

ОПТИЧЕСКИЙ ДИАПАЗОН ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Оптический диапазон электромагнитного излучения включает инфракрасное, видимое и ультрафиолетовое излучение.

Каждое из них занимает определенный энергетический диапазон на общей шкале электромагнитного излучения.

Несмотря на близость этих диапазонов, данные виды излучения имеют много специфических свойств, которые наиболее ярко проявляются при их взаимодействии с веществом. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть каждое из них отдельно.

Инфракрасное излучение

Общие характеристики ИК

Инфракрасное (ИК) излучение, открытое в 1800 г. английским ученым В. Гершелем, занимает спектральную область между красной границей видимого излучения ($\lambda = 740$ нм) и коротковолновым радиоизлучением ($\lambda = 1 - 2$ мм).

Этот интервал электромагнитного излучения условно подразделяется на три области: ближняя (0,74 – 2,5 мкм), средняя (2,5 – 50 мкм) и далекая (50 – 2000 мкм).

Диапазон ИК-излучения в сотни раз шире области видимого света.

Спектр ИК-излучения (как и видимого излучения) может быть линейчатым (излучение возбужденных атомов и ионов, т.е. атомные спектры), непрерывным (спектры излучения нагретых твердых и жидких тел) и полосатым (излучение возбужденных молекул, т.е. молекулярные спектры).

Свойства веществ (прозрачность, коэффициенты отражения и преломления), проявляющиеся при взаимодействии с видимым светом или ультрафиолетом, существенно отличаются при облучении их ИК-излучением.

Многие вещества, прозрачные для видимого света, оказываются непрозрачными для ИК-излучения и наоборот. Например, несколько сантиметров воды практически полностью поглощают ИК-излучение с $\lambda > 1$ мкм, а пластинки Ge (германий) и Si (кремний) в отличие от видимого света прозрачны для ИК-излучения. Такие вещества используют в качестве светофильтров при выделении ИК-излучения.

Отражательная способность большинства металлов для ИК-излучения значительно выше, чем для видимого света и возрастает с увеличением длины волны λ . Для Al (алюминия), Au (золота), Ag (серебра) и Cu (меди) коэффициент отражения достигает 98 % при $\lambda = 10$ мкм. Для сложных веществ коэффициент отражения ИК-излучения имеет селективный характер и зависит от их химического состава.

Источники ИК-излучения

Одним из естественных и наиболее мощных источников ИК-излучения является Солнце. Около 50 % его излучения лежит в ИК-области. Однако атмосфера Земли селективно поглощает это излучение за счет наличия в ней таких веществ, как H₂O, CO₂, O₂ и др.

Любое нагретое тело – источник электромагнитного излучения. Свечение тел, обусловленное их нагревом, называется *тепловым излучением*. Интенсивность теплового излучения возрастает с повышением температуры.

Интегральная излучательная способность абсолютно «черного» тела пропорциональна четвертой степени температуры (закон Стефана-Больцмана – 1879 г.):

$$R_e = \sigma T^4$$

R_e – энергетическая светимость

$$\sigma = 5,9996 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \quad \text{– постоянная Стефана – Больцмана}$$

T – температура, К.

Регистрируя тепловой поток от отдельных участков поверхности тела, можно определить распределение температуры по поверхности исследуемого объекта.

Согласно закону смещения Вина, длина волны, соответствующая максимальному значению излучающей способности абсолютно «черного» тела, обратно пропорциональна его абсолютной температуре :

$$\lambda_{\text{макс}} = \frac{b}{T}$$

$b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ – постоянная Вина

Закон смещения Вина объясняет, почему при понижении температуры нагретых тел в их спектре все сильнее преобладает длинноволновое излучение.

Таким образом, определяя значение $\lambda_{\text{макс}}$

в распределении излучающей способности тела в зависимости от длины волны, можно также вычислить температуру тела.

Лампы накаливания.

