании какого-либо органа или ткани, называется **электрограммой**.

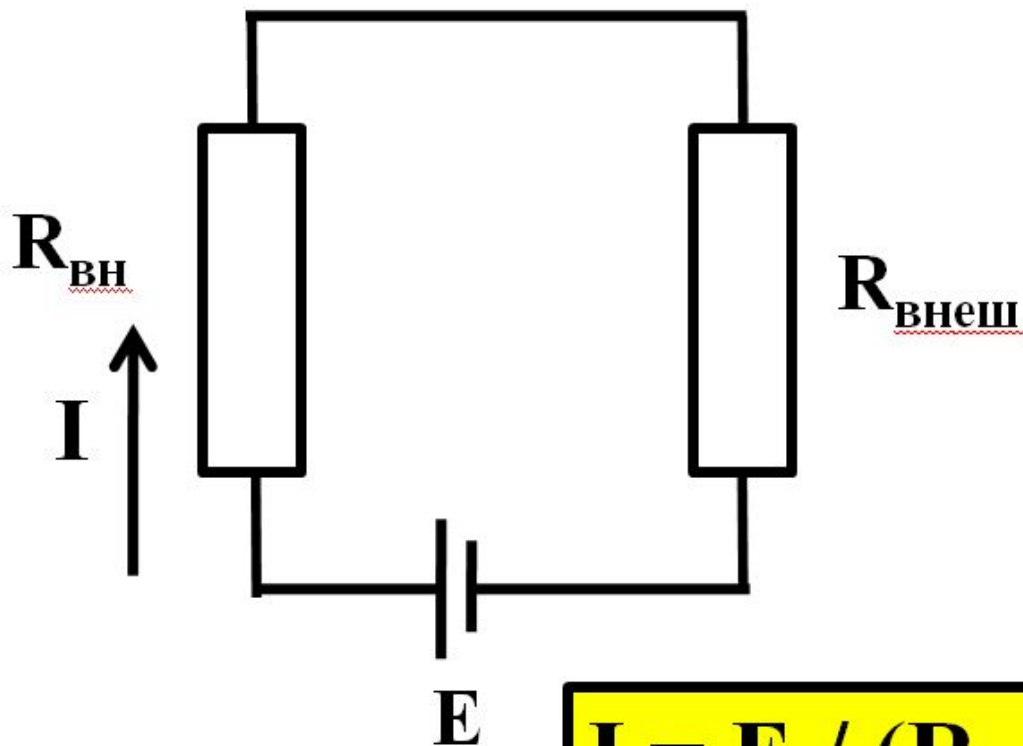
Основные задачи изучения электрограмм:

- Можно сформулировать две основные задачи изучения электрограмм:
- **первая (прямая)** заключается в выяснении механизма возникновения электрограмм, или расчет потенциала в области измерения по заданным характеристикам электрической модели органа;
- **вторая (обратная, или диагностическая)** - в выявлении состояния организма по характеру его электрограмм.

Эквивалентный электрический генератор

- При изучении механизма возникновения электрограмм ткани и органы как источники электрического поля представляют в виде эквивалентного электрического генератора, который можно охарактеризовать электродвижущей силой E и внутренним сопротивлением $R_{вн}$. Так как организм является проводящей средой, то это вызывает появление электрического тока, величину которого можно найти из закона Ома для полной цепи.

Эквивалентный электрический генератор



$$I = E / (R_{\text{вн}} + R_{\text{внеш}})$$

Понятие о токовом диполе.

- Особенностью эквивалентного генератора является то, что его внутреннее сопротивление во много раз больше сопротивления, окружающей среды:

$$\bullet R_{\text{вн}} \gg R$$

- Поэтому органы и ткани, электрическую активность которых изучают можно представить в виде токового диполя:

$$\bullet \vec{D} = I \cdot \vec{l}$$

Токовый диполь

- **Направление вектора токового дипольного момента принимается от отрицательного полюса к положительному. Диполи в зависимости от их размера подразделяют на точечные и конечные. Точечным называют диполь, который занимает бесконечно малый объем пространства.**

ДИПОЛЬНЫЙ ЭКВИВАЛЕНТНЫЙ ГЕНЕРАТОР СЕРДЦА.

