

**Михеев Сергей Васильевич**

# **ОСНОВЫ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ**



Санкт-Петербург  
2017

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Михеев С.В.**

## **ОСНОВЫ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ**

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлению подготовки 12.04.02 «Оптотехника» в качестве учебного  
пособия для реализации основных профессиональных образовательных  
программ высшего образования магистратуры

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург  
2017**

Михеев С.В. Основы инфракрасной техники. – СПб: Университет ИТМО, 2017. – 127 с.

**Рецензенты:**

Новиков И.А., д.ф-м.н, профессор, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Цыганок Е.А., к.т.н., доцент каф. ПиКО, Университет ИТМО

Смирнова И.Г., к.т.н., доцент каф СТО, Университет ИТМО

В учебном пособии излагаются основы тепловидения и принципы создания тепловизионных приборов. Кратко описаны все основные процессы, происходящие в системах тепловидения: принципы генерирования собственного теплового излучения нагретых тел, вклад в суммарное тепловое излучение, рассматриваются материалы, применяемые в ИК технике, приёмники излучения, методы и приёмы выделения ИК сигналов из шумов и основные принципы обработки формируемых тепловизорами изображений, особенности зрительного восприятия тепловизионных изображений и пути создания цветowych изображений, близких по восприятию к изображениям видимого диапазона спектра электромагнитных колебаний.

Рекомендовано федеральным учебно-методическим объединением в системе высшего образования по укрупненной группе специальностей и направлений подготовки 12.00.00 Фотоника, приборостроение, оптические и биотехнические системы и технологии в качестве учебного пособия для реализации образовательных программ высшего образования магистратуры по направлению подготовки 12.04.02 Опотехника. Протокол №3 от 5 декабря 2017г.



**Университет ИТМО** – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО

©Михеев С.В., 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Общие положения.....	9
1.1 Краткая история развития тепловидения.....	9
1.2 Термины и определения, применяемые в тепловидении.....	13
1.3 Энергетические величины и единицы их измерения.....	15
2 Законы теплового излучения.....	18
3 Прохождение излучения через атмосферу.....	25
3.1 Состав атмосферы.....	28
3.1.1 Влияние гидрометеоров и атмосферных газов.....	31
3.2 Методы расчёта влияния атмосферы на пропускание оптического излучения.....	34
3.2.1 Метод расчета коэффициентов пропускания по Эльдару - Стронгу.....	34
3.2.2 Метод расчета коэффициентов пропускания по Говарду, Бёрчу и Вильямсу.....	36
3.2.3 Расчета коэффициентов пропускания по методу Говарда, Бёрча и Вильямса на наклонных трассах.....	41
3.2.4 Метод стандартных атмосфер.....	41
3.2.5 Порядок расчета по методу стандартных атмосфер.....	42
3.3 Выбор спектральных диапазонов в неблагоприятных условиях наблюдения.....	43
3.4 ИК материалы.....	44
3.4.1 Выбор оптических материалов для приборов ракетной техники.....	46
3.4.2 Выбор оптических материалов для комплексированных систем ИК и ТГц каналов формирования изображений.....	49
4 Тепловизионная техника.....	52
4.1 Сканирующие и матричные тепловизоры.....	52
4.2 Схемы сканирования и типы тепловизоров.....	54
4.3 Оптические схемы объективов.....	57
4.4 Практические схемы сканирующих тепловизоров.....	67
4.4.1 Тепловизоры фирмы «АГЕМА», модели 661 и 680.....	67
4.4.2 Функциональная схема тепловизора «Рубин».....	68
4.5 Приёмники инфракрасного излучения.....	70
4.5.1 Тепловые приёмники.....	72
4.5.2 Фотоэмиссионные приёмники оптического излучения.....	73
4.5.3 Фотонные приёмники оптического излучения.....	75
4.5.4 Приёмники оптического излучения на основе квантовых ловушек.....	80
4.5.5 Матричные приёмники: микроболометрические матрицы, фотонные матрицы, матрицы на основе барьера Шоттки, матрицы на суперрешётках, матрицы на полупроводниках с собственной проводимостью, Z – планарные матрицы.....	82

4.5.6 Неохлаждаемые микроболометрические матрицы.....	84
4.5.7 Фотонные матрицы .....	86
4.6 Общая оценка и расчёты.....	89
4.6.1 Физический подход к расчёту параметров тепловизионных систем.....	94
4.6.2 Расчёты коэффициента эффективности в зависимости от количества элементов приемников.....	96
4.6.3 Расчёт чувствительности канала тепловизора .....	100
4.7 Методика расчета параметров тепловизоров и авиационной аппаратуры строчного типа.....	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	110
Приложение А .....	114
Приложение Б .....	119
Приложение В.....	123

