

# **Биофизика и медицинская физика**

# Раздел XIII. Электрогенез органов

## XIII.1. Общие сведения

При функционировании тканей и органов в организме человека создаются электрические поля. Между двумя электродами, прикрепленными к разным участкам тела, можно зафиксировать разность потенциалов. Зависимость этой разности потенциалов от времени называется электрограммой. Можно записать электрокардиограмму (ЭКГ), которая отражает электрическую активность сердца, электроэнцефалограмму (ЭЭГ), которая описывает электрическую активность головного мозга, электромиограмму (ЭМГ), которая показывает электрическую активность мышц, и др.

Электрография решает две взаимно обратные по смыслу задачи:

— прямую, когда по известным параметрам электрической активности органа необходимо рассчитать распределение электрического потенциала на поверхности тела человека;

— обратную (диагностическую), когда по зарегистрированным электрограмме или стационарному распределению электрического потенциала на поверхности тела человека нужно оценить электрические параметры внутреннего органа, создающего это распределение, и на этой основе получить представление о его физиологическом состоянии (отклонение от нормы).

В электрографии для оценки функционального состояния органа по его электрической активности используется принцип эквивалентного генератора. Он состоит в том, что изучаемый орган, состоящий из множеств клеток, возбуждающихся в различные моменты времени, представляется моделью — единым эквивалентным генератором. Считается, что этот эквивалентный генератор находится внутри организма и создает на поверхности тела такое электрическое поле или распределение электрического потенциала, которое во все моменты времени как можно точнее должно совпадать с теми, что создает сам орган (это можно зарегистрировать в опыте). Очевидно, что чем выше эта точность, тем более адекватна реальному объекту выбранная модель. Ниже рассмотрим примеры использования метода эквивалентного генератора в конкретных задачах.

## ХIII.2. Электрическая активность сердца. ЭКГ

При анализе электрической активности сердца его заменяют эквивалентным генератором тока, удовлетворяющим требованию, описанному в разделе ХIII.1. Эквивалентная схема токового генератора в проводящей среде представлена на рис. ХIII.1.

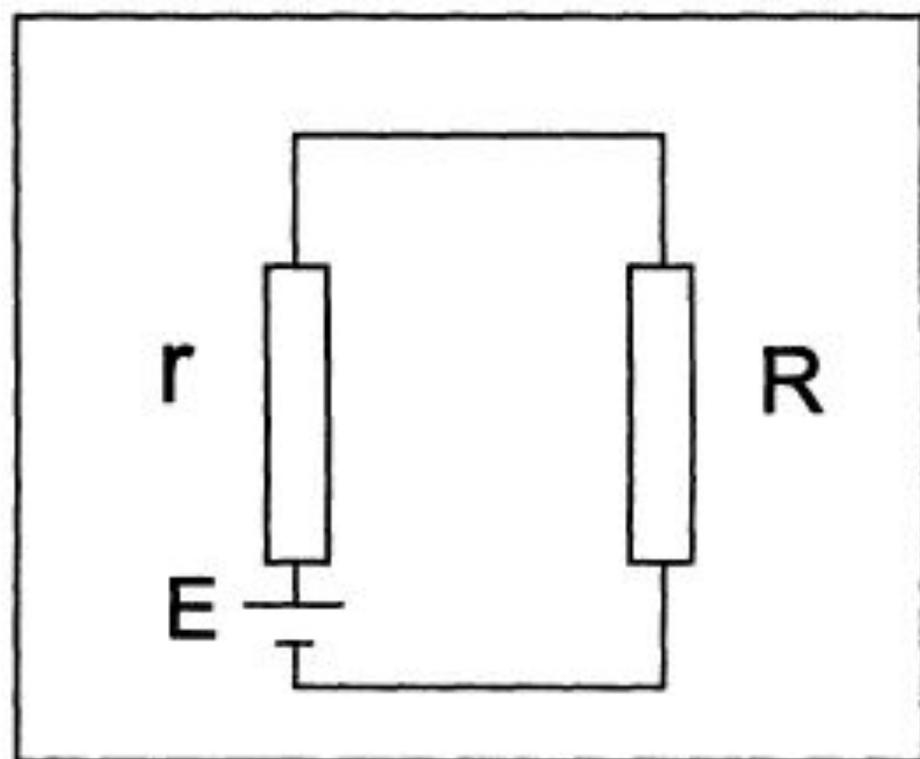
Токовый генератор имеет высокое внутреннее сопротивление  $r$ , во много раз превосходящее сопротивление внешней нагрузки (среды)  $R$ . По закону Ома для полной электрической цепи:

$$I = I_0 = \frac{E}{R + r}, \quad (\text{ХIII.1})$$

где  $I$  и  $I_0$  — сила тока в генераторе и суммарного тока в среде;  $E$  — ЭДС генератора, поскольку:

$$r \gg R \Rightarrow I = I_0 \approx \frac{E}{r}. \quad (\text{ХIII.2})$$

Согласно этому соотношению, сила тока в генераторе и суммарного тока во внешней среде (нагрузка) не зависит от сопротивления внешней среды. Для токовых генераторов выполняется правило суперпозиции электрических полей: потенциал поля совокупности генераторов равен алгебраической сумме потенциалов полей, создаваемых генераторами по отдельности.



**Рис. XIII.1.** Эквивалентная схема токового генератора. Источник ЭДС  $E$ ,  $r$  – внутреннее сопротивление;  $R$  – сопротивление нагрузки.

