

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,

охлаждаемый жидким азотом. Изображение имеет формат 128 x 128 элемента или 256 x 256, то есть по четкости мало уступает телевизионному. Тепловизоры передают в 1 секунду 16 кадров. Чувствительность тепловизора при измерении одного кадра – порядка 0,1 К, однако ее можно резко увеличить, используя ЭВМ для обработки изображений.

**Особенности обработки и представления тепловизионного изображения.** Тепловизионное изображение можно выводить в черно-белом либо цветном формате. Перепады температуры, которые нужно измерять на термограмме, составляют, как правило, доли градуса, в то время как полный сигнал соответствует приблизительно 300 К, т. е. исходное изображение обладает малым контрастом и его необходимо обрабатывать. Без предварительной обработки на ЭВМ полученная картина неинформативна. ЭВМ позволяет делать следующие операции обработки изображения: 1) усреднение; 2) изменение контраста полученных изображений; 3) раскраску в квазицвет контрастированных изображений.

Используют два метода усреднения: по пространству и по времени (накопление). В первом случае в полученной карте вместо температуры каждого участка изображения записывают среднюю температуру нескольких соседних точек. Во втором случае суммируют несколько кадров, снятых друг за другом. В обоих случаях случайные шумы подавляются, и полезный сигнал становится более четким. Поскольку тепловые поля во времени меняются достаточно медленно, а их пространственные границы редко бывают резкими, эти методы обработки изображений позволяют значительно поднять чувствительность тепловизоров, которая может достигать нескольких тысячных долей градуса, и в то же время не очень портят качество изображения.

Контрастирование изображения и раскраска в квазицвет дают возможность усилить восприятие величины тепловых контрастов. Роль раскраски изображения мы обсудили выше. Остановимся на контрастировании. Контрастированием называется уменьшение диапазона измеряемой величины, которому соответствует полный масштаб изменения яркости или цветовой палитры. Пусть, например, изображение было раскрашено так, чтобы интервалу температур 1 К со средним значением  $T_0$  соответствовало изменение цвета от фиолетового до красного, причем средней температуре изображения  $T_0$  – условному нулю – соответствовал зеленый цвет. Тогда цвет более холодных участков с температурой от  $T_0$  до  $-0,5$  К сдвинут к фиолетовому, более

теплых – от  $T_0$  до  $+0,5 \text{ К}$  – к красному. В этом случае малое изменение температуры, например на  $0,05 \text{ К}$ , проявляется на изображении в виде изменения оттенков зеленого цвета. Если же изображение контрастировать в 4 раза – растянуть его масштаб так, чтобы вся палитра соответствовала не  $1 \text{ К}$ , а  $0,25 \text{ К}$ , то перепаду температуры  $0,05 \text{ К}$  будет соответствовать контраст зеленый-оранжевый – хорошо различимый глазом.

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

**Тепловидение в биологии и медицине.** Наиболее яркий результат применения тепловидения в биологии (это обнаружение и регистрация пространственного распределения температуры коры головного мозга животных – родился фактически новый раздел физиологии – термоэнцефалоскопия). Для измерений тепловизор наводят на поверхность черепной коробки, с которой предварительно снимают скальп.

В таблице V на форзаце приведены термокарты мозга крысы при зрительной стимуляции левого глаза короткой вспышкой света. Полный перепад температуры составил  $0,1 \text{ К}$ . Видно, что через  $2,6 \text{ с}$  после начала стимуляции появляются очаги тепла в правом и левом полушариях. Первый очаг интенсивно разогревается и увеличивает свои размеры. Через  $7-8 \text{ с}$  начинается разогрев и левого очага. Через  $10 \text{ с}$  возбуждение охватывает большую часть поверхности коры мозга.

Термоэнцефалоскопия позволила «увидеть» волны, распространяющиеся по поверхности коры головного мозга. Один из типов волн – волна распространяющейся депрессии (РД) – возникает при инъекции раствора КСИ и движется со скоростью  $3-5 \text{ мм/мин}$ . Оказалось, что волна РД, которую ранее регистрировали только в отдельных точках коры с помощью электродов, сопровождается интенсивной тепловой волной. Последняя видна как локальное увеличение температуры (до  $1 \text{ К}$ ), длится существенно дольше, чем электрическая волна, и вызвана генерацией тепла в клетках коры мозга.

К сожалению, тепловые карты мозга человека можно получить только в ходе нейрохирургических операций на открытом мозге, поскольку из-за сильного поглощения ИК-излучения скальп и толстая черепная коробка оказываются непреодолимой преградой для сигналов из мозга.