Типичными источниками теплового излучения, что позволяет широко применять их в спектроскопии, являются лампы накаливания. В качестве нагреваемого тела в них используется вольфрамовая нить, излучение которой близко к излучению абсолютно «черного» тела. Рабочая температура вольфрамовой нити составляет 2200 – 3000 К.

Лампы накаливания могут работать при питании как постоянным, так и переменным током. Однако для обеспечения их надежной работы более предпочтительным является питание стабилизированным постоянным током.

Спектральное распределение потока излучения вольфрамовой нити при температуре 2450 К.

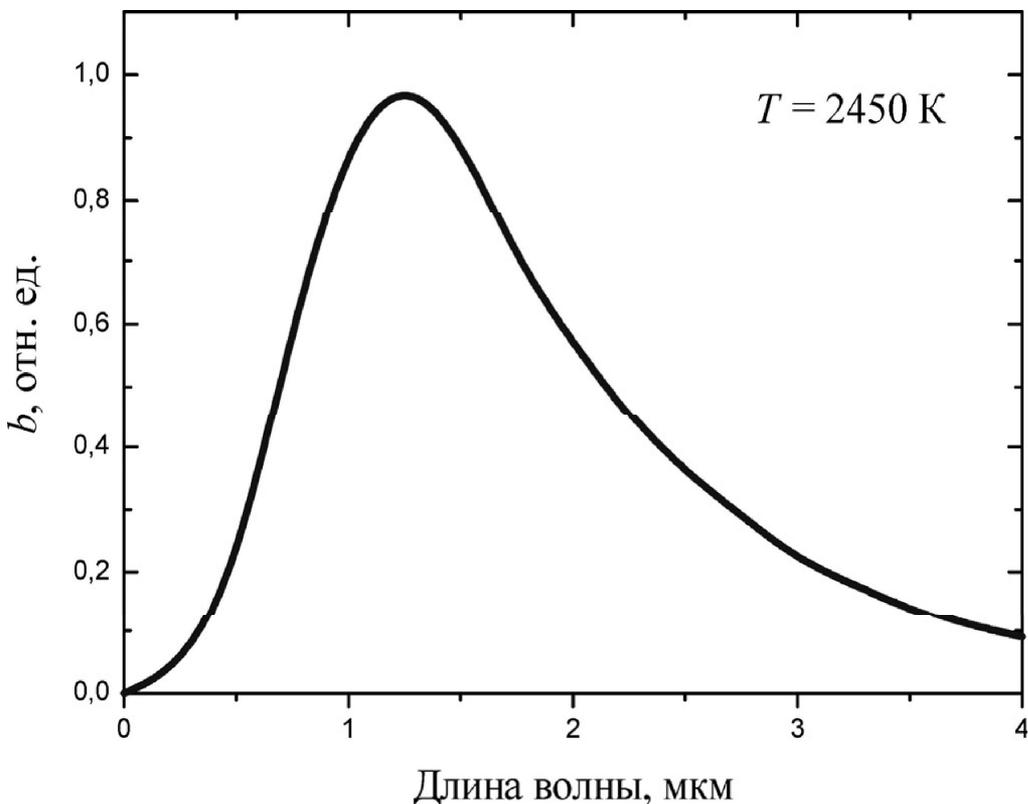


Рис. Распределение энергии излучения в спектре вольфрамовой лампы

Общий поток излучения лампы накаливания зависит от ее электрической мощности, измеряемой в ваттах, и температуры нити накала. Это излучение имеет непрерывный спектр, причем в ультрафиолетовой области энергия, испускаемая лампой, очень мала, а ее максимум приходится на красную часть спектра. У всех ламп накаливания на излучение в видимой области спектра расходуется всего 4 – 5 % подводимой к ним электрической энергии. Остальная часть расходуется на нагрев ее элементов и тепловое излучение.

Глобары и штифты Нернста.