Для конкретных расчетов потенциалов генератор представляют в виде токового диполя — системы из положительного и отрицательного полюсов на небольшом расстоянии друг от друга. Важнейшим параметром токового диполя является электрический дипольный момент  $\vec{D}$  — векторная величина, равная  $\vec{D} = I \cdot \vec{\ell}$ , где  $I$  — сила тока;  $\vec{\ell}$  — вектор, соединяющий полюсы и направленный от минуса к плюсу, как и ток внутри диполя.

Детальные расчеты показывают, что потенциал электрического поля сердца в некоторой точке  $A$  складывается из потенциалов элементарных диполей и равен:

$$\varphi_A = \frac{\rho}{4\pi\gamma^2} \sum_{i=1}^n D_i \cdot \cos \alpha_i, \quad (\text{XIII.3})$$

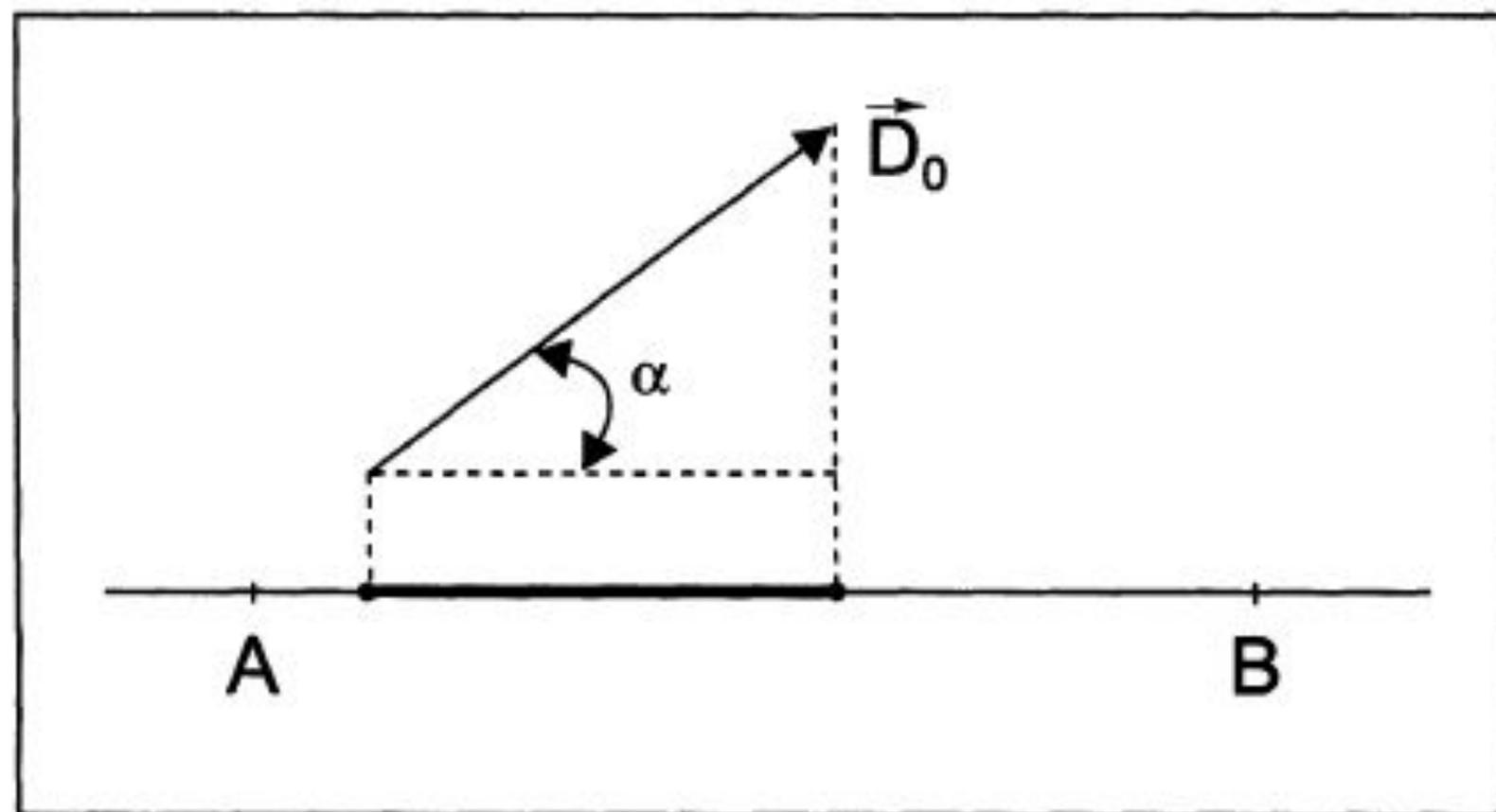
где  $D_i$  — дипольный момент элементарного диполя с номером  $i$ ;  $\rho$  — удельное сопротивление среды;  $\gamma$  — одинаковое для всех диполей расстояние от источника до точки измерения потенциала;  $n$  — общее число элементарных диполей;  $\alpha_i$  — угол между направлением вектора  $D_i$  и линией, соединяющей рассматриваемую точку и источник. Из формулы видно, что сумму можно рассматривать как проекцию на указанную линию вектора дипольного момента ( $\vec{D}_0$ ) одного токового диполя, у которого  $\vec{D}_0 = \sum_{i=1}^n \vec{D}_i$ . Этот диполь называют эквивалентным диполем сердца.

Таким образом, потенциал электрического поля сердца можно представить в виде потенциала одного эквивалентного диполя:

$$\varphi_A = \frac{\rho D_0 \cdot \cos \alpha}{4\pi r^2}, \quad (\text{XIII.4})$$

где  $\alpha$  — угол между вектором  $\vec{D}_0$  и направлением регистрации потенциала;  $D_0$  — модуль вектора  $\vec{D}_0$ .

