

«воздух–тело человека» и не выходят наружу в воздух из тела человека. Коэффициент отражения звуковых волн близок к единице из-за того, что плотность тканей тела человека близка к плотности воды, которая на три порядка выше плотности воздуха.

У всех наземных позвоночных существует, однако, специальный орган, в котором осуществляется хорошее акустическое согласование между воздухом и жидкой средой, – это ухо. Среднее и внутреннее ухо обеспечивают передачу почти без потерь звуковых волн из воздуха к рецепторным клеткам внутреннего уха. Соответственно, в принципе, возможен и обратный процесс – передача из уха в окружающую среду – и он обнаружен экспериментально с помощью микрофона, вставленного в ушной канал.

Источником акустического изучения мегагерцевого диапазона является тепловое акустическое излучение – полный аналог соответствующего электромагнитного излучения. Оно возникает вследствие хаотического теплового движения атомов и молекул человеческого тела. Интенсивность этих акустических волн, как и электромагнитных, определяется абсолютной температурой тела.

Рассмотрим каждый вид физических полей, создаваемых телом человека, по отдельности.

## § 51. Низкочастотные электрические и магнитные поля

Электрическое поле человека существует на поверхности тела и снаружи, вне его.

Электрическое поле вне тела человека обусловлено главным образом трибозарядами, то есть зарядами, возникающими на поверхности тела вследствие трения об одежду или о какой-либо диэлектрический предмет, при этом на теле создается электрический потенциал порядка нескольких вольт. Электрическое поле непрерывно меняется во времени: во-первых, происходит нейтрализация трибозарядов – они стекают с высокоомной поверхности кожи с характерными временами  $\sim 100 - 1000$  с; во-вторых, изменения геометрии тела вследствие дыхательных движений, биения сердца и т.п. приводят к модуляции постоянного электрического поля вне тела.

Еще одним источником электрического поля вне тела человека является электрическое поле сердца. Приблизив два электрода к поверхности тела, можно бесконтактно и дистанционно зарегистрировать такую же кардиограмму, что и традиционным

контактным методом (см. гл. 5). Отметим, что этот сигнал во много раз меньше, чем поле трибозарядов.

В медицине *бесконтактный метод* измерения электрических полей, связанных с телом человека, нашел свое применение для измерения низкочастотных движений грудной клетки.

При этом на тело пациента подается переменное электрическое напряжение частотой ~ 10 МГц, а несколько антенн-электродов подносят к грудной клетке на расстоянии 2–5 см. Антенна и тело представляют собой две обкладки конденсатора. Перемещения грудной клетки меняет расстояние между обкладками, то есть емкость этого конденсатора (см. гл. 1) и, следовательно, емкостной ток, измеряемый каждой антенной. На основании измерений этих токов можно построить карту перемещений грудной клетки во время дыхательного цикла. В норме она должна быть симметрична относительно грудины. Если симметрия нарушена и с одной стороны амплитуда движений мала, то это может свидетельствовать, например, о скрытом переломе ребра, при котором блокируется сокращение мышц с соответствующей стороны грудной клетки.

*Контактные измерения* электрического поля в настоящее время находят наибольшее применение в медицине: в кардиографии и электроэнцефалографии. Этот вопрос подробно изложен в гл. 5.

Основной прогресс в этих исследованиях обусловлен применением вычислительной техники, в том числе персональных компьютеров. Эта техника позволяет, например, получать так называемые *электрокардиограммы высокого разрешения* (ЭКГ ВР).

Как известно, амплитуда сигнала ЭКГ не более 1 мВ, а ST-сегмента еще меньше, причем сигнал маскируется электрическим шумом, связанным с нерегулярной мышечной активностью. Поэтому применяют метод накопления – то есть суммирование многих последовательно идущих сигналов ЭКГ. Для этого ЭВМ сдвигает каждый последующий сигнал так, чтобы его R-пик был совмещен с R-пиком предыдущего сигнала, и прибавляет его к предыдущему, и так для многих сигналов в течение нескольких минут. При этой процедуре полезный повторяющийся сигнал увеличивается, а нерегулярные помехи гасят друг друга. За счет подавления шума удается выделить тонкую структуру ST-комплекса, которая важна для прогноза риска мгновенной смерти.

В электроэнцефалографии, используемой для целей нейрохирургии, персональные компьютеры позволяют строить в реальном времени мгновенные карты распределения электрического поля мозга с использованием потенциалов от 16 до 32

электродов, размещенных на обоих полушариях, через временные интервалы порядка нескольких мс.