Тепловыми источниками ИК-излучения также являются глобары и штифты Нернста. Они используются для оптических исследований в ИК-области спектра.

Силитовый излучатель (глобар) – стержень, изготовленный из карбида кремния.

На концах глобара имеются алюминиевые электроды.

Рабочее напряжение глобара 30 – 50 В.

Рабочая температура глобара – 1300 К.

Штифт Нернста - небольшой стержень, изготовленный из оксида циркония с примесью оксидов иттрия, тория или церия.

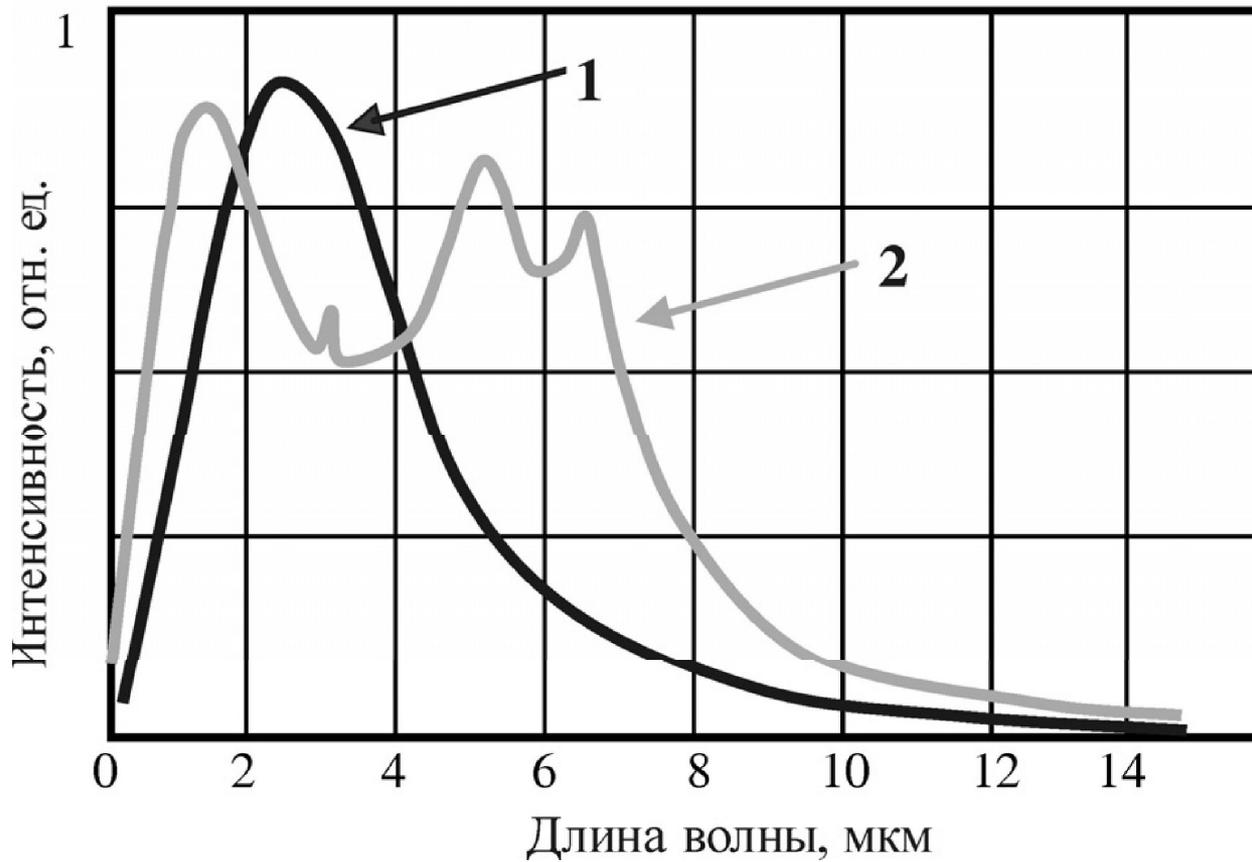
На концах штифта Нернста имеются платиновые электроды.

