

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/м². Как заметил академик Ю.В. Гуляев, по своей интенсивности это соответствует свету свечи, помещенной на расстояние выше 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 источник 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 (электролита), 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-

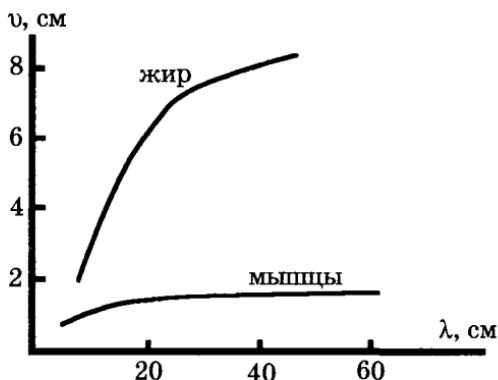


Рис. 12.3. Зависимость глубины проникновения v дециметровых волн от длины волны λ в свободном пространстве для тканей, содержащих много электролита (мышцы) и мало (жировая ткань)

никновения снижается до нескольких миллиметров, то есть они фактически, так же как и ИК-тепловизоры, измеряют температуру кожи, а у более длинноволновых радиометров ($\lambda = 60$ см) слишком велик размер антенны и мала пространственная разрешающая способность.

Хотя метод СВЧ-радиометрии измеряет среднюю по глубине температуру в теле человека, сейчас известно, какие органы могут менять температуру, и поэтому можно однозначно связать изменения температуры с этими органами. Например, изменение температуры во время мышечной работы, очевидно, связано именно с мышечной тканью, изменения глубинной температуры головного мозга, которые достигают 1–2 К, определяются его корой.

Механизмы изменения температуры в теле человека. Тепловой баланс каждого участка тела поддерживается за счет трех факторов: 1) генерации тепла вследствие метаболизма; 2) обмена теплом с соседними участками тела из-за термодиффузии; 3) конвективного теплообмена посредством кровотока, то есть за счет притока и оттока тепла с кровью. За счет конвективного теплообмена одни ткани могут нагреваться, а другие охлаждаться. Температура крови, притекающей по артериям в различные органы, определяется температурой «теплового ядра» тела (фактически грудной клетки) и составляет около 37 °С.

Кровь, притекающая в покоящиеся мышцы (их температура около 35,5 °С), вызывает их нагрев. Напротив, температура мозга из-за активной работы нейронов ближе к 38 °С, т.е. при-

текающая кровь его охлаждает. В силу этого различия временное прекращение кровотока приводит к охлаждению мышцы и, наоборот, к нагреву мозга.

В качестве примера физиологических исследований приведем временную зависимость глубинной температуры мышцы под действием мышечной работы. Глубинная температура бицепса человека в покое составляет около $35,5^{\circ}\text{C}$, после начала совершения мышечной работы рост температуры (кривая 1, рис. 12.4) начинается не сразу, а после некоторой задержки – латентного периода, равного 20 – 30 с. Подъем температуры связан с увеличением кровотока и метаболизма в мышце и продолжается после окончания работы.

Существенно, что этот подъем температуры не прекращается в момент окончания работы, он длится еще некоторое время, а лишь потом наступает медленный спад. Если на руку предварительно наложить жгут и остановить кровообращение, то и в этом случае при работе температура бицепса растет, однако медленнее (кривая 2). Из этих данных вытекает ряд важных данных о работе мышц человека. Во-первых, собственно сокра-

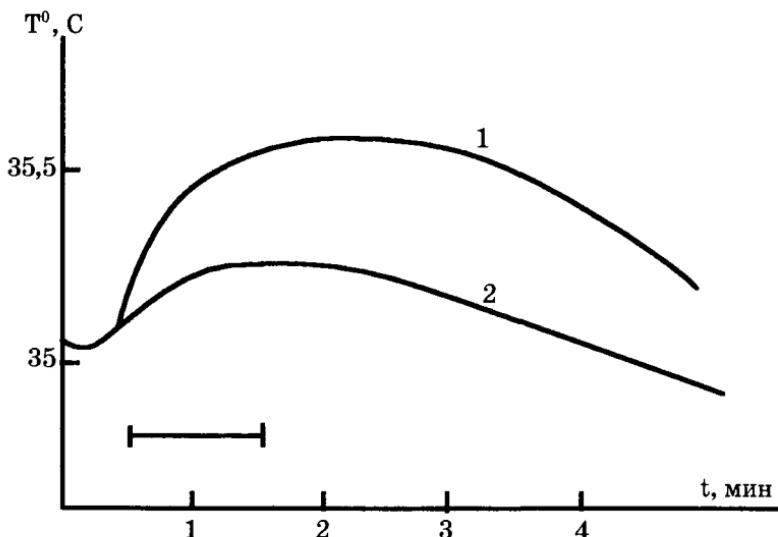


Рис. 12.4. Зависимость глубинной температуры T бицепса человека после начала совершения работы по периодическому подъему груза массой в несколько кг с частотой около 1 раза в секунду (кривая 1) (время, в течение которого совершалась работа, показано внизу чертой). Кривая 2 – то же, но при наложенном жгуте и остановленном кровотоке