- Для любой точки В, находящейся на произвольном расстоянии r от положительного полюса, по закону Ома в дифференциальной форме:

- $d\phi_y = - J\rho dr$ (1);

где ϕ_y - потенциал, J - плотность тока; ρ - удельное сопротивление среды, dr – очень малое удаление от полюса .

Дипольный эквивалентный генератор сердца.

Через сферу радиусом r и площадью поверхности $4\pi r^2$ протекает суммарный ток, равный току I , выходящему из полюса. Поэтому $J = I/4\pi r^2$.

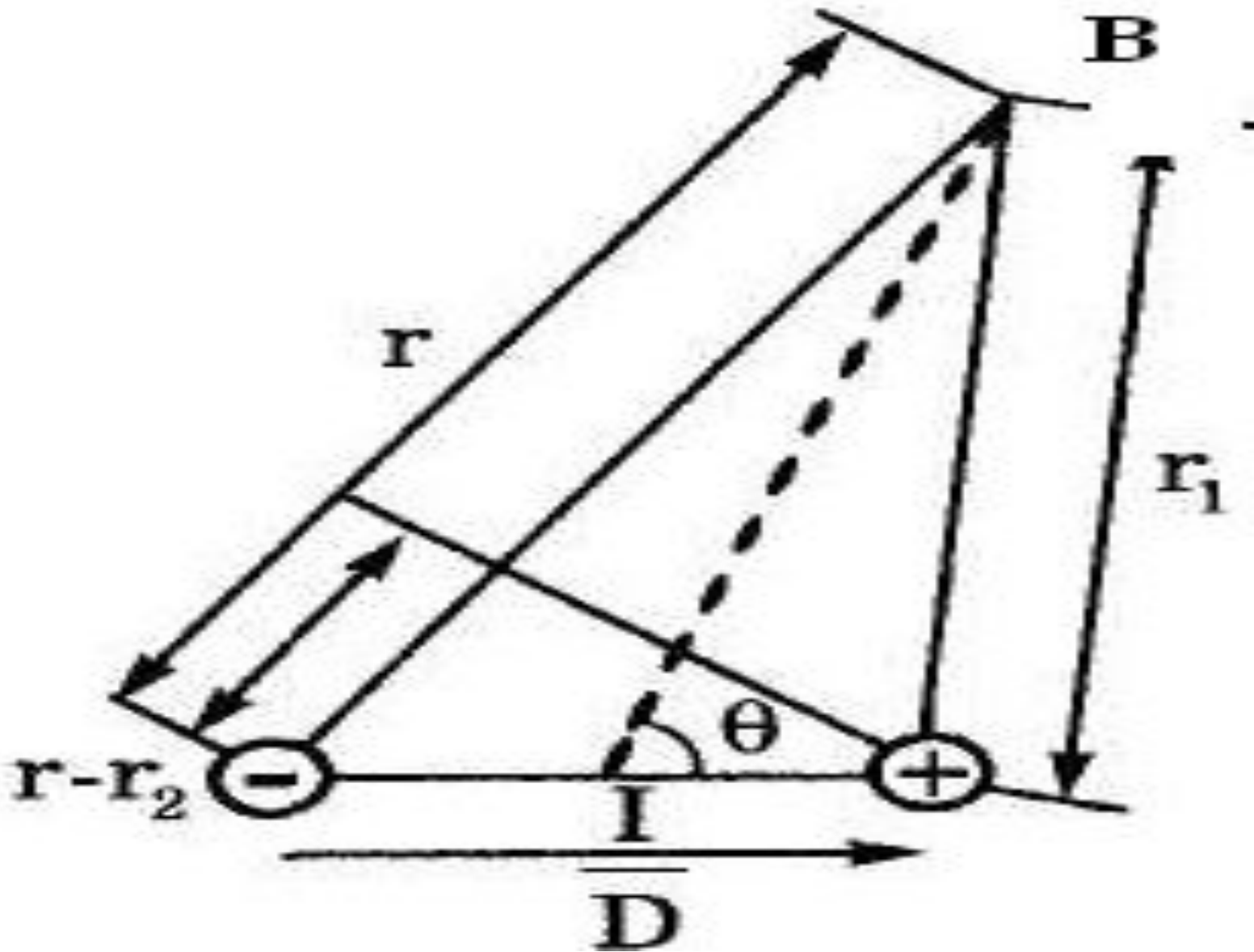
Чтобы найти выражение для ϕ_y , проинтегрируем уравнение (1) в пределах расстояния от r до ∞ и потенциала от ϕ_y до нуля (принимая $\phi_y = 0$ при $r \rightarrow \infty$). В результате получаем:

$$\phi_y = \rho l / 4\pi r.$$

Дипольный эквивалентный генератор сердца.

- Чтобы найти величину потенциала создаваемого сердцем на поверхности тела, вначале найдем потенциал ϕ электрического поля, создаваемого конечным диполем. Поместим конечный диполь отрицательным полюсом в начало координат 0. Потенциал ϕ в точке регистрации В равен сумме потенциалов полюсов: $\phi = \rho I / 4\pi r_1 - \rho I / 4\pi r$ (2),
- где r_1 и r - расстояние между положительным полюсом и точкой В и между отрицательным полюсом и точкой В.

Дипольный эквивалентный генератор сердца.



Дипольный эквивалентный генератор сердца.

- В результате этого получаем:

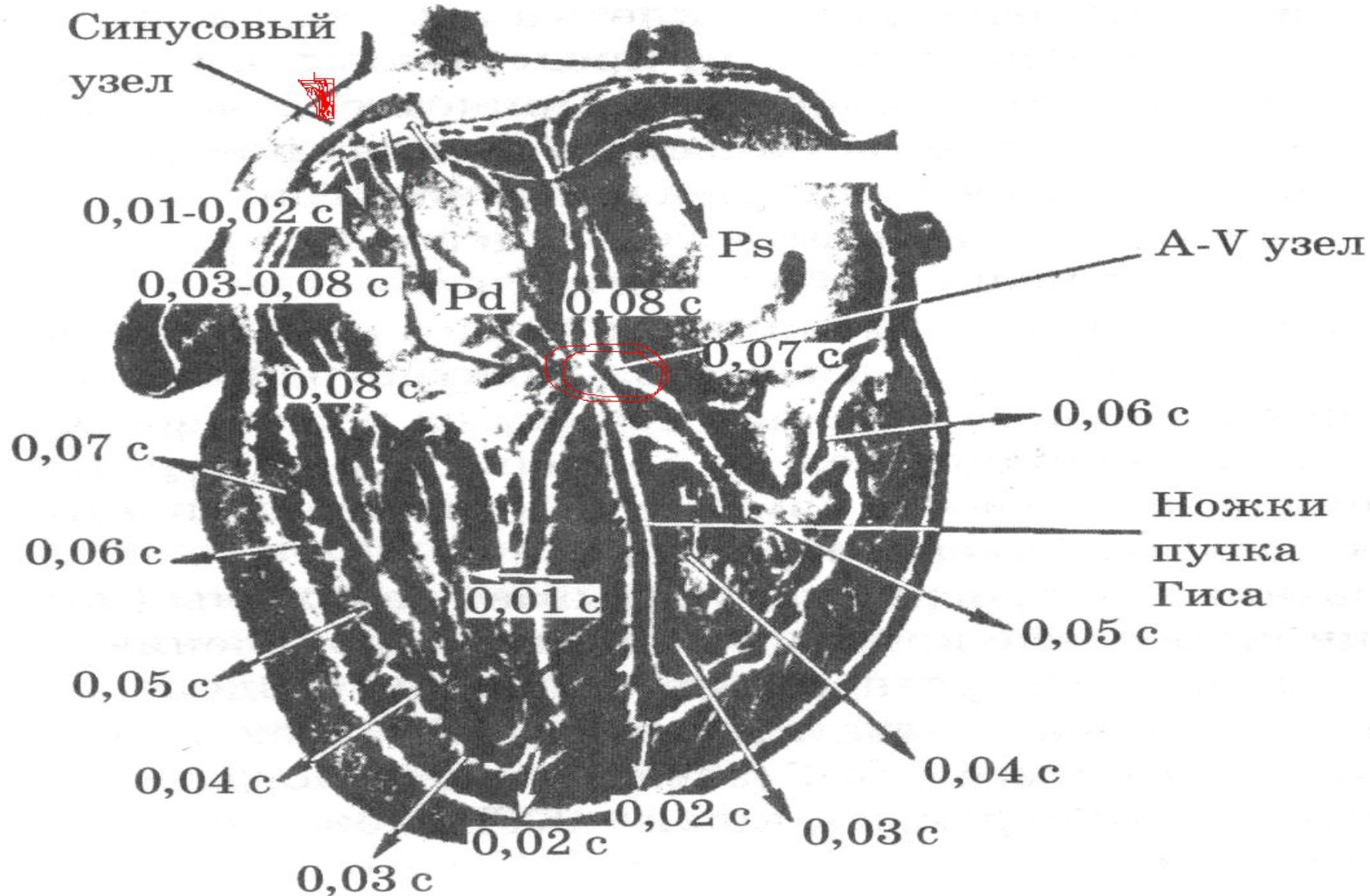
$$\bullet \phi = \rho \cdot I \cdot l \cdot \cos \alpha / 4\pi r^2$$