Из формулы (XIII.4) следует, что разность потенциалов между двумя точками диполя (на одинаковых расстояниях от него) пропорциональна проекции дипольного момента на линию, их соединяющую (рис. XIII.2).



**Рис. XIII.2.** Разность потенциалов между точками A и B прямо пропорциональна проекции вектора  $\vec{D}_0$  на линию AB.

Эта идея стала одной из основных в модели Эйнтховена, основные постулаты которой можно сформулировать так:

— электрическое поле сердца представляется как электрическое поле точечного диполя с дипольным моментом  $D_0$ , называемым интегральным электрическим вектором сердца (ИЭВС) (складывается

из диполей разных частей сердца:  $\vec{D}_0 = \sum_{i=1}^n \vec{D}_i$ );

— ИЭВС находится в однородной проводящей среде, которой являются ткани организма;

— интегральный электрический вектор сердца  $\vec{D}_0$  меняется по величине и направлению. Его начало неподвижно и находится в атриовентрикулярном узле, а конец описывает сложную пространственную кривую, проекция которой на фронтальную плоскость образует за цикл сердечной деятельности (в норме) 3 петли:  $P$ ,  $QRS$  и  $T$ .

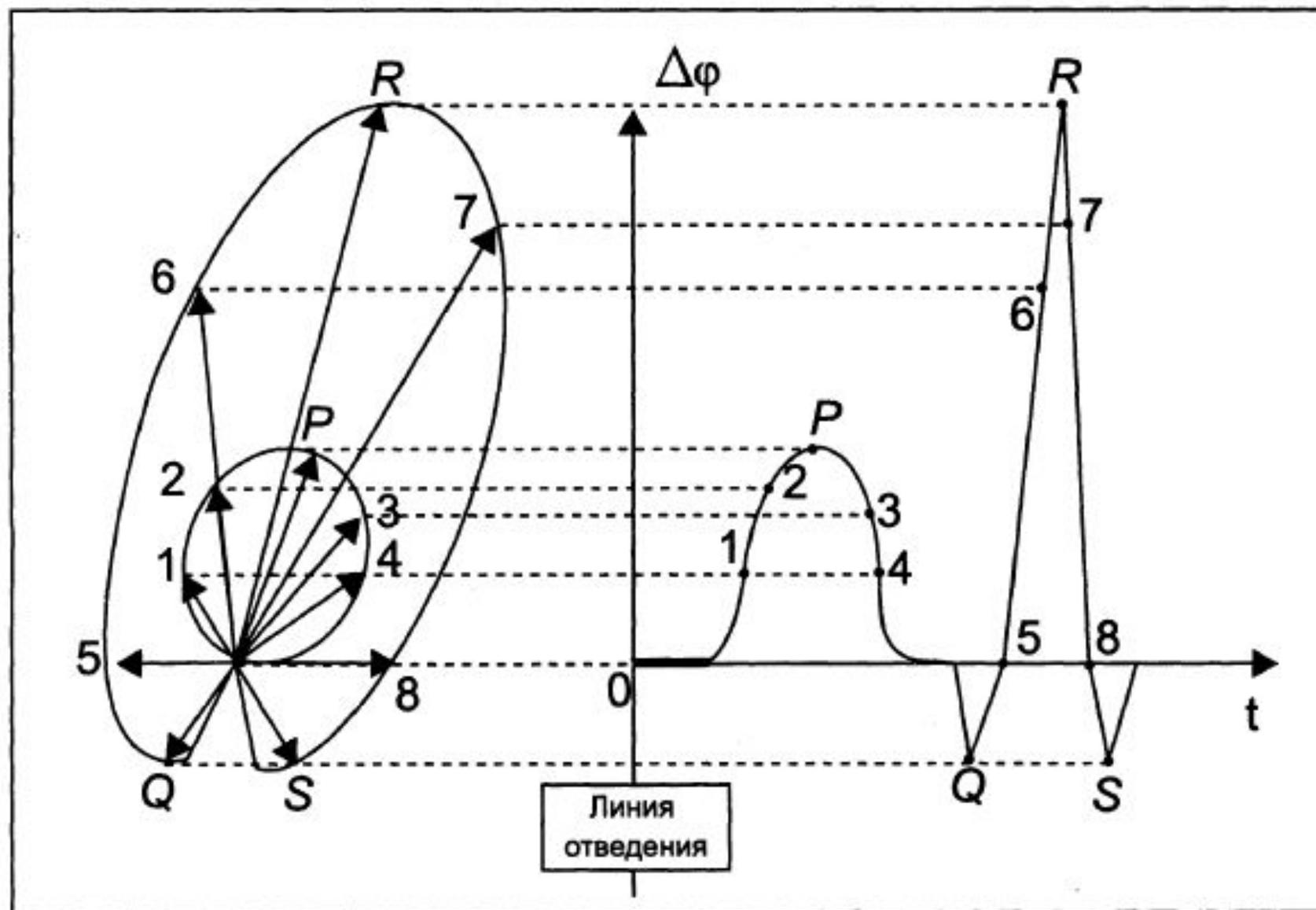
Изменение величины и направления вектора  $D$  за 1 цикл сокращения сердца объясняется последовательностью распространения волн возбуждения по сердцу.

Эйнтховен предложил измерять разности потенциалов между двумя точками из трех, представляющими вершины равностороннего треугольника, в центре которого находится начало ИЭВС.

