



Рязанский государственный
медицинский университет
имени академика И.П. Павлова
Кафедра математики, физики и медицинской информатики



Диполь. Электрическое поле диполя. Понятие об ЭКГ, теория отведений Эйнтховена для электрокардиографии. Электропроводимость биологических тканей и жидкостей для постоянного тока. Первичные процессы в тканях при гальванизации и лечебном электрофорезе. Физические процессы, происходящие в тканях организма под действием высокочастотных токов, электрических и магнитных полей.

профессор Ельцов
Анатолий Викторович

Диполь

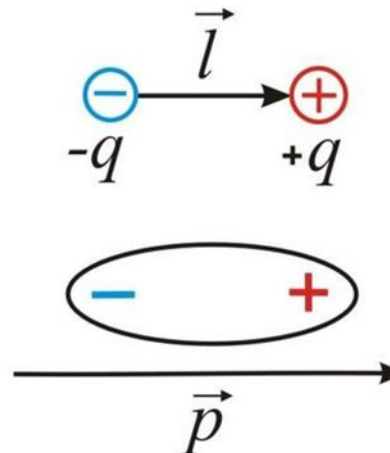
Электрическим диполем называют систему, состоящую из двух равных по величине, но противоположных по знаку точечных электрических зарядов q , расположенных на некотором расстоянии l друг от друга. Основной характеристикой диполя является его электрический момент — вектор $\vec{P}$, равный произведению заряда q на плечо диполя $\vec{l}$, направленный от отрицательного заряда к положительному: $\vec{P} = q\vec{l}$,

Электрический дипольный
момент:

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

$$[Кл \cdot м]$$

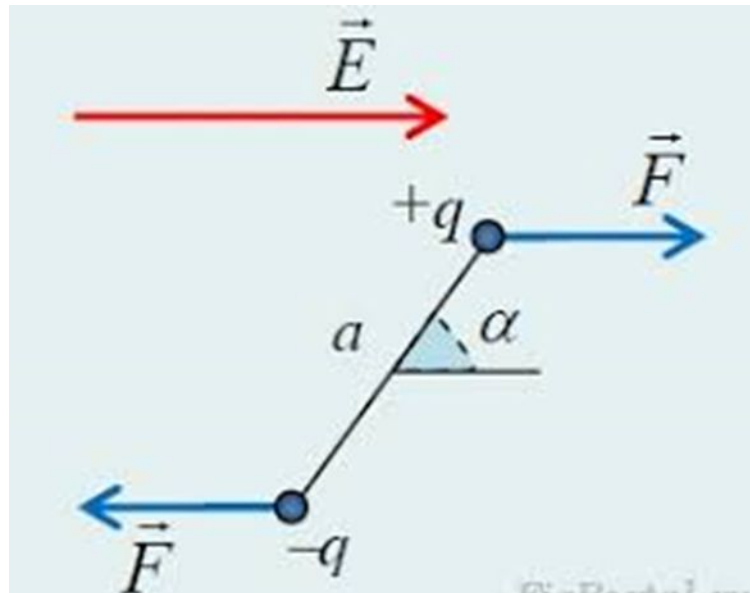
l — плечо диполя



Диполь в однородном поле

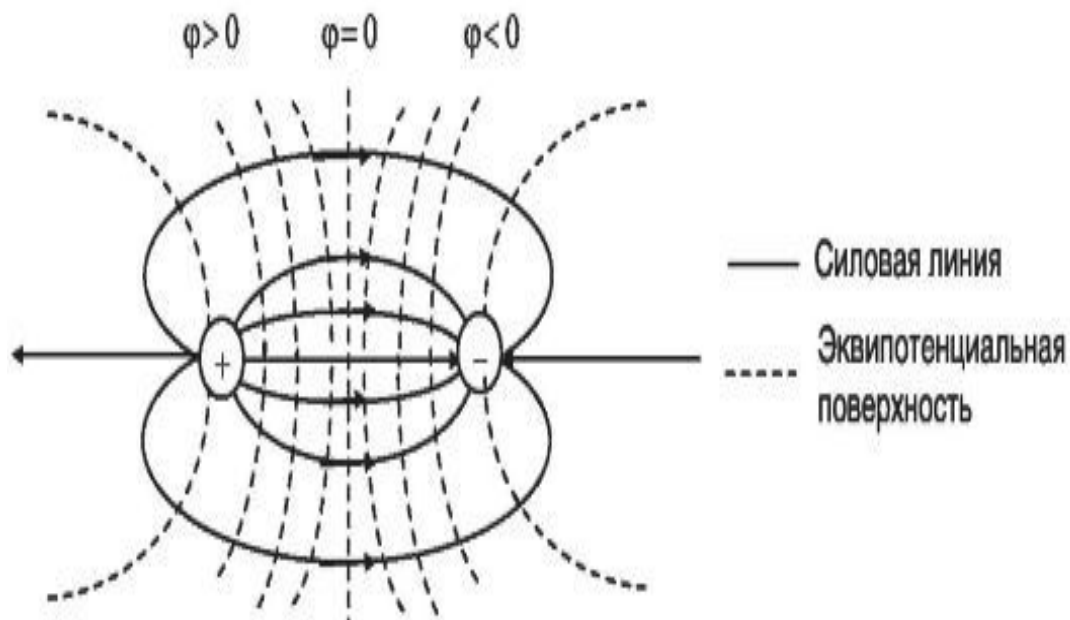
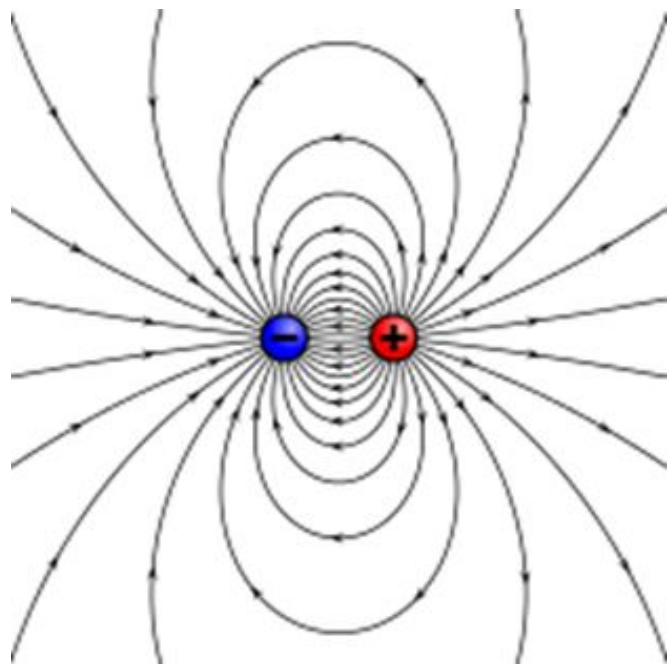
Поместим диполь в однородное электрическое поле напряженностью $\vec{E}$.

На каждый из зарядов диполя действуют силы $\vec{F} = q\vec{E}$ и $\vec{F} = -q\vec{E}$, эти силы равны по модулю, противоположно направлены и создают вращающий момент $M = qEl\sin\alpha/2 + qEl\sin\alpha/2 = qEl\sin\alpha$ или в векторной форме $\vec{M} = \vec{p}\vec{E}$



Электрическое поле диполя

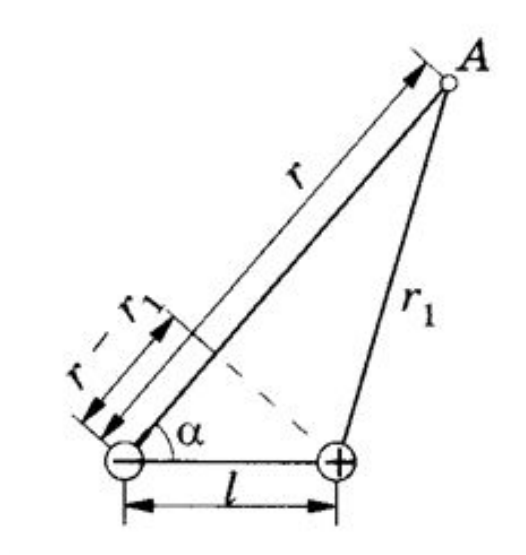
Диполь, как система зарядов, создает вокруг себя электрическое поле, которое характеризуется вектором напряженности $\vec{E}$ и потенциалом φ .



Электрическое поле диполя

Найдем уравнение для электрического потенциала, созданного диполем в точке А, удаленной от зарядов соответственно на расстоянии r и r_1 . Потенциал точечного заряда определяется формулой:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{q}{r}$$
$$\varphi_A = \varphi_- + \varphi_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left(\frac{r - r_1}{r \cdot r_1} \right).$$



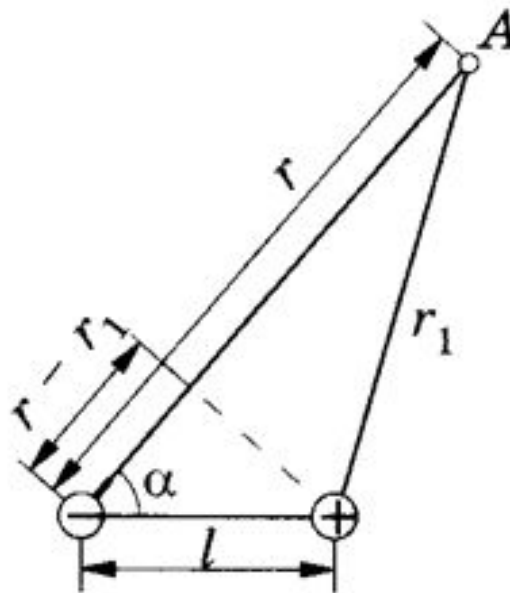
Электрическое поле диполя

$$\varphi_A = \varphi_- + \varphi_+ = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r} \right) = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \left(\frac{r - r_1}{r \cdot r_1} \right).$$

При условии, что $l \ll r$ и $l \ll r_1$, тогда $r \approx r_1$, а их произведение $r \cdot r_1 \approx r^2$. Из рисунка видно, что $r - r_1 \approx l \cdot \cos \alpha$, где α – угол между вектором P и направлением на точку A . При этих условиях получаем:

$$\varphi_A = \frac{q \cdot l \cdot \cos \alpha}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$$

$$\varphi_A = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \cdot \cos \alpha$$