Рабочее напряжение для штифта Нернста выше 100 В.

Рабочая температура штифта Нерста – 1700 К.

В связи с тем, что при комнатной температуре штифт Нернста обладает более высоким сопротивлением, чем глобар, перед началом работы его необходимо предварительно разогреть до температуры 1000 К.

Излучательная способность глобара выше, чем штифта Нернста



Платинокерамический излучатель

С подогревом, который осуществляется спиральным нагревателем из платины. Этот излучатель представляет собой маленькую керамическую трубочку (диаметром 3 мм, длиной 40 мм), внутри которой находится нагреватель. Рабочая температура нагревателя – 1500 К, Потребляемая мощность излучателя - 50 Вт. В области длин волн 5 – 50 мкм яркость платинокерамического излучателя составляет 0,8 – 0,9 от яркости глобара. При $\lambda < 5$ мкм наблюдается спад яркости, как у штифта Нернста, до 0,2 – 0,3 от яркости глобара.

Цезиевая резонансная лампа

Для работы в инфракрасной области спектра может также применяться цезиевая резонансная лампа, в спектре излучения которой в интервале длин волн 0,84 – 0,92 мкм имеются две интенсивные перекрывающиеся линии.

Приемники ИК-излучения

Приемники ИК-излучения основаны на преобразовании энергии этого излучения в другие виды энергии, которые могут быть измерены обычными методами.

В зависимости от физических явлений, положенных в основу принципа действия, все приемники оптического диапазона электромагнитного излучения делятся на три группы: тепловые, фотоэлектрические и фотоэлектронные.

В тепловых приемниках поглощенное ИК-излучение вызывает повышение температуры термочувствительных элементов, которое и регистрируется.

В фотоэлектрических приемниках поглощенное ИК-излучение приводит к появлению или изменению электрического тока.

Фотоэлектрические приемники в отличие от тепловых являются селективными, т.е. чувствительными к определенным частям спектра. В фотоэлектронных приемниках обычно используется фотоэффект.

Существуют также различные фотоэмюльсии, чувствительные к ИК-излучению с $\lambda > 1,2$ мкм.

Болометр.

Болометр – приемник излучения, принцип действия которого основан на зависимости сопротивления материала от его температуры. Болометры могут быть металлическими (никелевые, висмутовые, золотые, платиновые), полупроводниковыми (германиевые, кремневые, оксидные на основе никеля, кобальта и марганца), диэлектрическими и сверхпроводящими.

Поверхность термочувствительного элемента покрывается специальным материалом (например, золотая чернь), обладающим сильным поглощением в ИК-области спектра.

В металлическом болометре тонкая (10 мкм) металлическая пластинка покрывается, с одной стороны, диэлектрической пленкой толщиной 0,02 – 0,03 мкм, с другой, слоем золотой черни.

Наиболее чувствительными являются полупроводниковые болометры (их чувствительность превосходит на порядок металлические). Для улучшения теплопроводности полупроводниковый элемент толщиной 10 – 20 мкм наклеивается на массивную диэлектрическую подложку (обычно из кристаллического кварца).

На поверхность полупроводника напыляется поглощающий слой.