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

- BIB (Blocked-Impurity-Band) – блокированная примесная зона  
CCD (charge-coupled-device) – прибор с зарядовой связью  
СТИА (capacitive transimpedance amplifier input circuit) – ёмкостной вход усилителя управляемый током  
FPA (Focal Plate Area) – фокально-плоскостной («одновременно смотрящий») приёмник излучения  
FLIR (Forward Looking Infrared) – «смотрящая» инфракрасная (система)  
МСТ (Mercury Cadmium Telluride)– теллурид ртути кадмия  
MWIR (Middle Wave Infrared) – Средневолновое инфракрасное излучение  
NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – Температурная чувствительность  
NUC (non-uniformity correction) – Коррекция неравномерности  
LWIR (Long Wave Infrared) – Длинноволновое инфракрасное излучение  
VLWIR – сверхдлинноволновое инфракрасное излучение  
NEP (Noise-Equivalent Power) – мощность, эквивалентная шуму  
NETD (Noise Equivalent Temperature Difference) – разность температур, эквивалентная шуму  
QWIP (Quantum Well Infrared Photodetector) – инфракрасный фотоприемник на основе структур с квантовыми ямами (колодцами)  
SPRITE (Signal Processing In The Element) – обработка сигнала в фоточувствительном элементе  
SWIR (Short-wave infrared) – Коротковолновое инфракрасное излучение  
TED (Tom Elliot Detector) – фотоприемник Тома Эллиота  
ЭПР – эффективный показатель рассеяния  
АМБ – антенный микроболометр  
АТА – авиационной аппаратуры строчного типа  
АЦП – аналого-цифровой преобразователь  
АЧТ – абсолютно чёрное тело  
БОИ – блок отображения информации  
БПСР – блок преобразования стандартов разложения  
БТА – большой телескоп азимутальный  
ВКУ – видеоконтрольное устройство  
ВП – военная приемка  
ВТ – военная техника  
ДНК – дезоксирибонуклеиновая кислота  
ДВ – длинноволновый диапазон  
ГКМ – газовая криогенная машина

ГМО – германий монокристаллический для оптоэлектроники  
ГС – гетероструктура  
ГСН – головка самонаведения  
ГФЭ – газонаполненные фотоэлементы  
ЗУ – запоминающее устройство  
ИК – инфракрасный  
КА – космический аппарат  
КРС – квантово-размерная структура  
КРТ – твердый раствор кадмий-ртуть-теллур (Cd-Hg-Te)  
КРЭ – квантово-размерный эффект  
КЯ – квантовая яма  
МБМ – микроболометрическая матрица  
МБР – межконтинентальная баллистическая ракета  
МДВ – метеорологическая дальность видимости  
МКС – микрокриогенная система  
МЛЭ – молекулярно-лучевая эпитаксия  
МПИ – матричный приёмник излучения  
МСКЯ – многослойная структура с квантовыми ямами  
МФС – международная фотометрическая система  
МФП – матричные фотоприёмники  
МЧС – министерство по чрезвычайным ситуациям  
ОМС – оптико-механического сканирования  
ОС – оптическая система  
ОЭС – оптико-электронная система  
ПЗС – прибор с зарядной связью  
ПИ – приемник излучения  
ПОИ – приемник оптического излучения  
ППЗ – прибор с переносом заряда  
ПРК – противоракетный комплекс  
ПСИ – пачка синхронизирующих импульсов  
СБИС – сверхбольшая интегральная система  
СВ – средневолновый диапазон  
СВЧ – сверхвысокая частота  
СФ – согласованный фильтр  
ТГц – терагерцовый  
ТКЯ – толщина квантовой ямы  
ТпВ – тепловизор  
ТПС – тепловизионная система  
ТПСл – толщина покрывающего слоя  
ТЭО – термоэлектрический охладитель  
УФ – ультрафиолетовый  
ФПЗС – фоточувствительный прибор с зарядовой связью  
ФППЗ – фоточувствительный прибор с переносом заряда

ФПУ – фотоприёмное устройство  
ФЦО – фоноцелевая обстановка  
ФЧЭ – фоточувствительный элемент  
ФЭУ – фотоэлектронные умножители  
ЧКЯ – число квантовых ям  
ЭМК – электромагнитное колебание  
ЧТ – черное тело  
ЭОП – электронно-оптический преобразователь



## **ВВЕДЕНИЕ**

В учебном пособии излагаются основы тепловидения и принципы создания тепловизионных приборов. Кратко описаны все основные процессы, происходящие в системах тепловидения: принципы генерирования собственного теплового излучения нагретых тел, вклад в суммарное тепловое излучение отражённых составляющих окружающего фона и внутренних элементов конструкций объективов, рассматриваются материалы, применяемые в ИК технике, приёмники излучения, оптические и электронные модули, методы и приёмы выделения ИК сигналов из шумов и основные принципы обработки формируемых тепловизорами изображений, оцениваются особенности зрительного восприятия тепловизионных изображений и пути создания цветowych изображений, близких по восприятию к изображениям видимого диапазона спектра электромагнитных колебаний.