Электрическое поле диполя

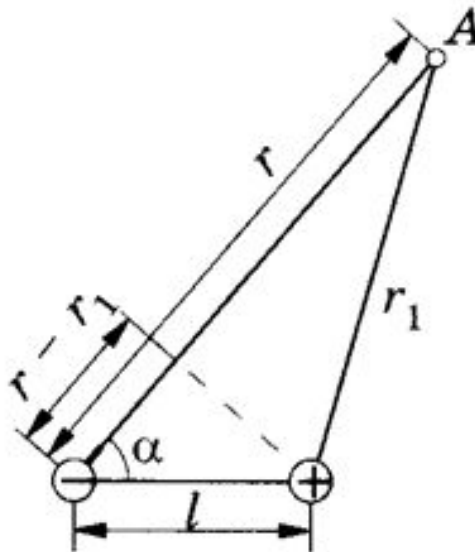
Аналогично можно записать потенциал и для точки B равноотстоящей от диполя:

$$\varphi_B = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \cdot \cos \beta$$

Разность потенциалов для двух точек поля A и B запишется в виде:

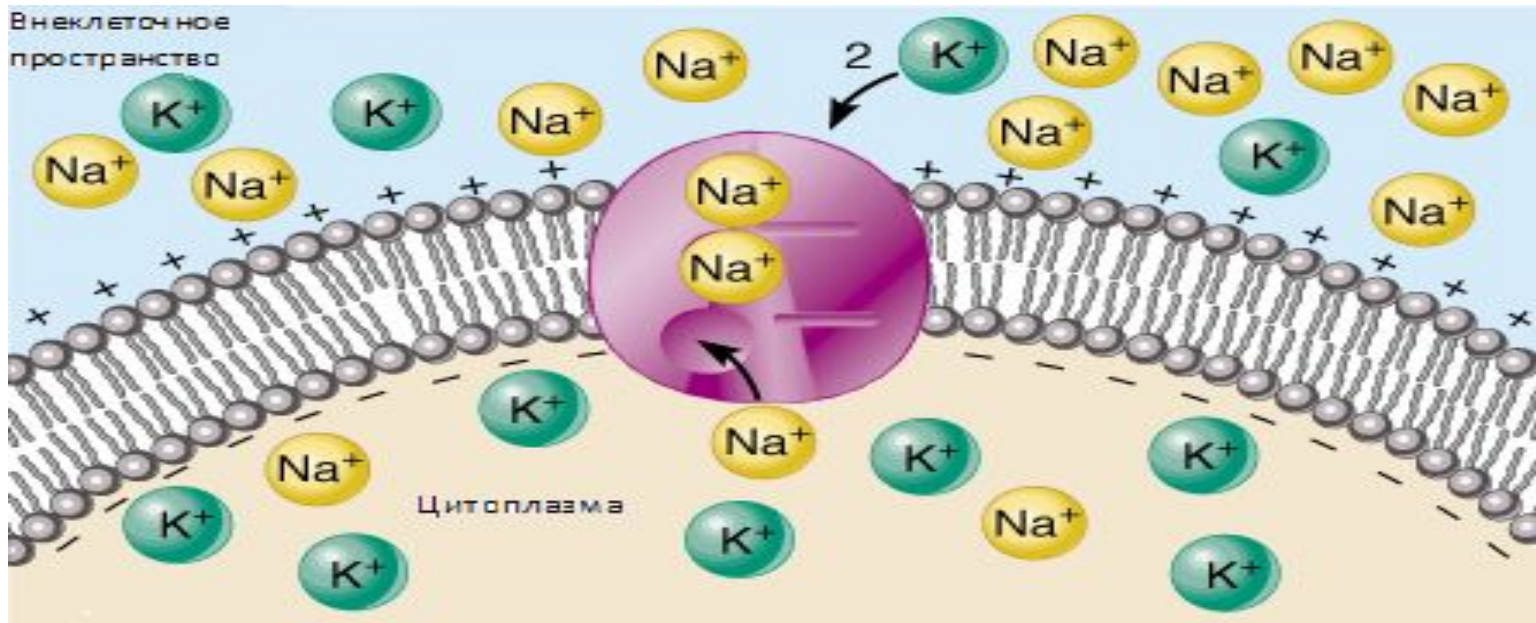
$$\varphi_A - \varphi_B = \frac{p}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \cdot (\cos \alpha - \cos \beta).$$

Т.е. разность потенциалов $\varphi_A - \varphi_B \sim \vec{p}$.



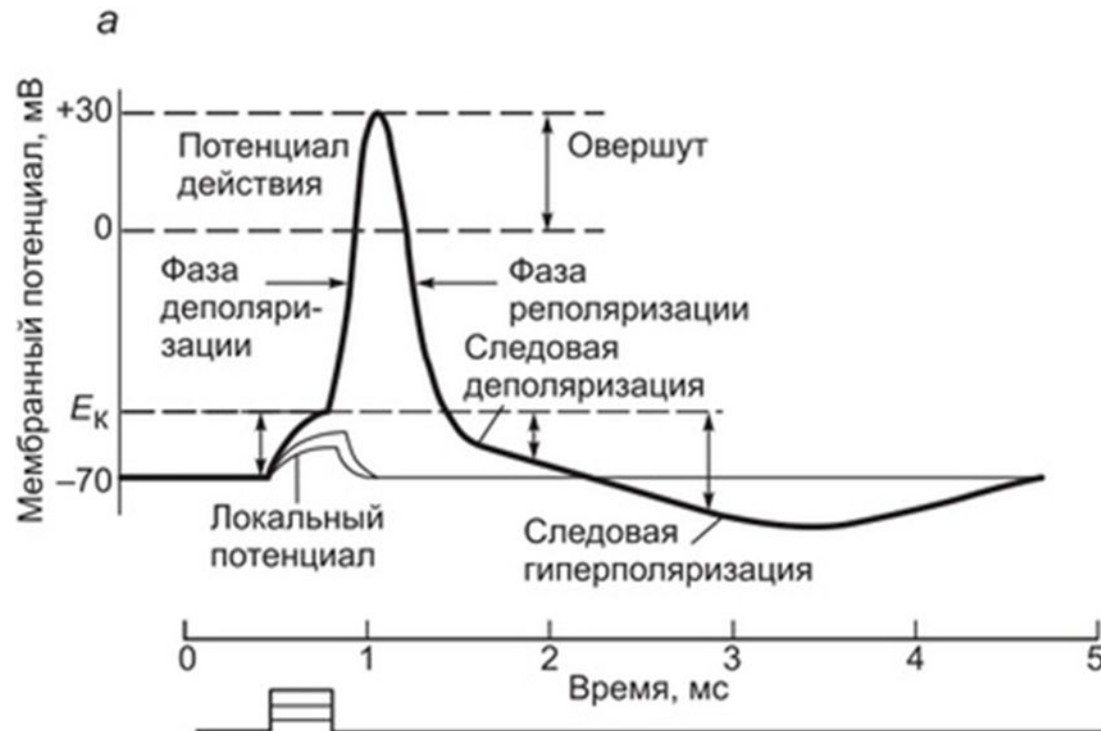
Мембранная теория

Установлено, что в мембранах клеток, в мышечном волокне, в том числе и в сердечной мышце, возникновение биотоков в покое и при возбуждении обусловлено одними и теми же механизмами. Между внутренней и наружной поверхностями клеточной мембраны всегда существует разность потенциалов, которая обусловлена неравномерной концентрацией различных ионов. В состоянии покоя величина этого трансмембранного потенциала составляет 60—90 мВ (со знаком минус со стороны цитоплазмы).



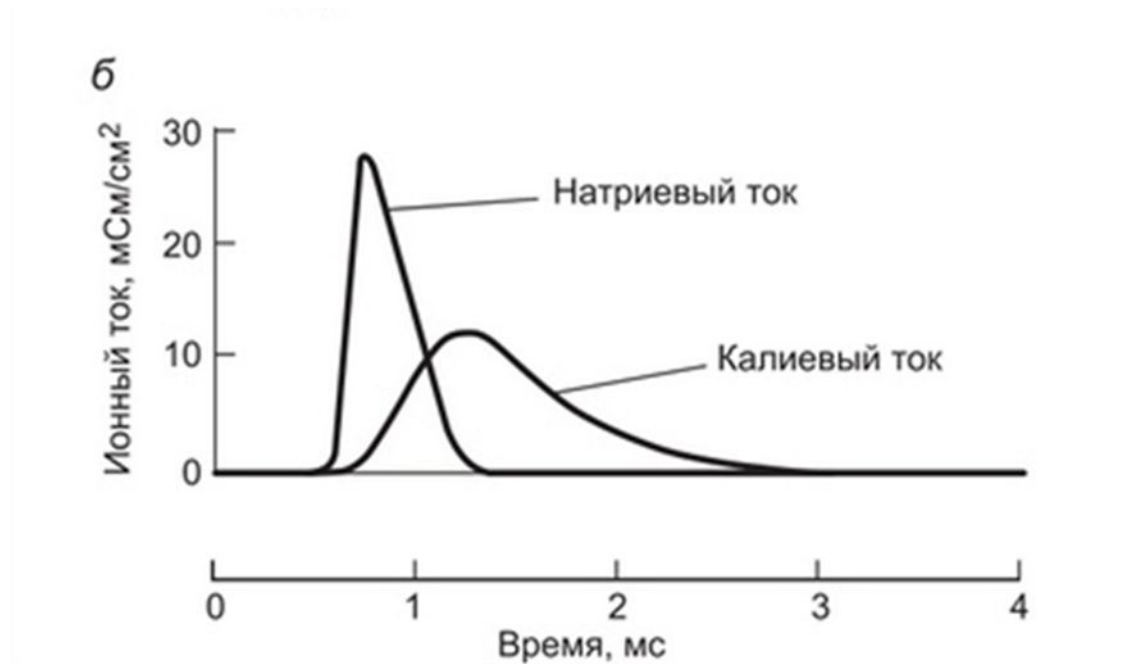
Депольяризация и реполяризация мембраны

Мембрана клеток возбудимых тканей обладает свойством под действием раздражителя менять свою проницаемость по отношению к ионам Na^+ и K^+ в сотни раз. Это приводит к резкому увеличению скорости перемещения ионов Na^+ из внеклеточного пространства внутрь клетки, а ионов K^+ – из цитоплазмы наружу, т.е. идет перемещение ионов из области с большей концентрацией в область с меньшей концентрацией. Так как разность концентраций ионов натрия Na^+ в пятьдесят раз выше, чем для ионов калия K^+ , то начальный поток через открытые каналы мембраны представлен ионами Na^+ .