- Потенциал ϕ электрического поля сердца складывается из дипольных потенциалов элементарных диполей. Поскольку в каждый момент времени кардиоцикла возбуждается сравнительно небольшой участок миокарда, расстояния r от всех диполей до точки измерения потенциала примерно равны друг другу, и ϕ приближенно описывается выражением: $\phi = \rho \cdot \sum D_j \cdot \cos \alpha_j / 4\pi \cdot r^2$.

Дипольный эквивалентный генератор сердца.

- Сумму проекций в этом выражении можно рассматривать как проекцию вектора дипольного момента (\mathbf{D}_0) одного токового диполя, у которого $\mathbf{D}_0 = \sum \mathbf{D}_j$. Этот диполь называют эквивалентным диполем сердца. Таким образом, потенциал внешнего электрического поля сердца можно представить в виде дипольного потенциала одного эквивалентного диполя:
- $\phi = \rho \cdot \mathbf{D}_0 \cdot \cos \alpha / 4\pi \cdot r^2,$
- где α - угол между \mathbf{D}_0 и направлением регистрации потенциала; D_0 - модуль вектора \mathbf{D}_0 .

Особенности проведения возбуждения по миокарду



Особенности проведения возбуждения по миокарду

- Периодическая деятельность сердца осуществляется благодаря наличию проводящей системы. Проводящая система сердца начинается синусовым узлом, расположенным в верхней части правого предсердия. В узле находятся два вида клеток: Р- клетки, генерирующие электрические импульсы для возбуждения сердца и Т- клетки, преимущественно осуществляющие проведение импульсов от синусового узла к предсердиям.

Синусовый узел

- Основной функцией синусового узла является генерация электрических импульсов нормальной периодичности, составляющей **60 - 80 импульсов в минуту**. Синусовый узел обладает наибольшим автоматизмом и его называют водителем ритма первого порядка.

Генез электрокардиограммы

- Возбуждение синусового узла не отражается на обычной ЭКГ. После латентного периода, продолжающегося несколько сотых долей секунды, импульс из синусового узла достигает миокарда предсердий. Возбуждение охватывает сразу всю толщу миокарда предсердий. **На ЭКГ возбуждению предсердий соответствует возникновение P зубца.** Скорость проведения возбуждения по ним составляет 1 м/с.

Генез электрокардиограммы

Из предсердий импульс попадает в атриовентрикулярный узел, расположенный в нижней части правого предсердия справа от межпредсердной перегородки рядом с устьем коронарного синуса. На уровне атриовентрикулярного узла волна возбуждения значительно задерживается до 5 - 20 см/с, что обусловлено его анатомическими особенностями.

Генез электрокардиограммы

- Это создает возможность для окончания возбуждения и сокращения предсердий до того, как начнется возбуждение желудочков. Атриовентрикулярный узел называют автоматическим водителем ритма второго порядка. Водитель ритма второго порядка может вырабатывать 40 - 60 импульсов в минуту.