Учебное пособие предназначено для использования в качестве базового по дисциплине «Инфракрасная техника».

Методическое пособие предназначено также для научных работников, инженеров и студентов различных специальностей, интересующихся методами и средствами разработки и исследования систем, сопрягаемых с тепловизорами, а также для лиц, использующих такие приборы.

## 1 Общие положения

### 1.1 Краткая история развития тепловидения

Можно считать, что тепловидение началось с известного опыта Уильяма Гершеля в 1800 г. Гершель работал над защитой своих глаз от солнечного света и обнаружил эффект нагрева ртутного термометра, который был расположен за красной полосой спектра [1].

И до этого опыта были работы показывающие, что спектр оптического излучения заключён не только в диапазоне видимого спектра. Гипотезу о существовании невидимых тепловых лучей высказывал в своем сочинении "О природе вещей" еще Тит Лукреций Кар, живший до нашей эры. В 1790 г. М. Пикте опубликовал описание своего опыта по фокусировке тепла и холода. До работ Гершеля в 1758 г. М.В. Ломоносов изобрел телескоп для ночного видения (*tubo nyctoptico*), а в 1762 г. - создал зеркала с высокой отражающей способностью.

В 1829 г. Л. Нобили создал первую термопару, работа которой была основана на термоэлектрическом эффекте, открытом Т. Зеебеком в 1821 г. Несколькими годами позже М. Меллони удалось с помощью термостолбика зарегистрировать тепловое излучение человека на расстоянии до 3 м.

Новый этап тепловидения можно считать с изобретением в 1857 г. А. Сванбергом нового приемника ИК излучения – болометр. Усовершенствование этого прибора позволило Л. Ленгли в 1880 г. регистрировать тепловое излучение животных на расстоянии до 400 м.

В 1900 г. произошло второе рождение ИК техники в качестве строгой научной дисциплины, что было обусловлено, с одной стороны, фундаментальными исследованиями М. Планка, А. Эйнштейна, Г. Кирхгофа, Б.Б. Голицына, В. Вина в области теории теплового излучения, а с другой стороны - прогрессом в технологии ИК приемников. Патентная литература начала XX-го века содержит множество предложений по созданию ИК приборов для обнаружения кораблей, самолетов и людей, а также систем связи и автоматического наведения на цель средств поражения.

В 1857 г. А. Сванберг изобрел новый приемник ИК излучения - болометр. Усовершенствование этого прибора позволило Л. Ленгли в 1880 г. регистрировать тепловое излучение животных на расстоянии до 400 м.

В 1895 г. российский физик П. Н. Лебедев, прославившийся исследованием светового давления, предложил вакуумный термоэлемент, который оставался длительное время самым чувствительным детектором излучения. В 1898 г. другой известный российский физик А.Г. Столетов разработал газонаполненную фотоячейку, работавшую на основе внешнего фотоэффекта.

Начало 20 века можно охарактеризовать бурным развитием тепловизионной техники. Появились первые рабочие ИК системы, которые могли обнаруживать людей и технические объекты на расстояниях до километров. Был создан популярный фотоприемник на основе сернистого теллурида. В 1917 - 1920 гг. Т. Кейз создал фоторезисторы для ближнего ИК диапазона. Эти приемники использовались в системе связи, принятой Германией на вооружение в 1935 г.

Перед Второй мировой войной начались систематические исследования воздействия теплового излучения на твердотельные приёмники. Были разработаны охлаждаемые фоторезисторы на основе сульфида свинца. Объем их выпуска в Германии достигал 4 тысяч штук в месяц.

В 1941 г. в Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ, СССР) С.М. Лучинин разработал первый в мире быстродействующий полупроводниковый болометр. Первые эксперименты по обнаружению военных кораблей были проведены в Ленинграде С.И. Покровским, Б.П. Козыревым, В.А. Гуровым и др. еще в 1927 г. К 1934 г. были созданы отечественные береговые системы обнаружения, которые использовали фокусирующие зеркала диаметром до 1,5 м и термоэлементы.

В годы Второй мировой войны в СССР системы ИК обнаружения были использованы при охране конвоев союзников, а в армию поступили первые образцы приборов ночного видения, разработанных под руководством С.М. Николаева. В Берлинском Университете в те же годы был создан первый тепловизор - эвапорограф "ЭВА". В 1946 г. появились люминесцентные преобразователи (метаскопы), которые, не получив дальнейшего распространения, были вытеснены оптико-механическими устройствами.