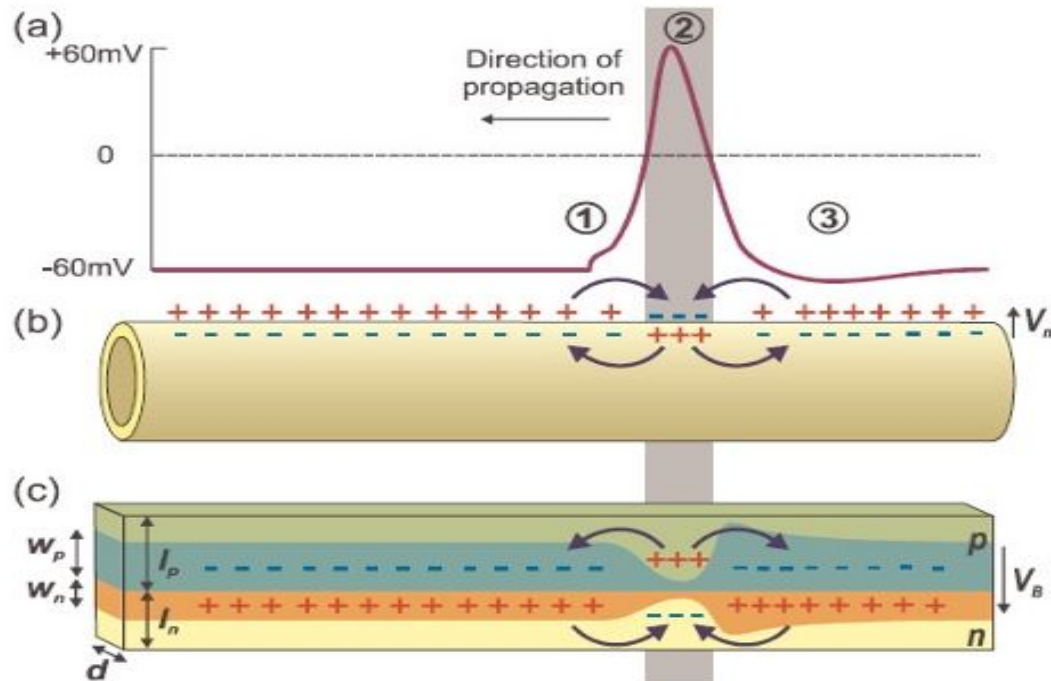
Деполаризация и реполаризация мембраны

Попадая внутрь клетки ионы Na^+ нейтрализуют отрицательный заряд цитоплазмы и меняет его на положительный (деполаризация). Этот процесс длится около 0,5 мс. (потенциал действия, возбуждения), после чего каналы для ионов Na^+ закрываются, а каналы для ионов K^+ продолжают оставаться открытыми. Поэтому в следующие 1 – 1,5 мс. ионы калия K^+ выходя из клетки наружу, восстанавливают исходный уровень мембранного потенциала (реполаризация).



Объемные заряды

Как в отдельной клетке, где возбуждение сопровождается появлением отрицательного заряда на поверхности мембраны, так и в любой другой ткани возбужденный участок становится электроотрицательным по отношению к невозбужденному. В этом случае между возбужденным и невозбужденным участками возникает разность потенциалов, которая может быть зарегистрирована.



Разность потенциалов и дипольный момент

При возбуждении миокарда, когда не все участки одновременно охватываются возбуждением, между возбужденным и невозбужденным участками возникает разность потенциалов, имеющая определенную величину. Эта разность потенциалов пропорциональна дипольному моменту, поэтому ее можно изобразить в виде вектора $\vec{P}$ в направлении от минуса к плюсу по ходу распространения возбуждения. Так как сердце объемный орган, то в нем имеется множество возбуждающихся участков, и в каждый момент существует множество таких векторов различных по величине и направлению. Их можно суммировать в один результирующий вектор.

суммарный вектор сердца, который все время меняется по величине и направлению.



Токовый диполь

Векторная сумма дипольных моментов всех волокон миокарда называется интегральным электрическим вектором сердца (ИЭВС). Этот вектор в каждый момент времени направлен от возбужденного (электроотрицательного) к невозбужденному (электроположительному) участку сердца, и величина и направление его в ходе сердечного цикла многократно меняются.

- Его считают токовым электрическим диполем, у которого исток тока «+», а сток «-»



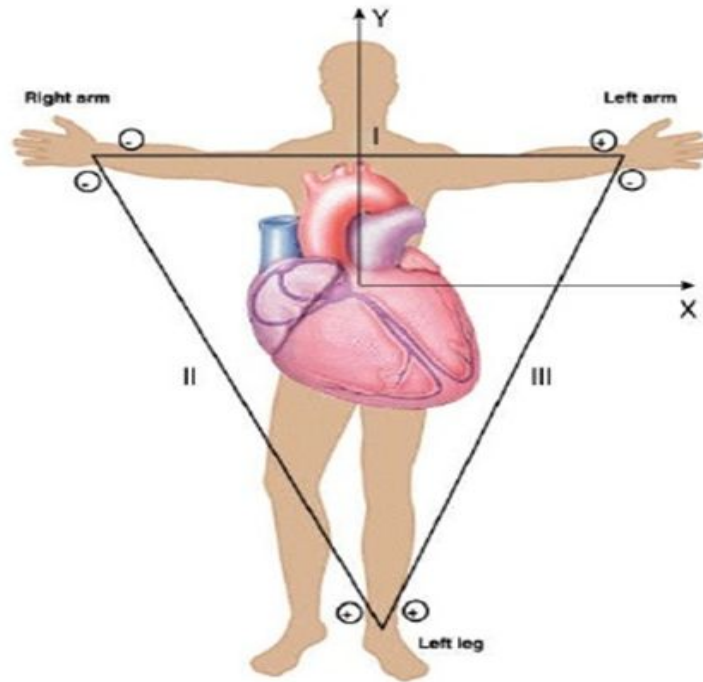
Электрокардиография

Движущиеся заряды создают вокруг себя переменное электрическое поле, которое распространяется в пространстве. Сердце также является источником электрического поля, которое можно зарегистрировать на поверхности тела. Для этого на различные точки поверхности тела накладывают отводящие электроды и регистрируют разность потенциалов между ними. Электрокардиография – это метод регистрации электрических процессов, протекающих в сердечной мышце при её возбуждении. Задача электрокардиографии оценить работу сердца по биопотенциалам, регистрируемым с поверхности тела человека.



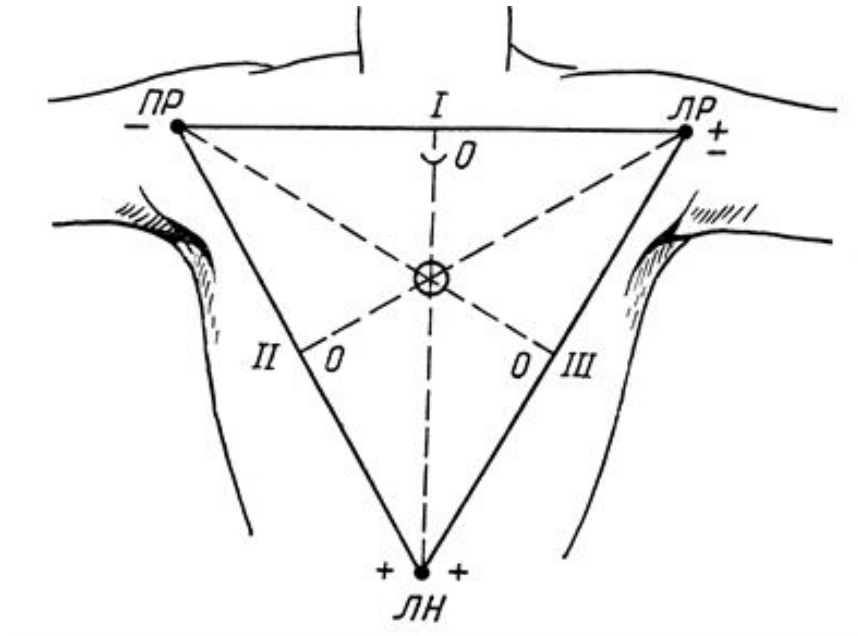
Теория Эйнтховена

Тело человека является электропроводящей средой, внутри которой расположен источник биопотенциалов – сердечная мышца, то разность потенциалов будет возникать не только непосредственно на сердце, но и на поверхности тела. Это дает возможность регистрировать биопотенциалы не только при непосредственном расположении отводящих электродов на сердце, но и в том случае, когда они находятся на поверхности тела. Величина разности потенциалов, регистрируемой между двумя электродами, будет зависеть от величины интегрального электрического вектора и угла между направлением этого вектора и осью отведения. В. Эйнтховен, рассматривая сердце как источник биотоков в объемном проводнике, предложил концепцию равностороннего треугольника, углы которого образуют три конечности: правая рука, левая рука и левая нога.