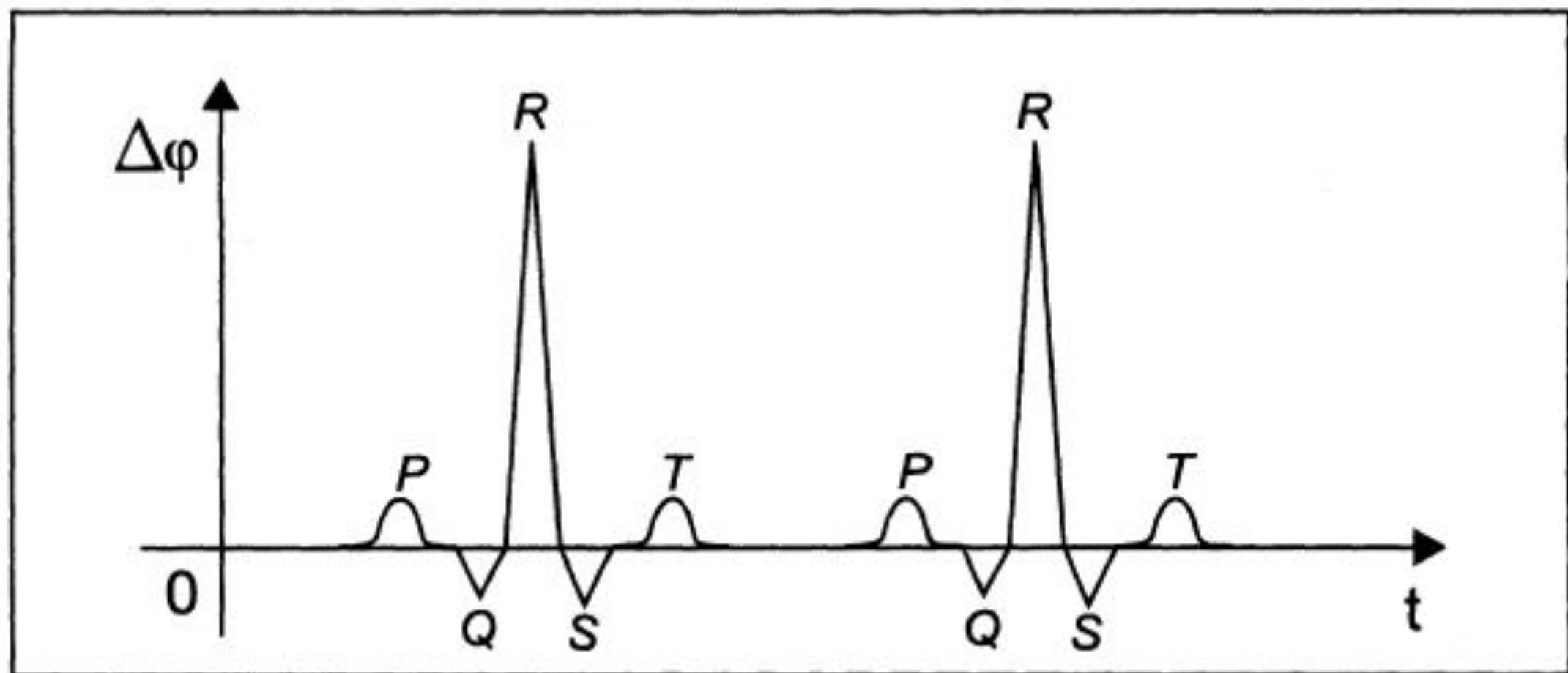
В практике электрокардиографии разности потенциалов измеряют между левой рукой (ЛР) и правой рукой (ПР) — I отведение, между левой ногой (ЛН) и правой рукой (ПР) — II отведение, между левой ногой (ЛН) и левой рукой (ЛР) — III отведение. Руки и ноги рассматриваются как проводники, отводящие потенциалы от вершин треугольника Эйнтховена, располагающихся у мест прикрепления конечностей к туловищу.

Связь между ИЭВС и разностью потенциалов показана на рис. XIII.3. Цифрами 1, 2, 3 и т.д. показаны последовательные положения конца ИЭВС и соответствующие им разности потенциалов (петля  $T$  не показана).

Реальная ЭКГ как зависимость разности потенциалов в том или ином отведении от времени показана на рис. XIII.4.



**Рис. XIII.3.** Связь между проекцией электрического вектора сердца на линию отведения и разностью потенциалов  $\Delta\phi$  (линия отведения совпадает с осью ординат приведенного графика): схематичное изображение.



Линейная ЭКГ состоит из зубца *P*, комплекса зубцов *QRS* и зубца *T*. Эти зубцы разделены участками нулевого потенциала.

Зубец *P* возникает приблизительно за 0,02 с до начала сокращения предсердий, отражает деполяризацию предсердий и инициирует их сокращение. Комплекс *QRS* отражает деполяризацию желудочков (зубец *Q* отражает деполяризацию межжелудочковой перегородки, *R* — деполяризацию основной массы миокарда желудочков, *S* — деполяризацию базальных отделов — основания желудочков). Зубец *T* отражает реполяризацию желудочков.

Конечно, 3 отведения не дают полной информации о функционировании сердца. В современной диагностической практике используют 12 обычных и ряд специальных отведений. В дальнейшем вы познакомитесь с конкретными методами расшифровки ЭКГ, узнаете, какие особенности временной зависимости разности потенциалов между двумя точками поверхности тела человека имеют диагностическое значение.