Построение каждой карты включает в себя четыре процедуры:

1) измерение электрического потенциала во всех точках, где стоят электроды; 2) интерполяцию (продолжения) измеренных значений на точки, лежащие между электродами; 3) сглаживание получившейся карты; 4) раскрашивание карты в цвета, соответствующие определенным значениям потенциала. Получаются эффектные цветные изображения. Такое представление в квазицвете, когда всему диапазону значений поля от минимального до максимального ставят в соответствие набор цветов, например от фиолетового до красного, сейчас очень распространено, поскольку сильно облегчает врачу анализ сложных пространственных распределений. В результате получается последовательность карт, из которой видно, как по поверхности коры перемещаются источники электрического потенциала.

Персональный компьютер позволяет строить карты не только мгновенного распределения потенциала, но и более тонких параметров ЭЭГ, которые давно апробированы в клинической практике. К ним в первую очередь относится пространственное распределение электрической мощности тех или иных спектральных составляющих ЭЭГ ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , и  $\theta$ -ритмы) (табл. III на форзаце). Для построения такой карты в определенном временном окне измеряют потенциалы в 32 точках скальпа, затем по этим записям определяют частотные спектры и строится пространственное распределение отдельных спектральных компонент.

Карты  $\alpha$ ,  $\delta$ , и  $\beta$  ритмов сильно отличаются. Нарушения симметрии таких карт между правым и левым полушарием может быть диагностическим критерием в случае опухолей мозга и при некоторых других заболеваниях.

Таким образом, в настоящее время разработаны бесконтактные методы регистрации электрического поля, которое создает тело человека в окружающем пространстве, и найдены некоторые приложения этих методов в медицине. Контактные измерения электрического поля получили новый импульс в связи с развитием персональных ЭВМ – их высокое быстродействие позволило получать карты электрических полей мозга.

**Магнитное поле** тела человека создается токами, генерируемыми клетками сердца и коры головного мозга. Оно исключительно мало – 10 млн. – 1 млрд. раз слабее магнитного поля Земли.

ли (табл. 12.2). Для его измерения используют квантовый магнитометр. Его датчиком является сверхпроводящий квантовый магнитометр (СКВИД), на вход которого включены приемные катушки. Этот датчик измеряет сверхслабый магнитный поток, пронизывающий катушки. Чтобы СКВИД работал, его надо охладить до температуры, при которой появляется сверхпроводимость, т. е. до температуры жидкого гелия (4 К). Для этого его и приемные катушки помещают в специальный термос для хранения жидкого гелия – криостат, точнее, в его узкую хвостовую часть, которую удается максимально близко поднести к телу человека.

В последние годы после открытия «высокотемпературной сверхпроводимости» появились СКВИДы, которые достаточно охлаждать до температуры жидкого азота (77 К). Их чувствительность достаточна для измерения магнитных полей сердца.

**Таблица 12.2. Индукция (В) магнитного организма человека и окружающей среды**

Объект	Индукция В, Тл
сердце	$10^{-11}$
мозг	$10^{-13}$
поле Земли	$5 \cdot 10^{-5}$
геомагнитный шум	$10^{-8} - 10^{-9}$
магнит ЯМР томографа	1

Как видно из табл. 12.2, магнитное поле, создаваемое организмом человека, на много порядков меньше, чем магнитное поле Земли, его флуктуаций (геомагнитный шум) или поля технических устройств. Чтобы от них отстроиться, измеряют не само магнитное поле, а его градиент, то есть его изменение в пространстве. В каждой точке пространства полная индукция В магнитного поля есть сумма индукций полей помех  $B_n$  и сердца  $B_c$ , а именно  $B = B_n + B_c$ , причем  $B_n > B_c$ . Поле помех: Земли, металлических предметов (труб отопления), проезжающих по улице грузовиков и т.д. – медленно изменяется по пространству, в то время как магнитное поле сердца или мозга спадает быстро при удалении от тела.

По этой причине индукции магнитного поля помех  $B_{n1}$  и  $B_{n2}$ , измеренные непосредственно на поверхности тела и на расстоянии, скажем, 5 см от него, практически не отличаются:  $B_{n1} = B_{n2}$ , а индукции поля  $B_{c1}$  и  $B_{c2}$ , созданного сердцем в этих же точках, отличаются почти в 10 раз:  $B_{c1} \gg B_{c2}$ .