Треугольник Эйнтховена

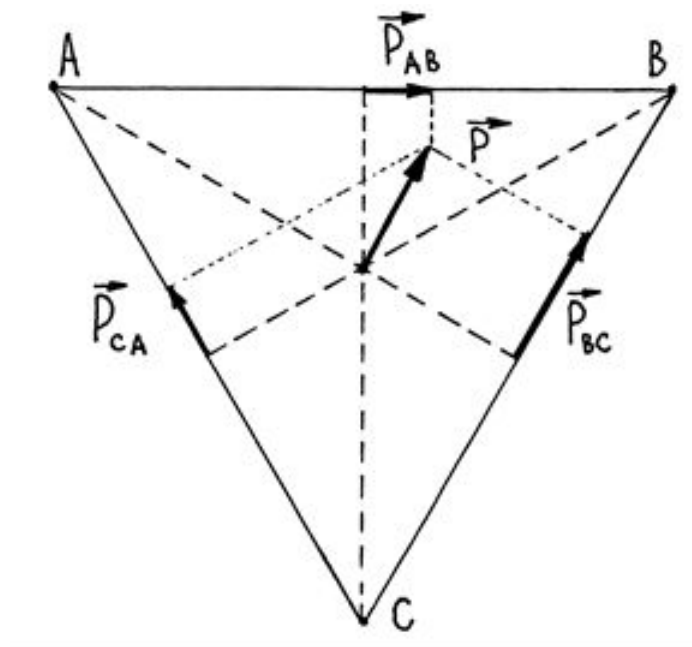
Проекция нулевой точки центра треугольника, представляющая начало вектора дипольного момента, разделяет каждую сторону треугольника на два компонента: положительный (+) и отрицательный (-). Каждая сторона треугольника отражает так называемую ось отведения, на которую проектируются положительный или отрицательный компоненты диполя.



Разность потенциалов и дипольный момент

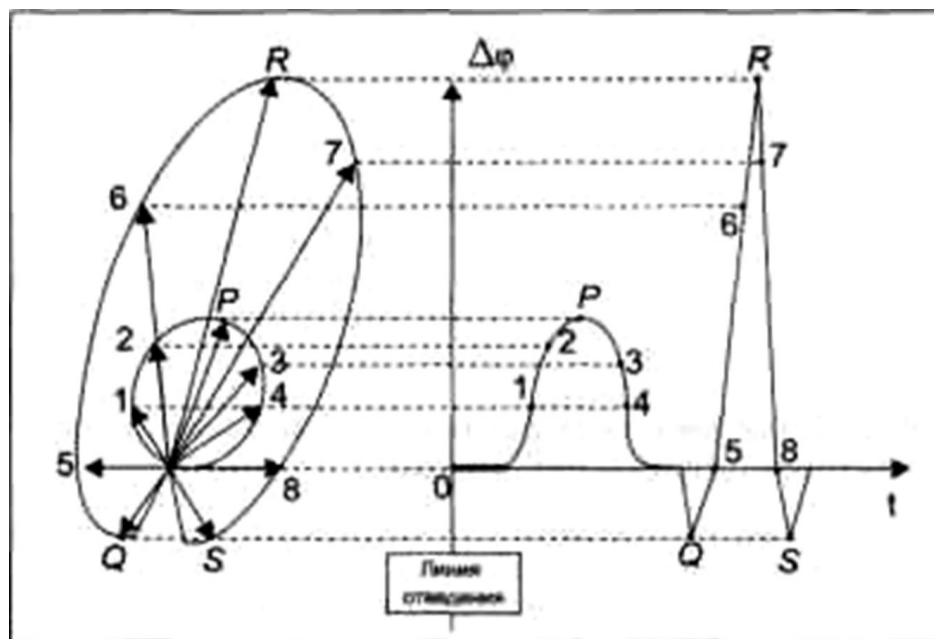
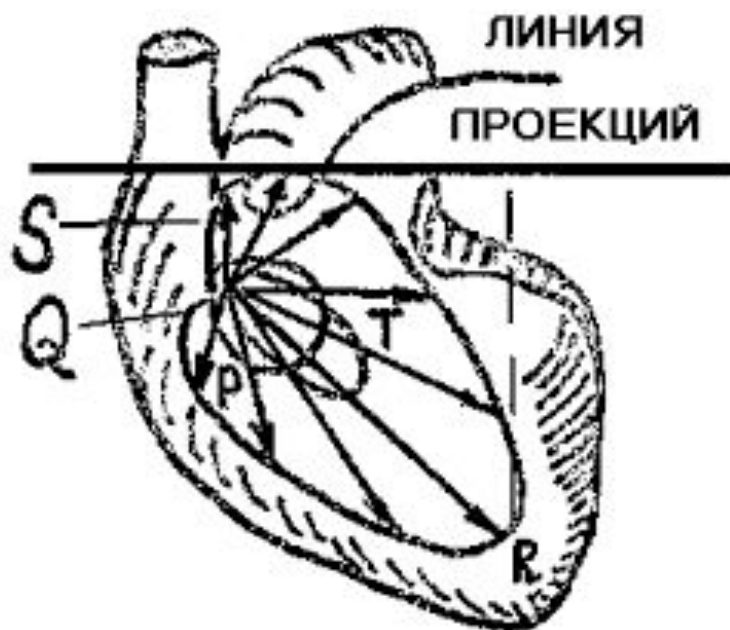
Если напряжение измерять попарно между тремя точками А, В и С, расположенными в вершинах равностороннего треугольника таким образом, что диполь, создающий поле, будет находиться в центре этого треугольника, то эти напряжения будут относиться друг к другу, как проекции вектора дипольного момента на соответствующие стороны треугольника:

$$U_{AB} : U_{BC} : U_{CA} = P_{AB} : P_{BC} : P_{CA}$$



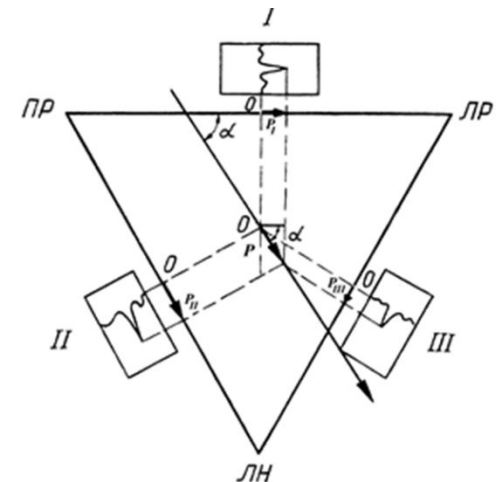
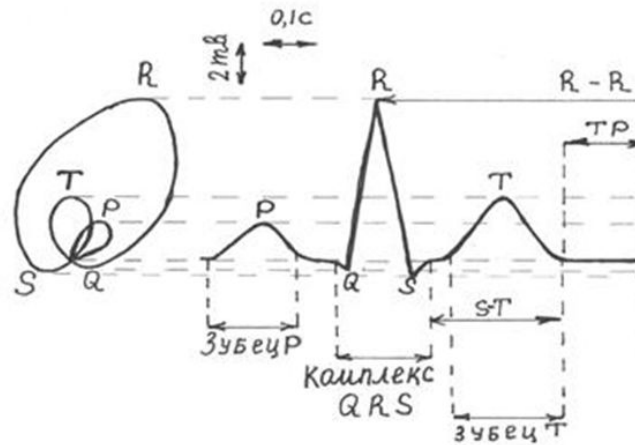
Векторные петли сердечного возбуждения

Если расположить интегральный вектор в центре треугольника, а затем спроектировать его на каждую из трех сторон треугольника, то проекции P_I, P_{II}, P_{III} воспроизведут разность потенциалов соответствующих отведений. В процессе прохождения возбуждения по сердечной мышце вектор дипольного момента меняет свою величину и направление в пространстве (условно считают, что точка приложения вектора остается постоянной). При этом конец вектора описывает три замкнутые линии – петли P, QRS и T, которые соответствуют одноименным зубцам на кардиограмме.



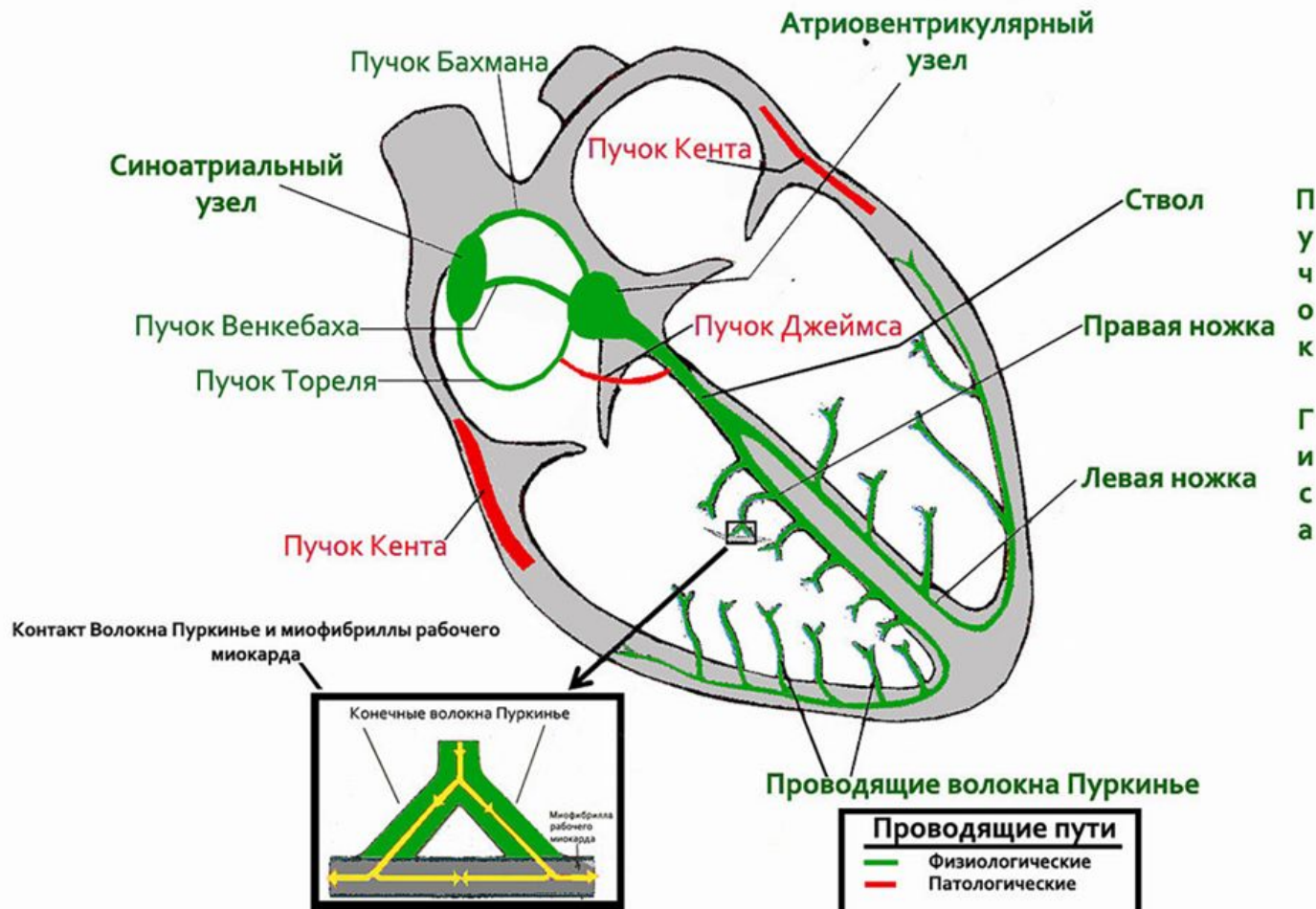
Теория Эйнтховена

ЭКГ представляет собой динамику изменения во времени проекции ИЭВС на оси отведения. Следовательно, если вектор P является функцией времени, то его проекции p_I , p_{II} и p_{III} также зависят от времени. Развертка каждого из мгновенных векторов p_I , p_{II} и p_{III} во времени есть электрокардиограммы в I, II и III отведениях.