Полупроводниковый болометр

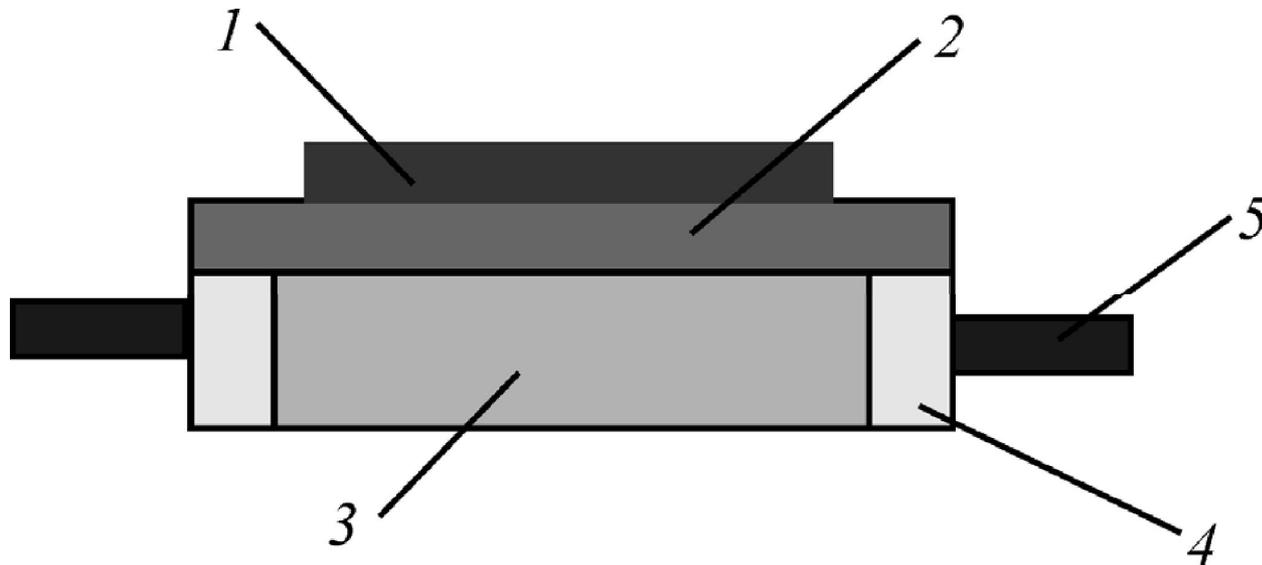


Рис. Устройство полупроводникового болометра:
1 – приемный поглощающий слой; 2 – токопроводящий слой; 3 – подложка; 4 – колодка; 5 – выводы

Вследствие того, что в области перехода в сверхпроводящее состояние температурные коэффициенты сопротивления материалов могут достигать тысячи процентов на градус, сверхпроводящие болометры обладают очень высокой чувствительностью.

Их недостатком является необходимость работы при температурах близких к температуре жидкого гелия.

Термоэлементы

Принцип работы термоэлементов основывается на возникновении термоЭДС при нагревании спая двух металлов — термопары.

Величина термоЭДС зависит от материалов проводников и разности температур спаев.

Термоэлемент состоит из двух пластин, опирающиеся на термопары и находящиеся в вакуумном баллоне (~ 10 мм рт. ст.) с прозрачным к ИК-области спектра окном.