Генез электрокардиограммы

• От атриовентрикулярного узла отходит пучок Гиса, разделяющийся на правую и левую ножки, которые направляются к мышцам правого и левого желудочков, к которым они передают возбуждение по волокнам Пуркинье. Моменту возбуждения желудочков на ЭКГ соответствует комплекс QRS. Фазе реполяризации желудочков соответствует на ЭКГ возникновение Т – зубца. Ножки пучка Гиса и волокна Пуркинье являются автоматическим водителем ритма третьего порядка, вырабатывают 15 - 40 импульсов в минуту.

Генез электрокардиограммы

- В норме существует только один водитель ритма, дающий импульсы для возбуждения всего сердца - синусовый узел. Автоматические центры второго и третьего порядка проявляют свою автоматическую функцию только в патологических условиях - при понижении автоматизма синусового узла или при повышении их автоматизма.

Генез электрокардиограммы

- Автоматические центры третьего порядка становятся водителями ритма только при одновременном поражении автоматических центров первого и второго порядка или значительном повышении автоматизма центра третьего порядка.

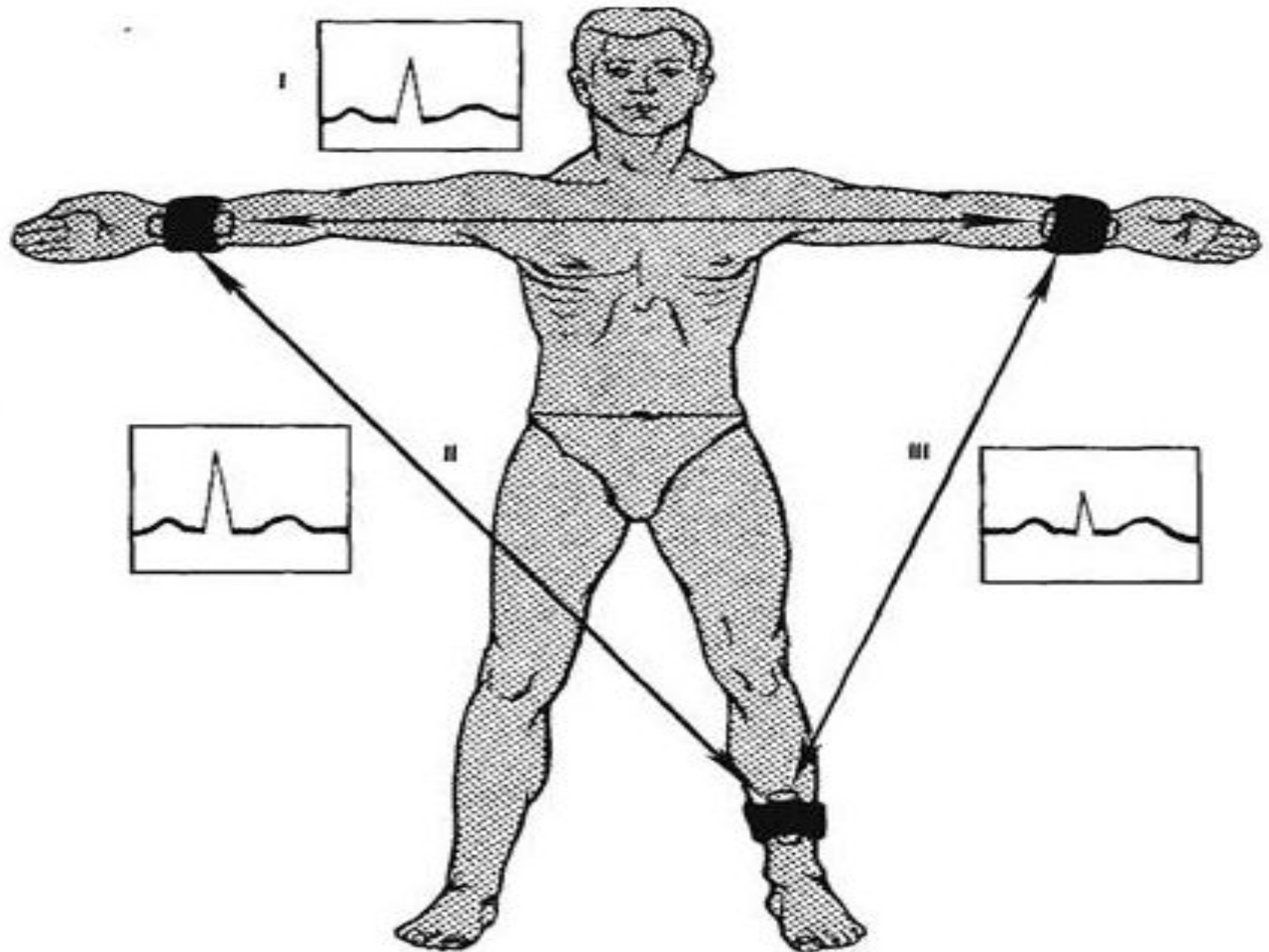
Теория отведений Эйнтховена

- Исследуя изменения разности потенциалов на поверхности человеческого тела, можно судить о проекциях дипольного момента сердца, следовательно, о биопотенциалах сердца. Эта идея положена в основу теории отведений Эйнтховена, голландского ученого, создателя электрокардиографии, нобелевского лауреата 1924 г.
- Основные постулаты этой модели:

Основные постулаты Эйнтховена

- Эйнтховен сформулировал три постулаты, которые и легли в основу созданной им системы отведений:
- Рассматривать генератор сердечной ЭДС как точечный диполь.
- Рассматривать человеческое тело по отношению к этому диполю как однородную проводящую среду.
- **Считать, что точечный диполь расположен в центре равностороннего треугольника, образованного двумя руками и левой ногой.**

Отведения Эйнтховена



Отведения Эйнтховена

- В практике электрокардиографии разности потенциалов измерялись между левой рукой (ЛР) и правой рукой (ПР) - I отведение,
- между левой ногой (ЛН) и правой рукой (ПР) - II отведение,
- между левой ногой (ЛН) и левой рукой (ЛР) - III отведение.
- Руки и ноги рассматривались как проводники, отводящие потенциалы от вершин треугольника Эйнтховена.