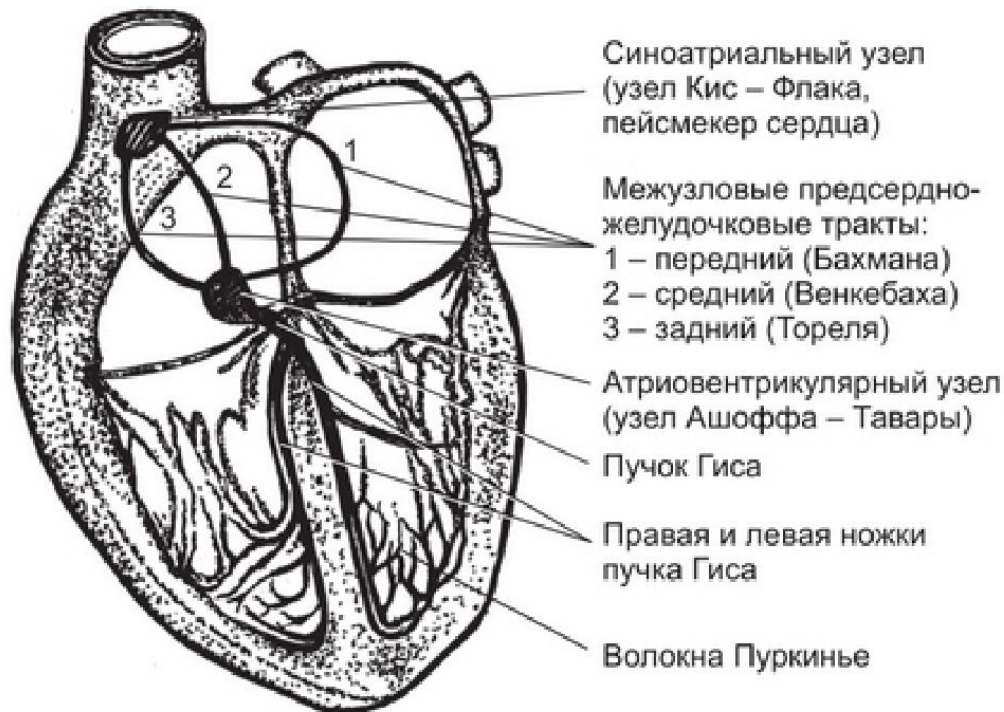
Проводящая система сердца

Вместе с распространением возбуждения по сердечной мышце перемещается и отрицательный потенциал возбужденных участков от основания до вершины сердца, как в объемном проводнике. Сердце, в отличие от скелетной мышцы, обладает свойством автоматии, т.е. будучи вырезанным из организма, оно продолжает сокращаться под действием импульсов, возникающих в нем. Эти импульсы возникают в проводящей системе сердца, состоящей из синусового узла, атриовентрикулярного узла и пучка Гиса.



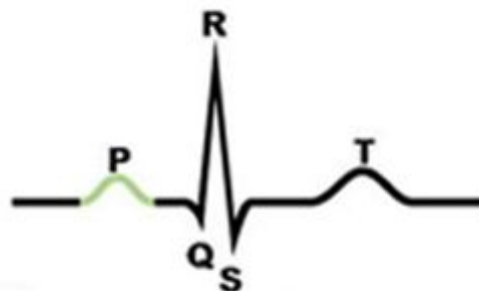
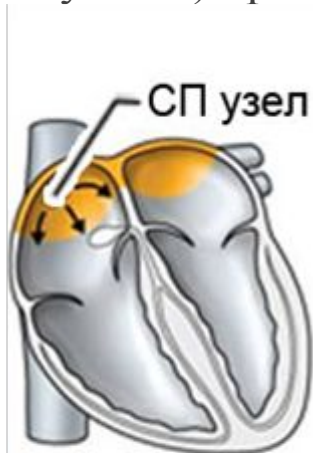
Распространение возбуждения в сердце

Сердце работает в нашем организме под руководством собственного водителя ритма, который вырабатывает электрические импульсы и направляет их в проводящую систему. Это водитель ритма сердца, синусовый узел расположен в правом предсердии в месте слияния полых вен, т.е. в синусе, и поэтому назван синусовым узлом, а импульс возбуждения, исходящий из синусового узла, называется соответственно синусовым импульсом. У здорового человека синусовый узел вырабатывает электрические импульсы с частотой 60-90 ударов в минуту, равномерно посылая их по проводящей системе сердца.

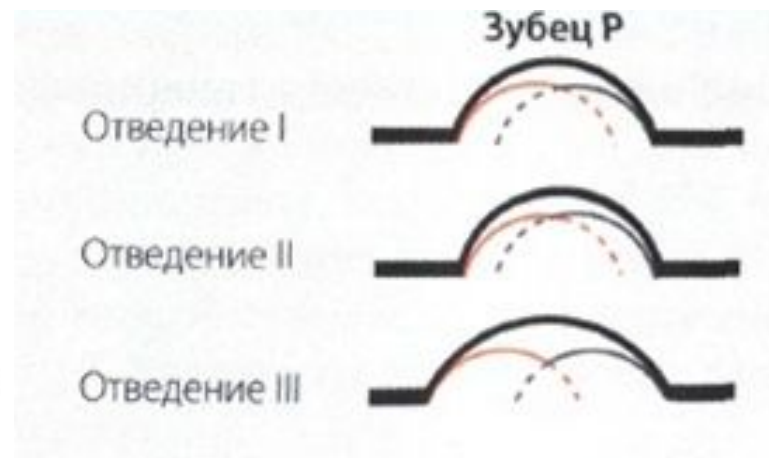


Распространение возбуждения в сердце

Электрический импульс, выйдя за пределы синусового узла, охватывает возбуждением прежде всего правое предсердие, в котором он находится. На ЭКГ записывается пик возбуждения правого предсердия. Далее, по проводящей системе предсердий, а именно по межпредсердному пучку Бахмана, импульс возбуждения переходит на левое предсердие и возбуждает его. Этот процесс отображается на ЭКГ пиком возбуждения левого предсердия. Его возбуждение начинается в то время, когда правое предсердие уже охвачено возбуждением. Отображая возбуждения обоих предсердий, электрокардиографический аппарат суммирует оба пика возбуждения и записывает графически на ленте зубец Р. Таким образом, зубец Р представляет собой суммарное отображение прохождения импульса по проводящей системе предсердий и поочередное возбуждение сначала правого (восходящее колено зубца Р), а затем левого (нисходящее колено зубца Р) предсердий.