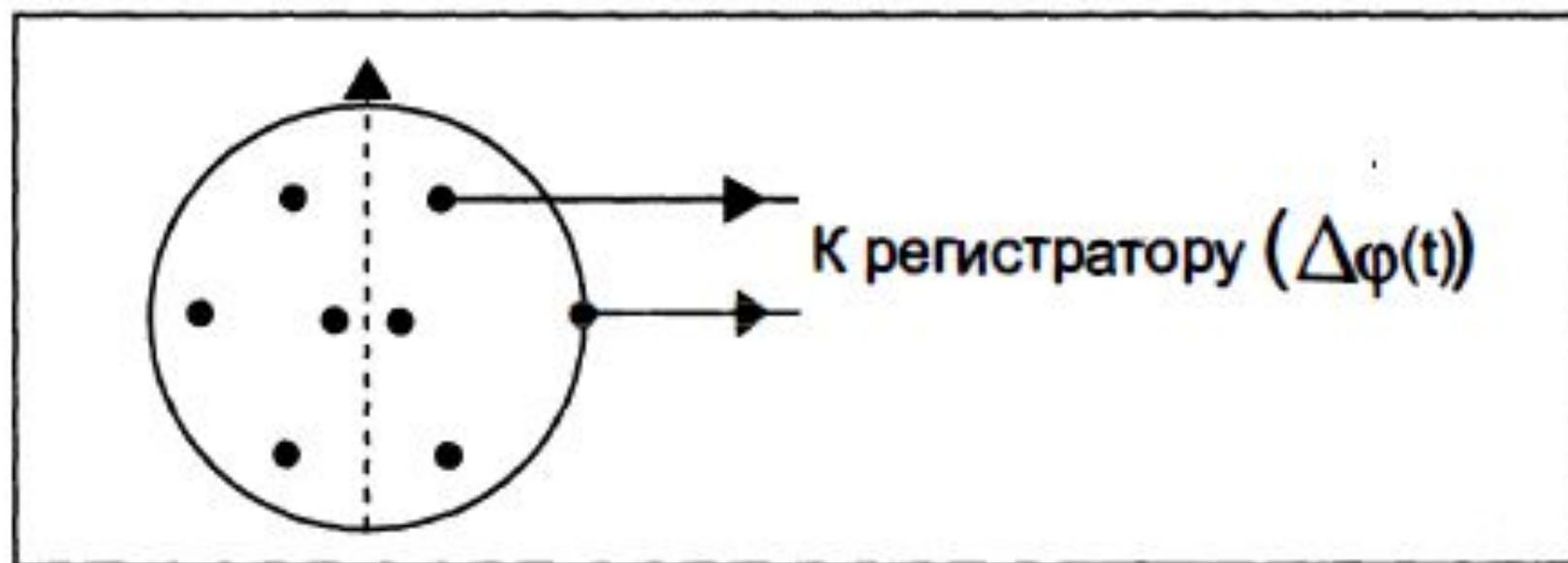
### **XIII.3. Электрическая активность головного мозга. Электроэнцефалография (ЭЭГ)**

Регистрацию и анализ временных зависимостей разностей потенциалов электрических полей, созданных мозгом, используют для диагностики патологии нервной системы: травм и инфаркта мозга, эпилепсии, психических расстройств и др.

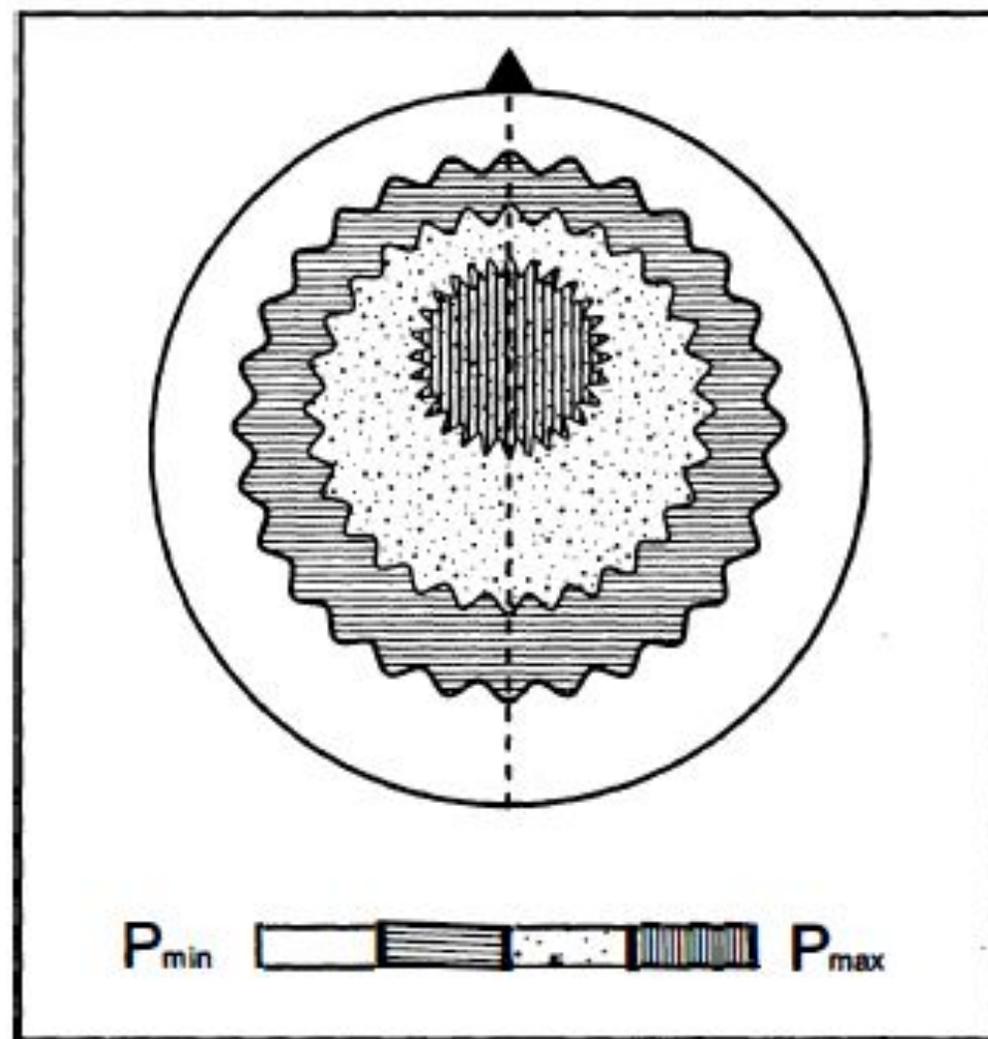
ЭЭГ – это кривая, отражающая интегральную активность огромного числа нейронов коры головного мозга и распространение волн возбуждения в нейронных сетях, представляющая собой разность потенциалов между некоторой точкой поверхности головного мозга и индифферентным электродом, расположенным за ухом (рис. XIII.5).