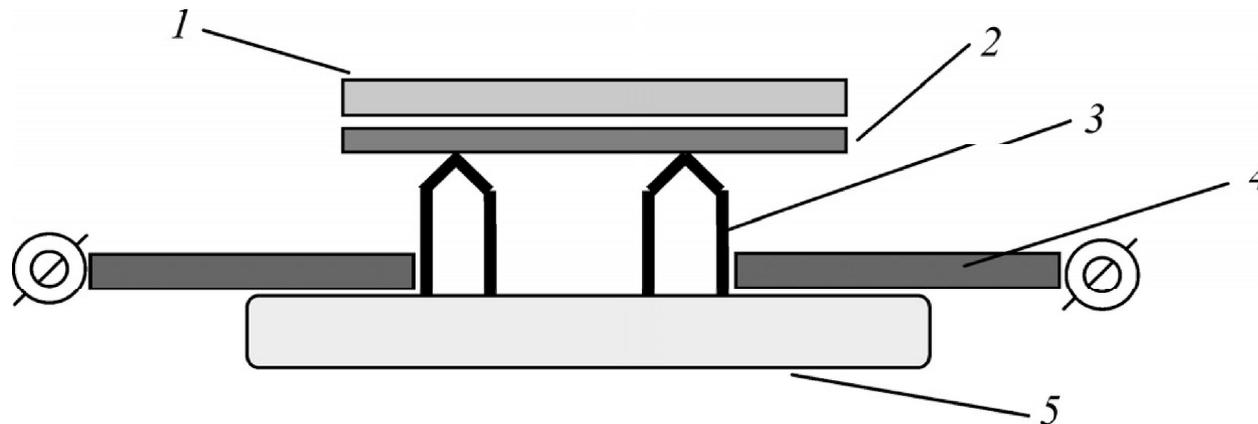


Рис. Устройство термоэлемента: 1 — поглощающий слой; 2 — металлическая пластинка; 3 — термопары; 4 — стержни из материалов, из которых изготовлена термопара; 5 — основание для крепления проводников.

Люминесцентные пленки

Люминесцентные пленки используются для получения изображения пространственного распределения температуры объекта, основанное на свойстве пленок менять цвет под действием теплового излучения.

При этом изменение цвета зависит от интенсивности теплового потока.

Однако контрастная чувствительность и пространственное разрешение таких приборов низкое.

Пироэлектрические приемники ИК-излучения

Пироэлектрические приемники являются новым поколением тепловых приемников света.

Принцип работы приемников основывается на явлении пироэлектричества, заключающееся в возникновении пироЭДС в следствии нарушения равновесия поверхностных зарядов, которое происходит из-за изменения ориентации дипольных моментов кристаллов (например, титанат бария, ниобат лития, турмалин) при их нагревании.

При подключении электродов пироэлектрического приемника к нагрузке R через нее начинает протекать ток, вызывающий падение напряжение на сопротивлении R , которое и измеряется. По величине напряжения определяют энергию и мощность излучения.

При этом значение этой величины от скорости изменения температуры, а не от температуры, как в случае других тепловых приемников.

В отличие от других приемников для работы пироэлектрических приемников не требуется источника питания, так как они сами являются генераторами ЭДС.

Тепловизоры

Они появились в различных медицинских учреждениях в конце 50-х – начале 60-х годов прошлого века и стали широко применяться для целей интроскопии.

В их конструкции используется два метода получения тепловых изображений:

1. Первый метод базируется на оптико-механической системе сканирования объекта одноэлементным приемником (или небольшим количеством одноэлементных приемников);
2. Второй – на многоэлементных приемниках с накоплением на ИК-видиконе или ИК-чувствительной ПЗС-матрице (ПЗС – приборы с зарядовой связью).

В случае видикона для получения видеосигнала осуществляется сканирование электронным лучом потенциального рельефа на чувствительной мишени. Тепловое поле объекта проецируется на мишень с помощью объектива.

Сканирующая система в каждый момент времени собирает в узком угле поля зрения на приемник ИК-излучения энергию с элемента сканирующего поля.

Оптическая система осуществляет пространственную и спектральную фильтрацию излучения и фокусировку теплового поля в плоскости чувствительной поверхности приемника.

Обзор объекта осуществляется последовательно по строкам. Электрический сигнал, возникающий в приемнике, после усиления и обработки модулирует яркость экрана на электронно-лучевой трубке, где формируется видимое изображение распределения теплового поля исследуемого объекта.

При использовании в тепловизорах ПЗС-матриц получение и обработка теплового изображения осуществляется как в обычных телевизионных установках.

Размер теплового изображения у диагностических тепловизоров совпадает с общим полем обзора, которое обычно составляет $5 - 25^\circ$.

Обычно для повышения чувствительности приемники ИК-излучения охлаждаются жидким азотом.

Тепловизоры имеют ряд преимуществ:

- абсолютная безопасность
- бесконтактное обследование
- высокая достоверность
- перед началом обследования пациента не требуется осуществлять какую-либо его специальную подготовку.