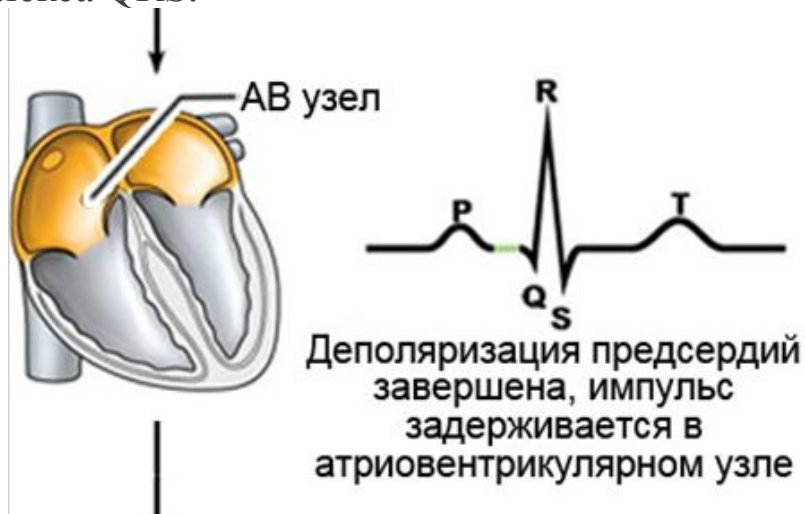


Депольяризация предсердий,
синусно-предсердный узел,
Р зубец на ЭКГ



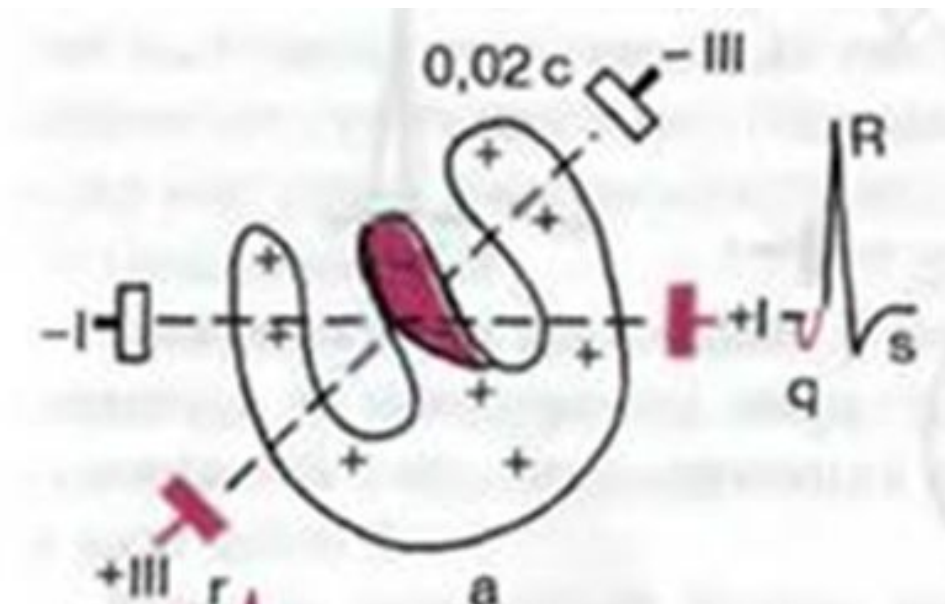
Распространение возбуждения в сердце

После окончания деполяризации предсердий поверхность всех предсердных кардиомиоцитов оказывается заряжена одинаково отрицательно, и разность потенциалов в миокарде исчезает. Электрическому взаимодействию между отрицательно заряженными предсердиями и положительно заряженными желудочками препятствует находящаяся между ними фиброзная ткань, обладающая свойствами изолятора. Возбуждение продолжает распространяться только по АВ-соединению. Однако количество проводящих кардиомиоцитов, участвующих в этом процессе, мало, а фронт волны деполяризации очень узок. Соответственно разность потенциалов, возникающая при возбуждении элементов проводящей системы невелика и на ЭКГ не регистрируется. В АВ-узле происходит физиологическая задержка импульса - сегмент PQ. Длительность этого сегмента несет информацию о величине атриовентрикулярной задержки. Регистрирующий электрод вычерчивает при этом прямую линию, называемую изолинией. Реполяризация предсердий совпадает по времени с деполяризацией желудочков, поэтому потенциалы реполяризации предсердий на ЭКГ не отражаются, так как перекрываются большими по амплитуде потенциалами комплекса QRS.



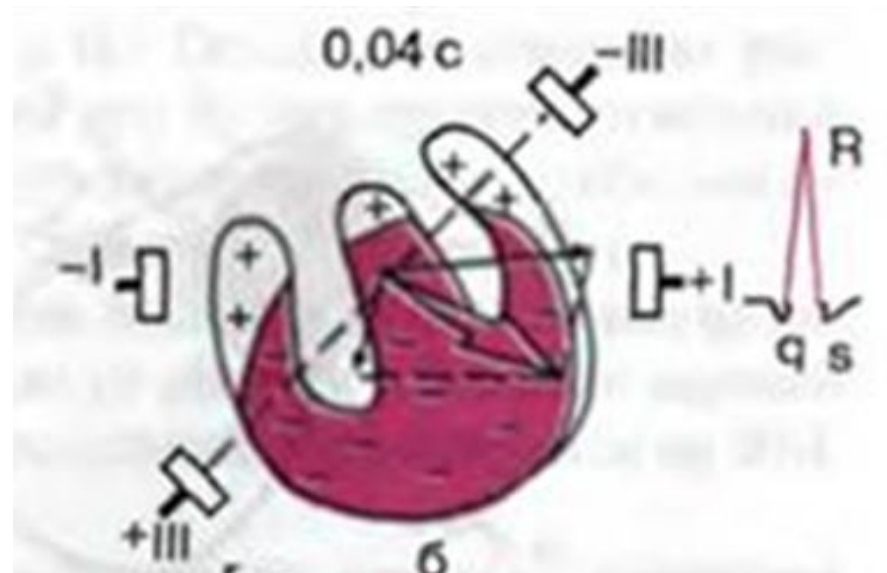
Распространение возбуждения в сердце

Далее волна деполяризации охватывает желудочки в последовательности, определяемой структурой проводящей системы. В этом процессе деполяризации желудочков (комплекс QRS) обычно выделяют три фазы, каждой из которых соответствует свой результирующий вектор. Первый вектор характеризует период 0,02 с от начала деполяризации желудочков, когда возбуждение охватывает межжелудочковую перегородку и часть правого желудочка. Этот вектор имеет небольшую величину и направлен вверх, вправо и вперед, обуславливая образование низкоамплитудного зубца Q в стандартных отведениях. Чаще зубец Q появляется не во всех трех стандартных отведениях, а только в одном или двух, что зависит в норме от положения сердца в грудной клетке.



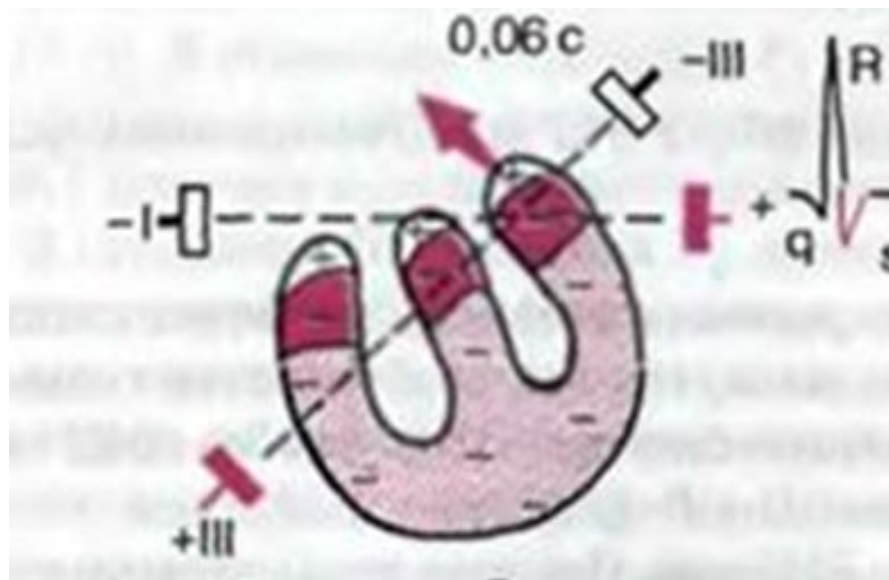
Распространение возбуждения в сердце

Следующий вектор характеризует период 0,04 с, когда возбуждается большое количество кардиомиоцитов стенок желудочков, от эндокарда к эпикарду. Фронт волны возбуждения при этом расширяется, и, следовательно, возрастает и разность потенциалов, которая достигает максимума в тот момент времени, когда возбуждением охвачена примерно половина миокарда. Из-за большей мышечной массы левого желудочка вектор направлен вниз и влево, что отражается зубцом R во всех стандартных отведениях.



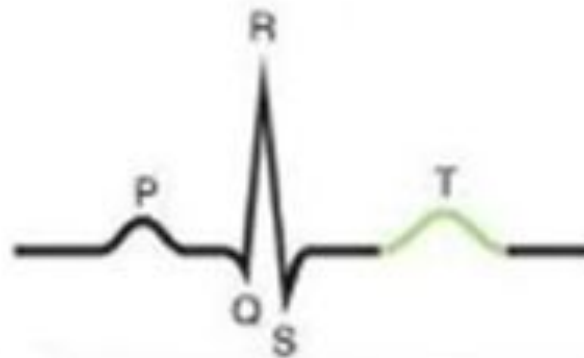
Распространение возбуждения в сердце

Третий вектор характеризует период 0,06 с. за который деполяризуются базальные отделы миокарда желудочков, в последнюю очередь возбуждается участок правого желудочка в области основания легочного ствола. Количество деполяризованных участков в этот период начинает превышать количество еще невозбужденных, фронт волны возбуждения сужается, разность потенциалов и величина электрического вектора уменьшаются. Конечный вектор направлен вверх и немного вправо, т.е. противоположную сторону. Этому вектору во всех стандартных отведениях соответствует зубец S.