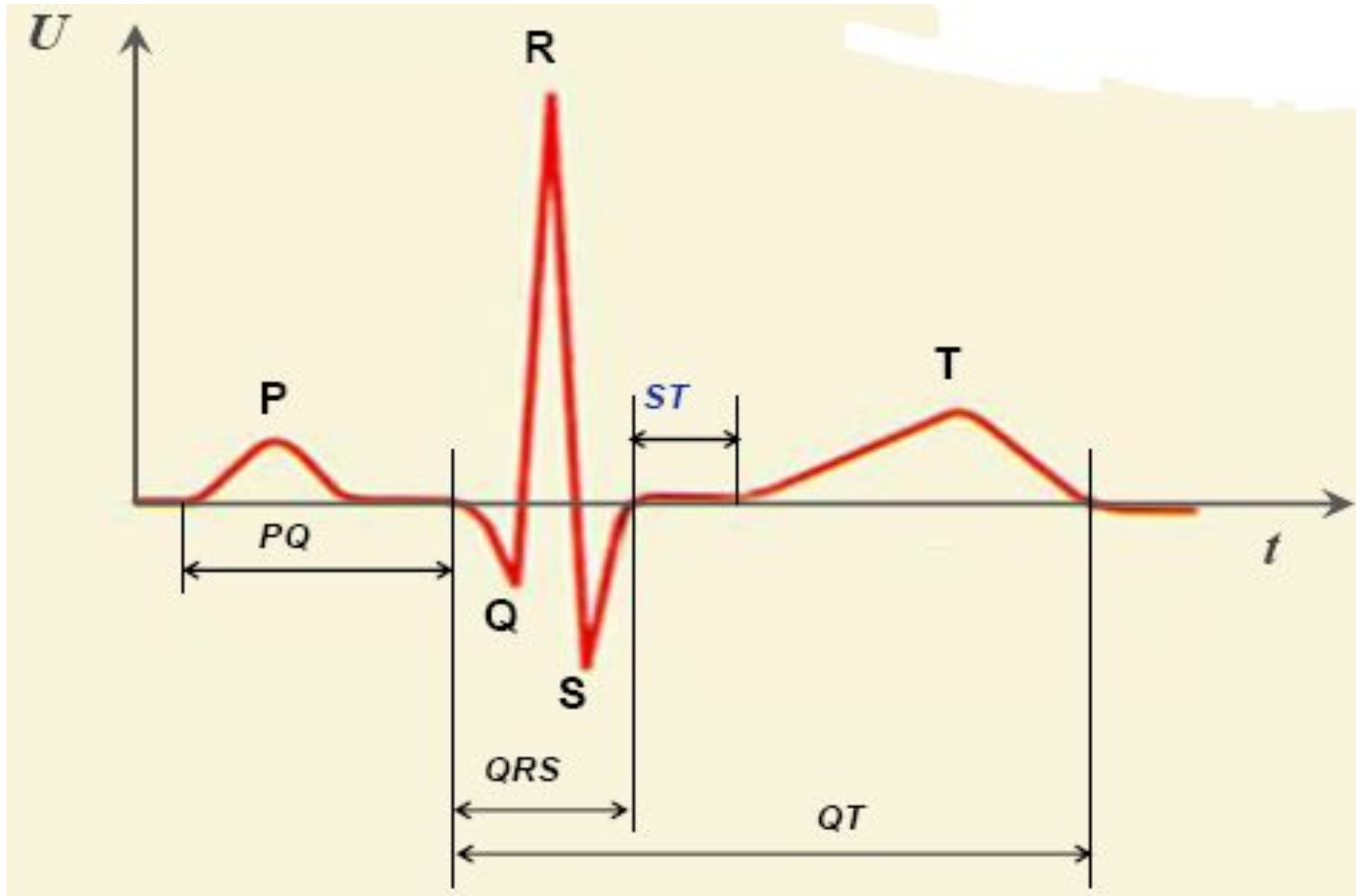
Международная маркировка проводников

- Для записи стандартных отведений электроды накладывают на правой руке (**красная маркировка**), левой руке (**желтая маркировка**) и на левой ноге (**зеленая маркировка**). Эти электроды попарно подключаются к электрокардиографу для регистрации каждого из трех стандартных отведений. Четвертый электрод устанавливается на правую ногу для подключения заземляющего провода (**черная маркировка**).

Векторэлектрокардиограмма

- Электрический вектор сердца за один сердечный цикл описывает сложную пространственную кривую. Метод электрокардиографии состоит в регистрации электрического вектора сердца на протяжении кардиоцикла. **Траектория перемещения конца электрического вектора сердца в трехмерном пространстве в течение кардиоцикла называется векторэлектрокардиограммой.**