Поэтому, если вычесть друг из друга два значения измеряемой индукции магнитного поля  $B_1$  и  $B_2$ , то разностный сигнал  $B_1 - B_2 \approx B_{c1} - B_{c2}$  практически не содержит вклада от помехи, а сигнал от сердца лишь слабо исказится. Для реализации, описанной простейшей схемы – градиометра первого порядка – можно использовать две параллельные друг другу катушки, расположенные одна за другой на расстоянии в несколько сантиметров и включенные навстречу друг другу. В настоящее время используют более сложные конструкции – градиометры второго порядка (их датчик содержит более двух катушек). Эти устройства позволяют измерять магнитоэнцефалограммы непосредственно в клинике.

*Магнитокардиограмма и динамическая магнитная карта человека.* Источник магнитного поля сердца человека тот же, что и электрического, – перемещающаяся граница области возбуждения миокарда. Различают два способа исследования этого поля: (1) измерение магнитокардиограмм (МКГ) и (2) построение динамической магнитной карты (ДМК). В первом случае измерение проводят в какой-то одной точке над сердцем, в результате получают зависимости величины магнитного поля от времени, зачастую совпадающие по форме с традиционными электрокардиограммами. Чтобы построить динамическую магнитную карту, необходимо измерить набор МКГ в разных точках над сердцем. Для этого пациента на специальной немагнитной кровати перемещают вблизи неподвижного датчика. Поле измеряется в области  $20 \times 20 \text{ см}^2$  по сетке из  $6 \times 6$  элементов, т.е. всего в 36 точках. В каждой точке записывают несколько периодов сердечного цикла, чтобы усреднить записи, затем перемещают пациента так, чтобы измерить следующую точку. Затем в определенные моменты времени, отсчитываемые от R-пика, строят мгновенные динамические магнитные карты. Каждая ДМК соответствует определенной фазе сердечного цикла.

В магнитокардиографии (МКГ) и магнитоэнцефалографии (МЭГ) используют две основные формы представления полученных результатов. Традиционный способ – это построение изолиний, то есть проведение семейства кривых, соответствующих одному и тому же значению индукции магнитного поля и различающихся друг от друга на постоянное значение, например,  $5 \text{ пТ}$  ( $1 \text{ пТ} = 10^{-12} \text{ Т}$ ):  $0 \text{ пТ}$ ,  $5 \text{ пТ}$ ,  $10 \text{ пТ}$  и т.д.

Основные медицинские применения измерений магнитных полей тела человека – это магнитокардиография (МКГ) и магнитоэнцефалография (МЭГ). Достоинством МКГ по сравнению с традиционной электрокардиографией (ЭКГ) является возможность локализовать источники поля с высокой точностью по-

рядка 1 см. Это связано с тем, что динамические магнитные карты позволяют оценить координаты токового диполя.

Рассмотрим два потенциальных приложения МКГ: 1. Локализация источников экстрасистолии. При этом заболевании источником возбуждения миокарда в некоторые моменты времени вместо соответствующих нервных центров сердца являются миоциты желудочка. При этом желудочек сокращается не в фазе с остальными камерами сердца и не обеспечивает выброс крови в кровеносные сосуды. Это приводит к расстройству кровообращения, и радикальным средством в тяжелых случаях является иссечение очага экстрасистолии путем оперативного вмешательства. Для этого очень важно иметь предварительную оценку координат очага – МКГ дает возможность провести подобное исследование. 2. Измерение электрических характеристик плода на ранних стадиях развития. Слабый электрический сигнал плода замаскирован большим кардиосигналом сердца матери, поэтому записать его электрокардиограмму крайне сложно. В то же время датчик магнитокардиографа можно поднести непосредственно к плоду и записать сигнал, на который удаленное сердце матери не окажет существенного влияния.

Таким образом, регистрация магнитных полей человека позволяет получить новую информацию, дополнительную к той, которую дают измерения электрических полей.

## § 52. Инфракрасное излучение

Наиболее яркую информацию о распределении температуры поверхности тела человека и ее изменениях во времени дает метод динамического инфракрасного тепловидения. В техническом отношении это полный аналог телевидения, только датчик измеряет не оптическое излучение, отраженное от объекта, которое видит человеческий глаз, как в телевидении, а его собственное, не видимое глазом, инфракрасное излучение. 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, как видно из рис. 12.2, именно в этом диапазоне наблюдаются наибольшие отличия интенсивности излучения при изменении температуры тела. Простейшие сканеры собраны по следующей схеме: тепловое излучение от разных участков тела последовательно, с помощью колеблющихся зеркал, проецируют на один приемник инфракрасного излучения,