В настоящее время существует много фирм (в том числе и российских), которые производят медицинские тепловизоры.

Например, компьютеризированный тепловизор ТВ-04 «Кст» (рис.) выпускается в России компанией «Научно-исследовательский испытательный центр технического проектирования».

В институте физики полупроводников СО РАН (Новосибирск): медицинские тепловизоры ТКВр-ИФП. Эти приборы отличаются высокой надежностью в связи с отсутствием механических узлов в системе сканирования, высокой температурной чувствительностью (не хуже $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$) и пространственной разрешающей способностью, хорошим быстродействием (в реальном режиме измерений – около 20 кадров в секунду, а максимальная частота может достигать 50 кадров в секунду).



Рис. Общий вид тепловизора ТВ-04 «Кст»

Медицинский тепловизор ТКВр-ИФП предназначен для использования как в медицине, так и в промышленности для формирования теплового изображения объекта (термограммы) и измерения температуры в любой точке объекта без физического контакта с ним.

Высокое температурное разрешение и частота кадров камеры позволяют получать четкие высококонтрастные термограммы объектов в режиме реального времени.

Применение ИК-излучения в медицине

Еще древние греки использовали свойства ИК-излучения для диагностики различных заболеваний человека. Для этой цели они обмазывали его тело слоем глины и наблюдали за процессом ее высыхания. В тех местах, где обнаруживалось быстрое высыхание глины, как правило, находились очаги внутреннего воспаления.

Сегодня ИК-излучение широко используется в различных областях медицины. Даже простое измерение температуры тела пациента теперь осуществляется дистанционно с помощью приборов, имеющих ИК-датчики. Это позволило полностью заменить ртутные термометры, с которыми необходимо осторожное обращение.

Типичное распределение температуры на лице пациента, полученное с помощью тепловизоров различной чувствительностью, показано на рис.