Это очень сложная кривая, похожая на шумовой сигнал. В процессе обработки полученных одновременно в нескольких отведениях сигналов используется их Фурье-разложение (см. раздел I) и для каждого отведения получают спектры [зависимости спектральной плотности мощности сигнала ЭЭГ ( $\frac{dP}{d\nu}$ ) от частоты]. Далее решаются задачи двух типов:

1. Находят полную мощность сигнала ЭЭГ в каждом отведении (площадь под соответствующей спектральной кривой) и строят карту распределения полной мощности по поверхности головы, присваивая каждому из интервалов, на которые разбит весь промежуток значений мощности, свой цвет или оттенок (рис. XIII.6).



**Рис. XIII.5.** Расположение электродов на голове пациента при регистрации ЭЭГ.



**Рис. XIII.6.** Условная карта ЭЭГ. На шкале, расположенной внизу, представлены интервалы, на которые разбиты все значения мощности от  $P_{\min}$  до  $P_{\max}$ , каждому из которых присвоен тот или иной тип штриховки. Аналогичной штриховкой покрыты соответствующие области поверхности головы.

2. Находят не полную мощность сигнала в том или ином отведении, а лишь мощность, соответствующую тому или иному спектральному интервалу. Эти интервалы получили название ритмов:

0,5–3 Гц —  $\delta$ -ритм;

4–7 Гц —  $\theta$ -ритм;

8–14 Гц —  $\alpha$ -ритм;

14–35 Гц —  $\beta$ -ритм;

35–70 Гц —  $\gamma$ -ритм.

Аналогично тому, как описано выше, строят цветную карту распределения мощности в выбранном спектральном интервале по поверхности коры головного мозга. Иногда врач сразу анализирует несколько карт, соответствующих разным ритмам.

# Раздел XIV. Электрические и магнитные поля организма человека

Систематическое исследование физических полей, источником которых является организм человека, проводится достаточно давно. Полученная информация уже используется в диагностических целях.

Говорят о 4 разновидностях электромагнитного поля тела человека:

- низкочастотное электрическое и магнитное поле (частота ниже  $10^3$  Гц);
- радиоволны сверхвысоких частот (СВЧ) (частота  $10^9$ – $10^{10}$  Гц и длина волны вне тела 3–60 см);
- инфракрасное излучение (частота  $10^{14}$  Гц, длина волны 3–10 мкм);
- оптическое излучение (частота  $10^{15}$  Гц, длина волны около 0,5 мкм).

В соответствии с этой классификацией начнем обсуждение с низкочастотного электрического поля. Наиболее интересными для рассмотрения его источниками являются сердце и головной мозг. Как подробно рассказано в разделе XIII, в процессе регистрации электрической активности сердца строят графики временной зависимости разности потенциалов между точками на поверхности тела человека, а при помощи электроэнцефалографии получают либо карту распределения полной мощности сигнала по поверхности головы, либо карту распределения мощности, соответствующей тому или иному заранее выбранному спектральному интервалу. При этом получают цветные изображения: весь диапазон значений мощности делится на ряд интервалов и каждому интервалу присваивается тот или иной цвет или оттенок. Цветные карты существенно облегчают диагностику.