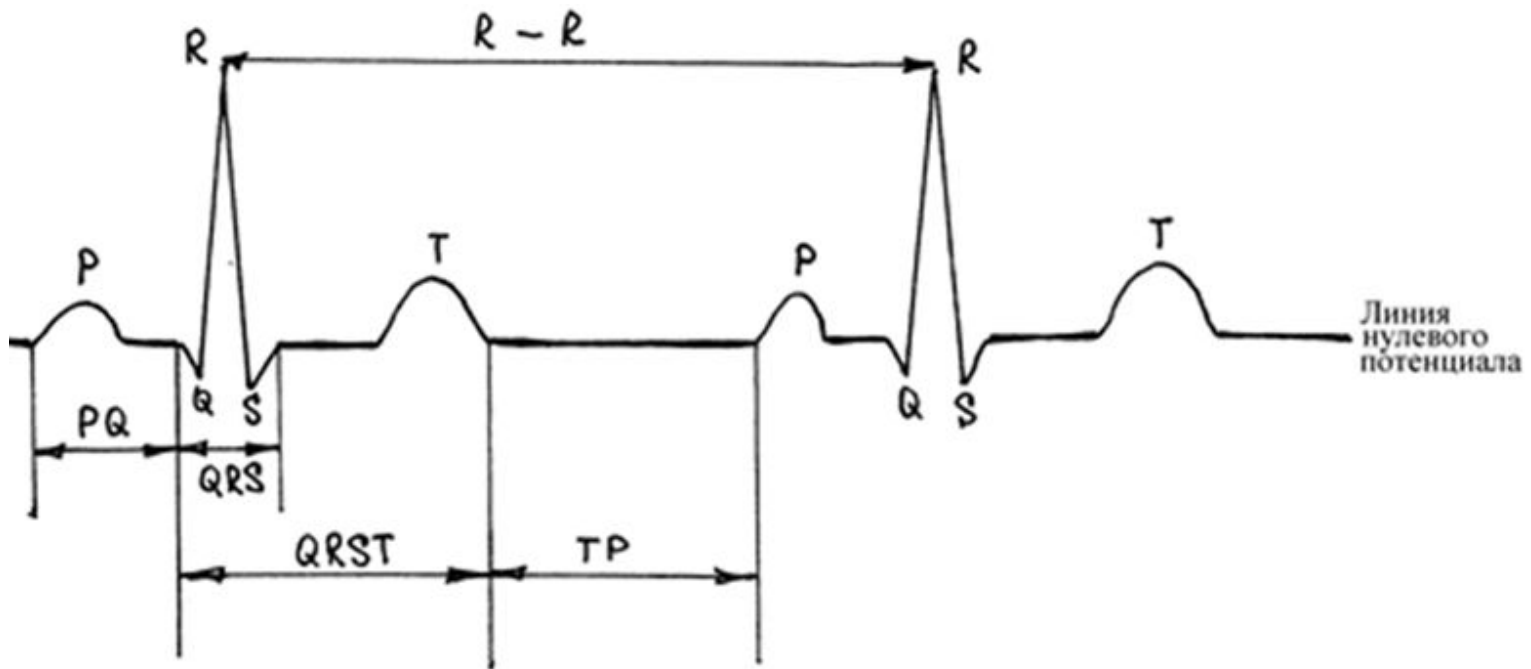
Распространение возбуждения в сердце

При полном охвате возбуждением миокарда желудочков (сегмент ST) деполяризация миокарда желудочков завершена, поэтому разность потенциалов в сердечной мышце очень мала. Малое смещение сегмента ST от изолинии вниз или вверх указывает на завершение деполяризации или начало фазы реполяризации. При реполяризации миокарда суммарный вектор реполяризации желудочков, имеет то же направление, что и главный вектор деполяризации. В связи с этим полярность зубца Т в большинстве отведений совпадает с полярностью зубца R. Завершение реполяризации желудочков приводит миокард в исходное состояние, при котором разность потенциалов равна нулю, участок кривой ЭКГ совпадает с изолинией. Этот интервал времени общей паузы внутри цикла соответствует сегменту TP, в течение которого ЭДС сердца равна нулю.



Электрокардиограмма

При регистрации биопотенциалов сердца записывается кривая, получившая название электрокардиограммы, которая состоит из пяти основных зубцов P, Q, R, S и T, где P – предсердный зубец, QRS – желудочковый комплекс. Зубец T связывают с биохимическими процессами, протекающими после возбуждения желудочков.



Электрокардиограмма

Форма, высота и длительность зубцов являются основными характеристиками ЭКГ и деятельности сердца. Так как электрические процессы в сердечной мышце происходят циклически, то группы зубцов при записи ЭКГ повторяются. По расстоянию между группами зубцов можно судить о частоте сердечных сокращений (ЧСС) и ритмичности сердечной деятельности. Амплитуду зубцов при анализе ЭКГ измеряют в милливольтках (мВ), а ширину зубцов и продолжительность интервалов в секундах. При записи ЭКГ в трех стандартных отведениях отмечается, что амплитуды зубцов электрокардиограммы различны.



Теория Эйнтховена

Сигналы возбуждения сердечной мышцы поступают из синусного узла, расположенного в правом предсердии в области устья верхней поллой вены, постепенно возбуждение охватывает весь миокард.

Сердце можно рассматривать как токовый диполь с электрическим дипольным моментом, который периодически изменяет свою величину и положение в пространстве с течением времени. Причём точку приложения вектора дипольного момента принято считать постоянной.

В процессе возбуждения диполь сердца создает в теле человека электрическое поле, параметры которого (разность потенциалов) можно зарегистрировать в любой точке, в том числе и на поверхности тела человека.

В процессе распространения возбуждения, когда изменяется величина и направление воображаемого диполя, происходит изменение параметров электрического поля на поверхности тела человека.

По измерениям разности потенциалов поля можно судить об электрических параметрах самого диполя.

Электропроводимость биологических тканей и жидкостей при постоянном токе

Биологические ткани и органы являются разнородными образованиями с различными электрическими сопротивлениями, которые могут изменяться под действием электрического тока. Электропроводимость отдельных участков организма, находящихся между электродами, наложенными непосредственно на поверхность тела, существенно зависит от сопротивления кожи и подкожных слоев. Внутри организма ток распространяется в основном по кровеносным и лимфатическим сосудам, мышцам, оболочкам нервных стволов. Сопротивление кожи, в свою очередь, определяется ее состоянием: толщиной, возрастом, влажностью и т.п. Электропроводимость тканей и органов зависит от их функционального состояния и, следовательно, может быть использована как диагностический показатель. Так, например, при воспалении, когда клетки набухают, уменьшается сечение межклеточных соединений и увеличивается электрическое сопротивление.

	ρ , Ом*м		ρ , Ом*м
Спинномозговая жидкость	0,55	Ткань жировая	33,3
Кровь	1,66	Кожа сухая	10^5
Мышцы	2	Кость без надкостницы	10^7
Ткань мозговая и нервная	14,3		

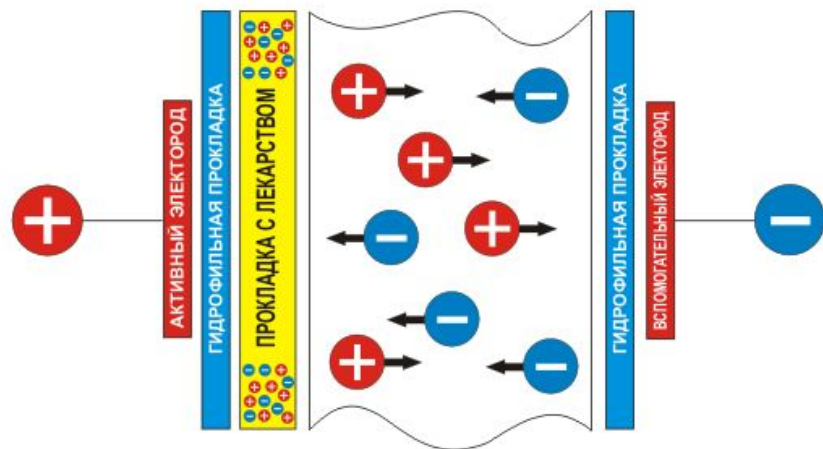
Действие постоянного тока на ткани организма

Человеческий организм в значительной степени состоит из биологических жидкостей, содержащих большое количество ионов, которые участвуют в различных обменных процессах. Под влиянием электрического поля ионы движутся с разной скоростью и скапливаются около клеточных мембран. При действии постоянного тока на тело человека возникают явления электролитической диссоциации. Постоянный ток вызывает в тканях перераспределение ионов, что сопровождается сложными физико-химическими процессами, ведущими к изменению проницаемости мембран и уровня обменных процессов. В зависимости от методики воздействия и дозировки гальванизация повышает или снижает функции тканей, оказывает болеутоляющий эффект, улучшает периферическое кровообращение, восстанавливает поврежденные ткани и нервы, стимулирует регуляторную функцию нервной системы.



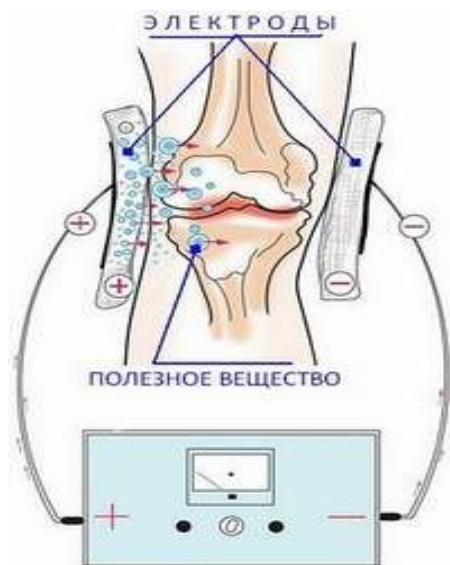
Лечебный электрофорез

Метод, сочетающий действие на организм постоянного тока и вводимого с его помощью лекарственного вещества. Основными путями проникновения лекарств в ткани являются выводные протоки потовых и сальных желез. Проникают лекарственные средства на небольшую глубину и в основном накапливаются в эпидермисе и дерме, образуя так называемое кожное депо ионов, где ионы могут находиться от 1 до 20 суток. Затем лекарственное вещество постепенно диффундирует в лимфатические и кровеносные сосуды и доставляется по месту назначения. Образование кожного депо обуславливает продолжительное действие лекарств. В связи с этим лекарственный электрофорез имеет ряд преимуществ перед другими методами лекарственной терапии.



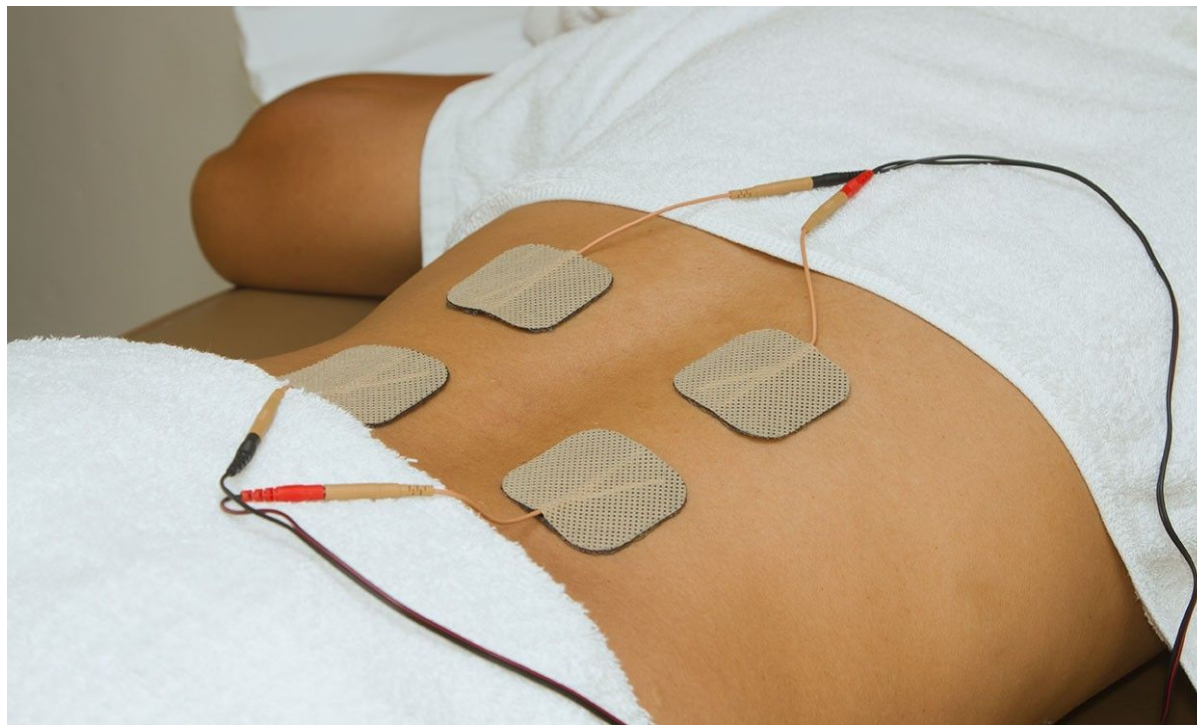
Лечебный электрофорез

С помощью электрофореза в зоне поражения или патологическом очаге можно создать высокую концентрацию лекарственных средств, не насыщая ими весь организм. Метод электрофореза обеспечивает подведение лекарственного вещества к патологическому очагу. Вводимые в организм с помощью постоянного тока лекарства практически не вызывают побочных реакций, так как концентрация вещества в крови — низкая, а сам ток оказывает десенсибилизирующее действие. Введение препаратов с помощью электрофореза безболезненно, не сопровождается повреждением кожи и слизистых.