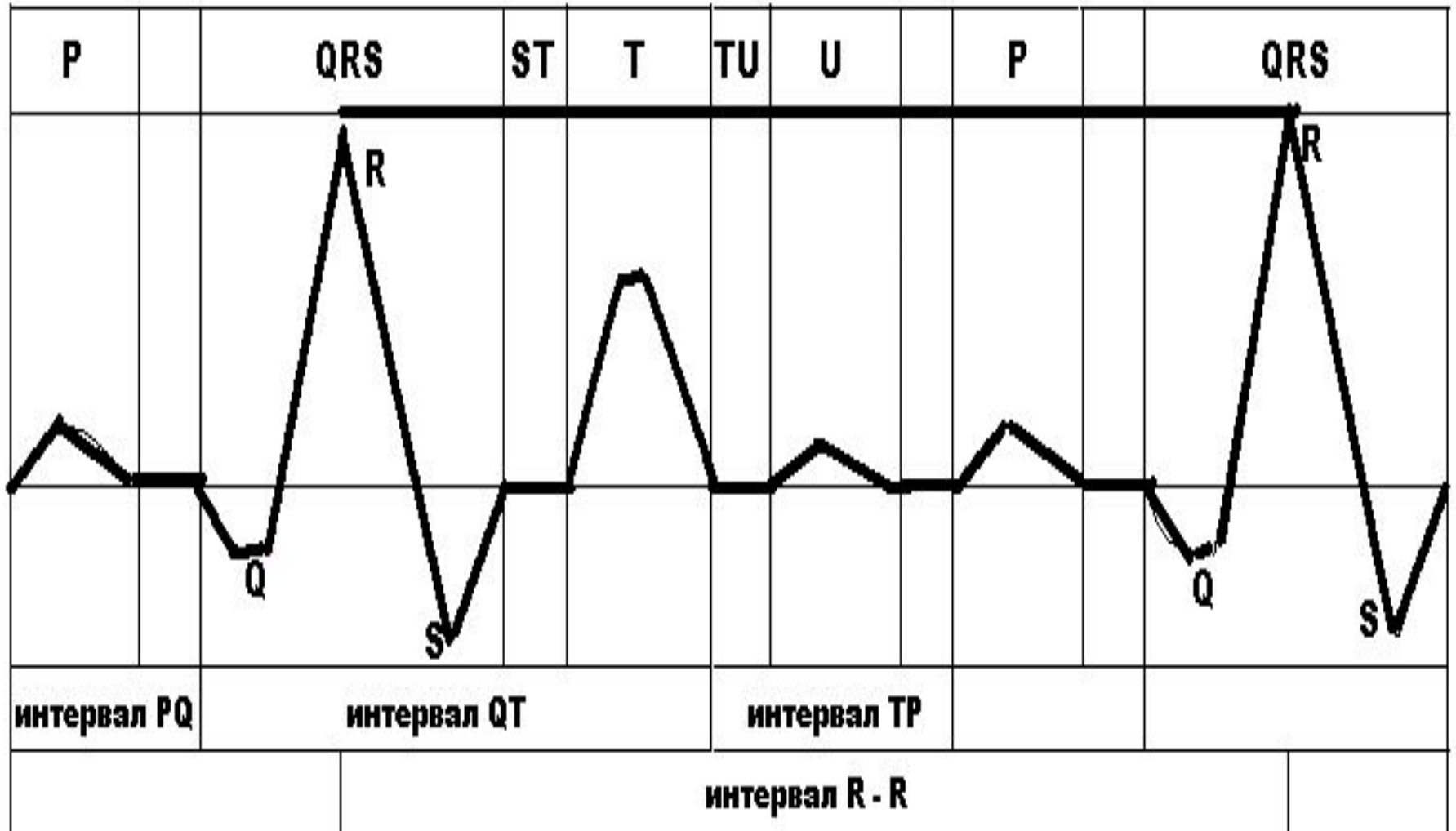
Анализ ЭКГ



Анализ ЭКГ

- Ритм считается регулярным или правильным в том случае, если разброс величин измеренных интервалов R-R не превышает $\pm 10\%$, от средней продолжительности интервалов R-R. В противном случае считается, что ритм нарушен, иными словами наблюдается аритмия.
- Подсчет ЧСС производится с помощью различных методик, выбор которых зависит от регулярности ритма сердца. При правильном ритме ЧСС определяют по формуле: $ЧСС = 60 / T_{R-R}$, где 60 - число секунд в минуте, T_{R-R} - длительность интервала, выраженная в секундах.

Анализ ЭКГ



Анализ ЭКГ

- ЧСС = $60/T$

- $T = S_{R-R} / v$

- $ЧСС = 60/T = 60 \cdot v / S_{R-R}$

- Где T – период сердечных сокращений;

- S_{R-R} – расстояние в мм между двумя ближайшими R-зубцами ;

- V – скорость записи в мм/с

Задача

- Найти ЧСС, если при скорости записи 25 мм/с, расстояние между R-зубцами было равно 40 мм.

• Решение.

$$\bullet \text{ ЧСС} = 60/T = 60 \cdot v / S_{R-R} \text{ Т.о.:}$$

$$\text{ЧСС} = 60 \cdot 25 \text{ мм/с} / 40 \text{ мм} = 37,5 \text{ уд/мин}$$

- Ответ: ЧСС = 37,5 уд/мин

СПАСИБО

ЗА

ВНИМАНИЕ!