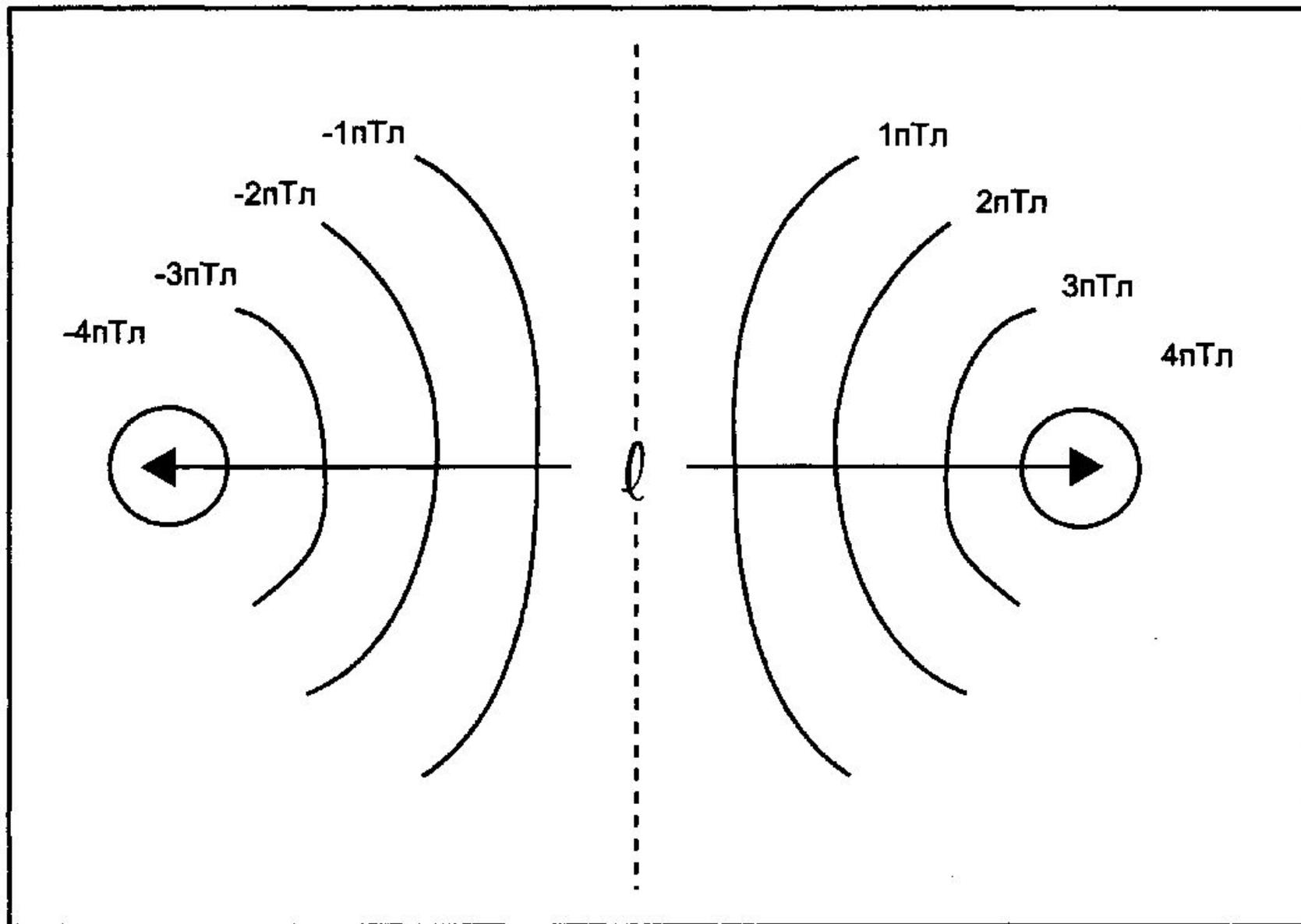
Низкочастотное магнитное поле тела человека создается токами, возникающими в процессе возбуждения клеток сердца и коры головного мозга. Одной из важных проблем является выделение слабого сигнала магнитного поля тела человека (индукция магнитного поля сердца соответствует значениям примерно  $10^{-11}$  Тл, головного мозга —  $10^{-13}$  Тл) на фоне магнитного поля Земли, индукция которого на много порядков больше ( $10^{-4}$ – $10^{-5}$  Тл). Магнитное поле Земли достаточно слабо меняется в пространстве (например, при удалении на несколько сантиметров от поверхности тела человека его изменение будет практически незаметным), а значения индукции магнитного поля сердца вблизи поверхности тела человека и в точке, удаленной на несколько сантиметров от нее, будут различаться на порядок. Поэтому, измеряя суммарное магнитное поле Земли  $B_3$  и тела человека вблизи поверхности ( $B_3 + B_1$  тела чел) и на некотором небольшом удалении ( $B_3 + B_2$  тела чел), а затем находя разность полученных значений, получают:  $B_1$  тела чел —  $B_2$  тела чел  $\approx \approx B_1$  тела чел (значение, примерно равное индукции магнитного поля тела человека на его поверхности).

В магнитокардиографии (МКГ) и магнитоэнцефалографии используют две основные формы представления полученных результатов. Традиционный способ – построение изолиний, т.е. проведение семейства кривых, соответствующих одному и тому же значению индукции магнитного поля и различающихся на постоянное значение, например 5, 10 пТл и т.д. Другой способ – это построение цветных карт (иногда эту форму картирования называют представлением в квазицвете) подобно тому, как это делают в электроэнцефалографии. Например, если имеется токовый диполь на некоторой глубине  $d$  (он расположен ниже плоскости рис. XIV.1), то в плоскости рисунка можно будет зарегистрировать магнитное поле и представить его в виде изолиний.

Если принять силу тока в находящемся на глубине  $d$  диполе направленной вниз по рисунку, то слева от пунктирной линии на рис. XIV.1 линии индукции магнитного поля тела человека будут как бы входить в плоскость рисунка, а справа выходить из нее (величины магнитной индукции условны и представлены только для наглядности). Измеряя расстояние  $l$  между экстремумами поля (см. рис. XIV.1), получим, что оно будет вдвое бóльшим глубины залегания токового диполя. Таким образом, измеряя это расстояние по карте и деля его на 2, можно решить обратную задачу: локализовать (найти глубину залегания) источник магнитного поля.

Реальным источником магнитного, как и электрического поля сердца является перемещающаяся граница области возбуждения миокарда, главным образом левого желудочка.