Воздействие на организм импульсными токами

Действие переменного тока на организм зависит от его частоты. При низких, звуковых и ультразвуковых частотах переменный ток, как и постоянный, вызывает раздражающее действие на биологические ткани. Это обусловлено смещением ионов растворов электролитов, их разделением, изменением их концентрации в разных частях клетки и межклеточного пространства. Раздражение тканей зависит также и от формы импульсного тока, длительности импульса и его амплитуды.



Воздействие на организм импульсными токами

Электросон — метод лечения больных с функциональными расстройствами центральной нервной системы, основанный на воздействии слабых импульсов тока низкой частоты на головной мозг.

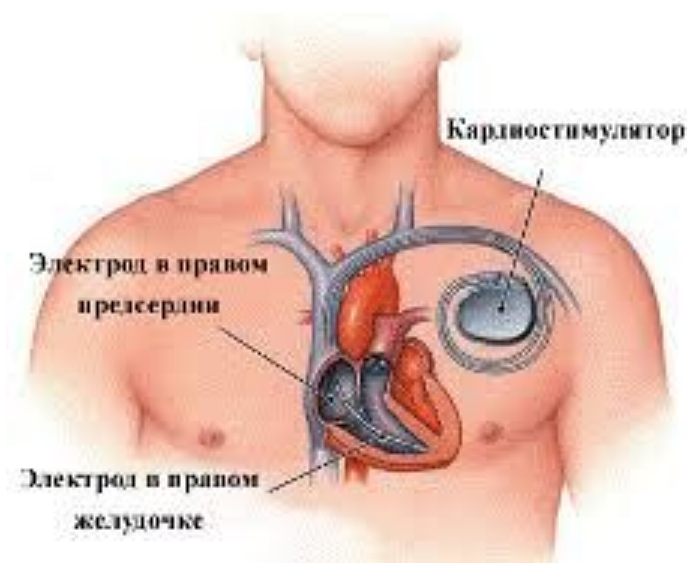
Электроанестезия один из современных методов обезболивания, основанный на воздействии электрического тока определенных параметров на головной мозг пациента.



Воздействие на организм импульсными токами

Кардиостимулятор необходим для поддержания частоты сердечных сокращений пациенту, у которого сердце бьётся недостаточно часто, или имеется электрофизиологическое разобщение между предсердиями и желудочками (атриовентрикулярная блокада).

Дефибриллятор — прибор, использующийся в медицине для электроимпульсной терапии нарушений сердечного ритма.



Воздействие на организм импульсными токами

При частотах более 500 кГц смещение ионов становится соизмеримым с их смещением в результате молекулярно-теплового движения, поэтому ток или электромагнитная волна не будет вызывать раздражающего действия. Основным первичным эффектом в этом случае является тепловое воздействие. Высокочастотное прогревание происходит за счет образования теплоты во внутренних частях организма. Выделяемая теплота зависит от диэлектрической проницаемости тканей, их удельного сопротивления и частоты электромагнитных колебаний. Подбирая соответствующую частоту, можно осуществлять селективное воздействие, т. е. преимущественное образование теплоты в нужных тканях и органах.



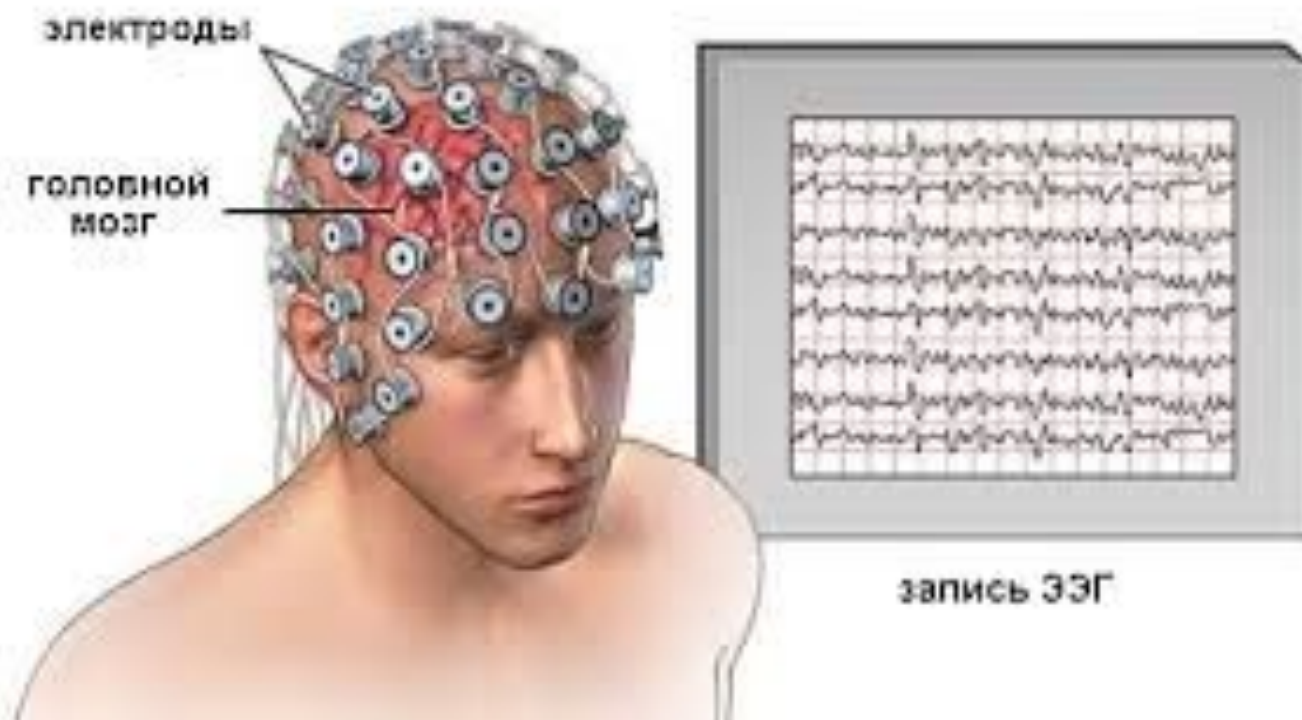
Воздействие на организм импульсными токами

Диатермокоагуляция — это прижигание тканей переменным током высокой частоты. Диатермокоагуляцию применяется для остановки кровотечений при операциях, удаления бородавок, некоторых новообразований кожи, гортани, лечения эрозий шейки матки, отслойки сетчатки, воспаления пульпы зуба. Через подлежащий прижиганию участок тела пропускают ток, позволяющий нагревать ткани до температуры, при которой наступает необратимое свертывание (коагуляция) белков. Предотвращается кровотечение и возможность попадания инфекции в кровяное русло. Коагуляция нервов уменьшает послеоперационные боли. **Диатермотомия** производится при помощи диатермического скальпеля. При этом вокруг разреза ткани коагулируются, что предохраняет их от внедрения микробов и возникновения метастазов.



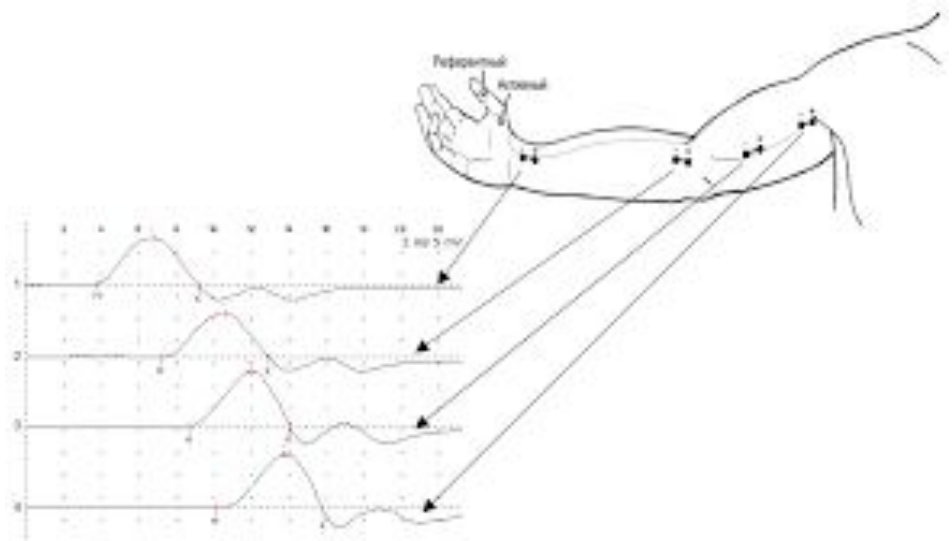
Электронцефалография

Электронцефалография (ЭЭГ) — раздел электрофизиологии, изучающий закономерности суммарной электрической активности мозга, отводимой с поверхности кожи головы, а также метод записи таких потенциалов (формирования электронцефалограмм).



Электромиография

Электромиография (ЭМГ) – нейрофизиологический метод исследования, основанный на регистрации электрических импульсов (потенциалов), возникающих в мышечных волокнах той или иной части тела под воздействием различных возбуждающих стимулов.



Спасибо за
внимание!