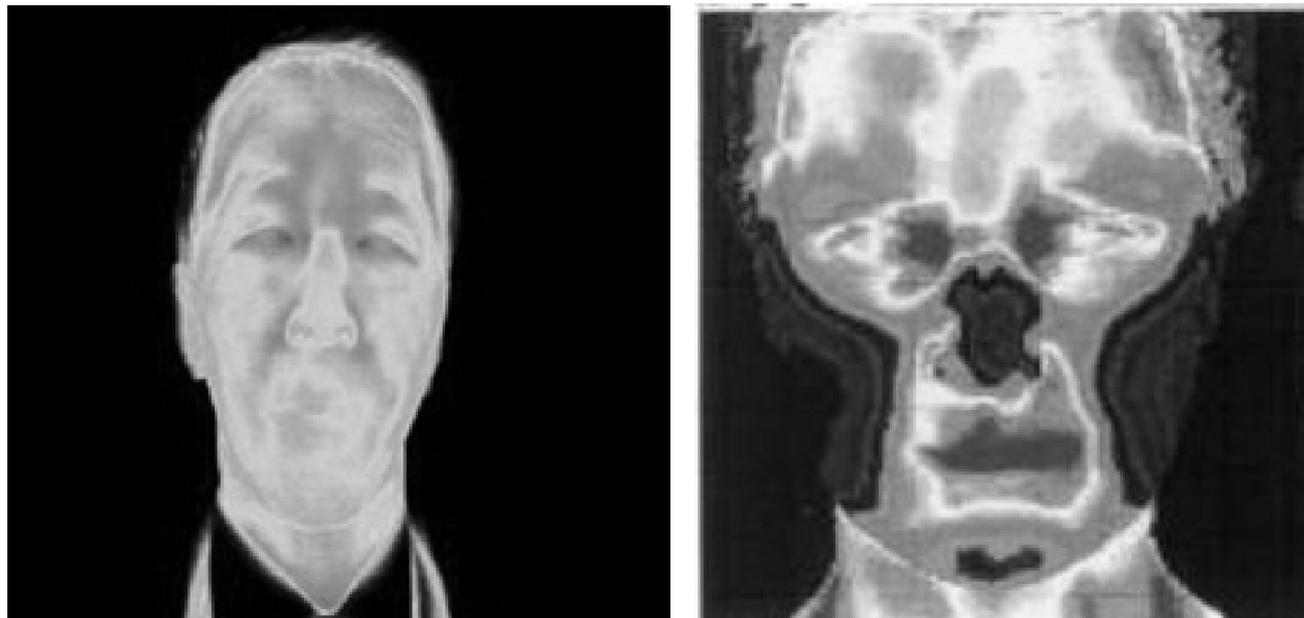


Рис. Изображение человеческого лица в инфракрасном диапазоне излучения

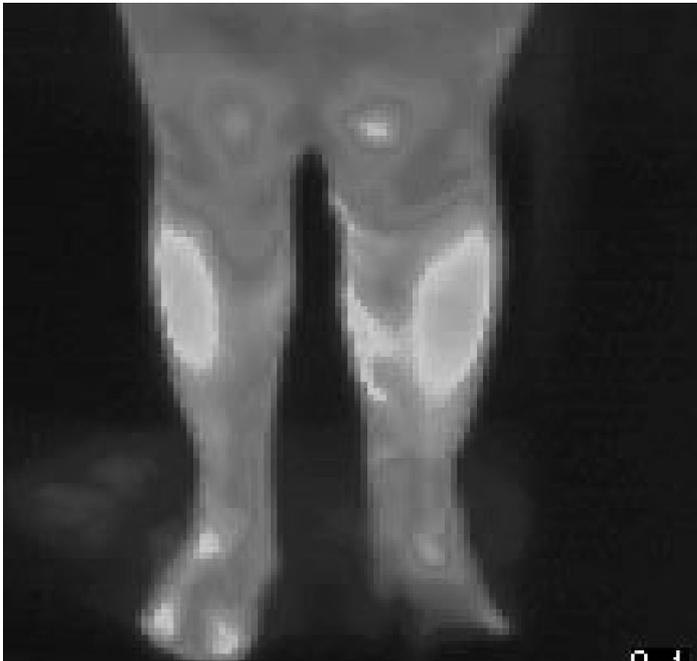
С помощью тепловизоров можно обнаружить большое число различных заболеваний.

Эти приборы широко применяют в таких разделах медицины, как:

- **онкология** (опухоли молочных желез, щитовидной железы, лимфатических узлов, костей и т.д.);
- **неврология** (патология периферических нервов конечностей, неврологические синдромы остеохондроза различных отделов позвоночника);
- **ангиология** (различные заболевания магистральных артерий и вен конечностей);
- **травматология и ортопедия** (переломы позвоночника, деформирующие артрозы крупных суставов, остеомиелиты длинных трубчатых костей на этапах лечения, ранняя диагностика глубины ожогового поражения и т.д.);
- **общая хирургия** (острая воспалительная патология брюшной полости);
- **реконструктивно-восстановительная хирургия** (диагностика жизнеспособности пересаженных и реимплантированных сегментов, трансплантатов);
- оториноларингология** (воспалительные заболевания придаточных пазух);
- эндокринология** (заболевания щитовидной железы, сосудистые и неавральные осложнения сахарного диабета).

Тепловизоры широко используются в диагностике клинических синдромов, при контроле динамики патологических процессов и эффективности проводимого лечения, при прогнозировании характера течения патологического процесса.

Можно также отметить, что ближняя ИК-область спектра (от 0,76 до 1,35 мкм) используется и для обычной подсветки глаза. В этой области спектра удается исследовать состояние радужки и зрачка при непрозрачной для видимого света роговице глаза.



В качестве примера на рис. приведено изображение, полученное с помощью тепловизора, голени пациента, страдающего сахарным диабетом.