тительная система мышцы – миофибриллы – имеет высокий коэффициент полезного действия, об этом говорит отсутствие роста температуры во время латентного периода, когда мышца использует готовый запас макроэргов: АТФ и креатинфосфата. Во-вторых, главное повышение температуры связано не с совершением работы, а с теплопродукцией, обусловленной энергетическим обеспечением синтеза АТФ в работающей мышце и после окончания работы; равным образом ответственно за рост температуры и увеличение кровотока.

Применение СВЧ-радиометрии в медицине. Основными сферами практического применения СВЧ-радиометрии в настоящее время представляются диагностика злокачественных опухолей различных органов: молочной железы, мозга, легких, метастазов, а также функционального состояния коры головного мозга. При этом используют так называемые функциональные пробы: воздействия, вызывающие известный отклик организма. В этом качестве 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 увеличение глубинной температуры тела в этих областях.

Возможный биофизический механизм повышения температуры связан с тем, что глюкоза активно усваивается клетками. Эффективность преобразования глюкозы в АТФ в раковых клетках значительно ниже, чем у здоровых: из одной молекулы глюкозы в раковых клетках синтезируется 2 молекулы АТФ, а в здоровых – 38. Поэтому раковым клеткам необходимо переработать гораздо большее количество глюкозы. Поскольку коэффициент полезного действия этого процесса не превышает 50%, раковые клетки сильно разогреваются. Этот разогрев в силу физиологических механизмов индуцирует повышение температуры и близлежащих нормальных тканей. Суммарный подъем температуры регистрируется СВЧ-радиометром.

В таблице IV на форзаце приведены результаты обследования больного с заболеванием головного мозга. Температура измерялась 12-ю антеннами – их положения схематично показаны слева. Динамика изменения температуры в одной из точек показана справа. Спустя 4 мин после начала измерения (цифра 2 в квадратике справа) началась гипервентиляционная проба – по команде больной начал часто и глубоко дышать. Спустя 1,5 мин проба была окончена (цифра 3). Как видно из таблицы, во время

пробы слева в теменной области (антенна № 6) наблюдался рост температуры на 2 К – после окончания пробы он сменился резким спадом. Слева в таблице приведена температурная карта, построенная в момент окончания пробы, – очевидна резкая неоднородность температуры коры. Подобные сильные изменения температуры у здоровых испытуемых не наблюдаются. Таким образом СВЧ-радиометрия выявляет тонкие изменения функциональных особенностей головного мозга.

§ 54. Оптическое излучение тела человека

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 считаются с помощью специальных электронных счетчиков.

Измерения, проведенные в ряде лабораторий, показали, что 1 см² кожи человека за 1 с спонтанно излучает во все стороны 6 – 60 квантов, главным образом, в сине-зеленой области спектра. Светимости различных участков кожи отличаются – наиболее сильное излучение исходит от кончиков пальцев, гораздо слабее, например, от живота или предплечья. Это свечение не связано с наличием загрязнений на коже и зависит от функционального состояния пациента, снижаясь в покое и повышаясь с ростом его активности.

Можно индуцировать свечение кожи, например, с помощью обработки ее перекисью водорода или воздействия на кожу предварительной засветкой. Сильное последействие – фосфоресценцию – вызывает излучение на длине волн 254 нм, соответствующее пику поглощения ДНК. Предварительная засветка вызывает рост свечения в тысячи раз, которое затем спадает во времени по сложной кинетической кривой с несколькими постоянными временем от единиц до десятков минут.

Оптическое излучение кожи не является тепловым. Интенсивность теплового излучения в оптическом диапазоне ничтожна – с 1 см² поверхности тела один квант в среднем может излучаться лишь за много секунд.

Наиболее вероятный механизм спонтанного свечения – это хемилюминесценция, вызванная перекисным окислением липидов, которое сопровождается появлением радикалов, т.е. молекул в возбужденном электронном состоянии. При взаимодействии