Модель токового диполя хорошо описывает начальную стадию возникновения магнитного поля сердца. Затем, когда возбуждение захватывает значительную область желудочка, источник становится распределенным, картина поля усложняется. Величина токового диполя увеличивается по амплитуде и перемещается в плоскости, потом источник приобретает более сложную форму, превращаясь из одного диполя в сумму нескольких (экспериментальные данные в электрокардиографии описывают с помощью модели, включающей несколько десятков подобных диполей). Достоинством МКГ является возможность локализации источников поля с точностью до 1 см.



**Рис. XIV.1.** Схематичное изображение карты магнитного поля тела человека.

Таким образом, измеряя магнитное поле, можно получить важную информацию о его источнике, а затем и диагностическую информацию.

Далее в соответствии с приведенной в начале раздела классификацией рассмотрим электромагнитное излучение в инфракрасном диапазоне и радиодиапазоне. Это тепловое излучение, о котором шла речь в разделе VII: зависимость интенсивности этого излучения от температуры позволяет с его помощью определять температуру излучающего объекта. Этот метод широко используется в медицине и носит название тепловидения.

Тепловизор состоит из сканера, измеряющего тепловое излучение в диапазоне длин волн от 3 до 10 мкм, устройства для сбора данных и ЭВМ для обработки изображения. Диапазон 3–10 мкм выбран потому, что здесь находится максимум теплового излучения тела человека и в этом диапазоне наблюдаются наибольшие различия интенсивности излучения при изменении температуры тела. Сканеры распространенных типов тепловизоров собраны по следующей схеме: тепловое излучение от разных участков тела последовательно с помощью колеблющихся зеркал проецируют на один приемник инфракрасного излучения, охлаждаемый жидким азотом. Изображение имеет формат  $128 \times 128$  или  $256 \times 256$  элементов, т.е. по четкости мало уступает телевизионному. Тепловизоры передают в 1 с 1–6 кадров. Чувствительность тепловизора при измерении 1 кадра порядка 0,1 К, но ее можно резко увеличить, используя ЭВМ для обработки изображений.

Карта теплового электромагнитного излучения в инфракрасном диапазоне также конструируется в помощью представления в квазицвете различных участков поверхности тела человека. Весь интервал значений температуры поверхности разбивают на несколько малых интервалов и каждому из них присваивают тот или иной цвет или оттенок. На экране компьютера врач видит раскрашенные в различные цвета карты и, сравнивая их с эталонными, может определить участки повышенной или пониженной температуры.

Разновидность тепловидения, при которой исследуется динамика температурных полей, иногда называют динамическим тепловидением. Обработывая последовательные термокарты, можно определить динамику температуры в каких-то интересующих точках, эволюцию во времени размеров нагретых участков кожи и т.п.

Разновидность тепловидения, при которой исследуется динамика температурных полей, иногда называют динамическим тепловидением. Обработывая последовательные термокарты, можно определить динамику температуры в каких-то интересующих точках, эволюцию во времени размеров нагретых участков кожи и т.п.

Если инфракрасное тепловидение дает возможность зафиксировать распределение лишь поверхностной температуры, то излучение СВЧ-диапазона, затухающее в теле человека гораздо слабее, дает возможность измерить и глубинную температуру. Хотя полная интенсивность теплового излучения тела человека в инфракрасном диапазоне равна примерно  $10 \text{ Вт/м}^2$ , а интенсивность в СВЧ-диапазоне в 10 000—100 000 раз ниже, тем не менее его удастся зафиксировать с помощью специальных антенн-апликаторов в виде проволочных паучков из петель стального провода размером до нескольких сантиметров.

Основной сферой практического применения СВЧ-радиометрии в настоящее время является диагностика злокачественных опухолей молочной железы, мозга, легких, а также их метастазов. При этом используют так называемые функциональные пробы — в частности, применяется, например, глюкозная проба. Пациент принимает несколько граммов раствора глюкозы, после чего начинают измерения внутренней температуры антеннами, установленными в нескольких точках на поверхности тела около исследуемого органа. Если есть злокачественные опухоли или метастазы, то после глюкозной пробы видно повышение глубинной температуры в этих областях.

Кратко обсудим излучение тела человека в оптическом диапазоне.

Оптическое излучение тела человека надежно регистрируется с помощью современной техники счета фотонов. В этих устройствах используют высокочувствительные фотоэлектронные умножители (ФЭУ), способные регистрировать одиночные кванты света и выдавать на выходе кратковременные импульсы тока, которые затем считываются с помощью специальных электронных счетчиков.

Измерения, проведенные в ряде лабораторий, показали, что  $1 \text{ см}^2$  кожи человека за 1 с спонтанно излучает во все стороны 6–60 квантов, главным образом в сине-зеленой области спектра. Светимость различных участков кожи различается: наиболее сильное излучение исходит от кончиков пальцев, гораздо слабее, например, — от живота или предплечья. Это свечение не связано с загрязнениями кожи и зависит от функционального состояния пациента, снижаясь в покое и повышаясь с увеличением активности.

Принципиально важно то, что излучение в этом диапазоне не-тепловое: если бы оно было тепловым, то с  $1 \text{ см}^2$  поверхности тела при  $T \sim 310 \text{ К}$  излучался бы лишь 1 квант в среднем за несколько секунд. Реально число квантов гораздо больше.

Наиболее вероятный механизм спонтанного свечения — это хемилюминесценция, вызванная перекисным окислением липидов. Оно сопровождается появлением радикалов — молекул в возбужденном электронном состоянии. При взаимодействии таких молекул в определенном (хотя и малом) проценте случаев происходит излучение света.