Инфракрасное тепловидение тела человека дает информацию о температуре верхних слоев кожи – рогового слоя эпидермиса и некоторых подлежащих слоев общей толщиной около 100 мкм, поскольку, как показано специальными измерениями, электромагнитные волны ИК-диапазона затухают, пройдя в биологических тканях расстояние всего около 100 мкм. Температура этого слоя определяется балансом тепла за счет его отдачи в окружающую среду и притока за счет крови, притекающей из теплового ядра организма. Поэтому фактически ИК-тепловидение это способ оценить кожный кровоток в различных участках тела.

Наиболее распространенным применением ИК-тепловидения в медицине является визуализация кровоснабжения нижних конечностей. Если кровоснабжение в них нарушено, то температура дистальных участков резко снижена. Регистрируя размер областей со сниженной температурой, можно определить степень выраженности заболевания, а также эффективность терапевтических мероприятий.

Динамическое тепловидение позволяет отследить изменения температуры тела при различных дозированных воздействиях – функциональных пробах. Например, после снятия одежды кожа пациента оказывается в ином температурном режиме, и происходит длительная (15–20 мин) адаптация. Динамика измерения температуры тела в этот период служит критерием нормального функционирования системы терморегуляции. Плавное монотонное изменение температуры – обычная нормальная реакция, отсутствие динамики – свидетельство неблагополучия. Таким образом, например, контролируют развитие болезни Рейно, при которой нарушается терморегуляция: снижение температуры в комнате вызывает закономерное снижение температуры кожи здоровых испытуемых и не оказывает воздействие на больных этой болезнью. Отсутствие динамики при такой пробе характерно и для больных с поврежденной вследствие травмы иннервацией конечности.

Метод динамического тепловидения открыл возможности визуализировать реакцию организма в зонах Захарьина–Геда. В прошлом веке русский врач Захарьин и австрийский ученый Гед обнаружили, что определенные участки поверхности тела сигнализируют о неблагополучии в соответствующем ему внутреннем органе. В частности, при сердечной недостаточности боль ощущается с левой стороны и отдает в левую руку. Однако границы этих областей удаётся оконтурить с большим трудом, так как приходится опираться лишь на субъективные ре-

акции пациентов. Использование тепловидения основано на том, что в случае болевой реакции какого-либо органа на функциональную пробу возникает сосудистая реакция в соответствующей зоне Захарьина–Геда – это приводит к изменению локальной температуры кожи.

### § 53. Электромагнитные волны СВЧ-диапазона

Интенсивность излучения волн СВЧ-диапазона за счет теплового движения ничтожна. Как можно рассчитать из рис. 12.2, или непосредственно из формулы Планка, при перепаде температуры относительно окружающей среды на 1 К она составляет всего  $2 \cdot 10^{-13}$  Вт/м<sup>2</sup>. Как заметил академик Ю.В. Гуляев, по своей интенсивности это соответствует свету свечи, помещенной на расстояние свыше 10 км.

Эти волны в теле человека затухают слабее, чем инфракрасное излучение. Поэтому с помощью приборов для измерения слабых электромагнитных полей этого диапазона частот, так называемых СВЧ-радиометров, можно измерить температуру в глубине тела человека.

Волны из тела человека принимают посредством контактной антенны – аппликатора. Дистанционные измерения в этом диапазоне, к сожалению” практически невозможны, так как волны, выходящие из тела, сильно отражаются обратно от границы тело–воздух.

Главная трудность при анализе измерений глубинной температуры по радиотепловому излучению на его поверхности состоит в том, что трудно локализовать глубину источника температуры. Для ИК-излучения эта проблема не возникает: излучение поглощается на глубине 100 мкм, так что его источником однозначно является поверхность кожи. Радиоволны СВЧ-диапазона поглощаются на расстоянии, которое составляет несколько см.

Средняя глубина, с которой измеряется температура, определяется глубиной проникновения  $d$ . Она зависит от длины волны и типа ткани (рис. 12.3). Чем больше в ткани воды (электrolита), тем с меньшей глубины можно измерить температуру: в жировой ткани с низким содержанием воды  $d = 4 - 8$  см, а в мышечной ткани (с высоким содержанием воды) эта величина уменьшается до значений  $d = 1,5 - 2$  см.

Оптимальными для измерения глубинной температуры являются радиометры с длиной волны в свободном пространстве  $\lambda = 20 - 40$  см: у более коротковолновых устройств глубина про-