Часто считают, что прообразом тепловизоров с оптико-механическим сканированием является бортовая ИК система фирмы Barnes, США, созданная в 1954 г. и положившая начало так называемым "впередсмотрящим" ИК системам (Forward Looking Infrared -FLIR), размещаемым на летательных аппаратах. В этих тепловизорах была предусмотрена только строчная развертка сцены.

В СССР в 1961 г. М.М. Мирошников продемонстрировал тепловой след, оставшийся через 30 минут от человека, лежавшего на деревянном полу. Было возможно различить контуры тела благодаря уникальной для тех лет температурной чувствительности -  $0,03^{\circ}\text{C}$ .

Первые измерительные тепловизоры (англоязычный термин - scanning radiometers, т.е. сканирующие радиометры) появились в 1960-х годах в качестве побочного продукта военных разработок. В 1970-х годов шведская фирма AGA (ныне FLIR Systems, США) выпустила первый портативный измерительный тепловизор, Thermovision-650 – больше напоминал телескоп. Следующая коммерческая модель имела массу 35 кг,

требовала охлаждения приемника жидким азотом и также была далека от последующих портативных приборов (интересно отметить, что именно эта модель послужила прототипом известного отечественного прибора ТВ-03, который выпускался без особых изменений вплоть до начала перестройки).

В 60-е годы прошлого века благодаря работам М.М. Мирошникова, П.В. Тимофеева, В.И. Архангельского и других происходило становление отечественного тепловидения. Мирошниковым и Собакиным с сотрудниками были выполнены фундаментальные исследования в области медицинского тепловидения с помощью системы, обладавшей температурным разрешением  $0,3^{\circ}\text{C}$  и временем кадра 15 мин. Эти работы основывались на пионерских исследованиях Н.Н. Красногорского (1942 г.) и Р. Лоусона (1956 г.) по применению тепловидения в медицине.

В 1986 г. фирма отказалась от охлаждения ИК приемника жидким азотом и ввела в модель Thermovision-870 термоэлектрический холодильник, а также встроенный процессор для расчета температуры и калибровки в реальном времени.

Отечественные разработки в 80 - 90-х годах прошлого столетия развивались по нескольким направлениям. Прежде всего, в ГОИ им. С.И. Вавилова под руководством М.М. Мирошникова продолжала разрабатываться оригинальная теория оптико-электронных устройств, на основе которой совместно с Азовским оптико-механическим заводом были созданы тепловизоры как военного, так и гражданского применения: "Филин", "Рубин", "Алмаз", "Радуга", "Статор", "Вулкан" и их модификации [1]. Параллельно в НИИ "Исток" А.Г. Жуковым разрабатывалась концепция отечественного тепловизора ТВ-03, которая повторяла основные технологические идеи ранних тепловизоров фирмы AGA, но потребовала создания отечественной элементной базы. Основными проблемами того периода было налаживание производства фотоприемников на основе InSb и HgCdTe, оптических материалов ИК диапазона (кремния, германия и ИК стекло), а также прецизионных оптико-механических систем сканирования.

Существенный вклад в разработку отечественной тепловизионной аппаратуры тех лет внесли М.М. Мирошников, Р.Н. Иванова, А.Г. Жуков, П.Ф. Тимофеев, А.И. Горячев, И.И. Таубкин, В.Е. Абрамчук, Г.А. Падалко, Н.Д. Куртев, В.И. Хахин, В. Кормушкин, С.С. Воронцов, Г. Федчишин, С.П. Морозова и П.А. Морозов и др.

Таблица 1.1 – Хронология развития ИК техники и тепловидения

1758	М.В. Ломоносов изобрел телескоп для ночного видения
1762	М.В. Ломоносов создал зеркала с высокой отражающей способностью
1800	У. Гершель открыл ИК излучение, названное им "тепловыми лучами"
1821	Л. Нобили изобрел термопару
1840	Д. Гершель получил видимое изображение ИК излучения, проектируя

	солнечный спектр на поверхность тонкой бумаги, покрытой углеродной сажей и смоченной спиртом
Конец XIX-го века	Исследования П.Н. Лебедева и А.Г. Столетова в области внешнего фотоэффекта
1900	М. Планк открыл основной закон теплового излучения
1905	Изготовлена фотопленка, чувствительная к излучению с длиной волны до 800 нм
1927	В СССР - исследования С.И. Покровского, Б.П. Козырева, В.А. Гурова по ИК обнаружению военных кораблей
1929	М. Черни создал "эвапорограф" в качестве первого ИК термографа
1932	Первое свидетельство наличия CO <sub>2</sub> в атмосфере Венеры получено У. Адамсом и Т. Данхэмом путем ИК фотографирования отраженного солнечного излучения
1934	Электронно-оптический преобразователь (ЭОП) на длины волн до 1,5 мкм разработан Д. Холстом с сотрудниками
1942	Первое военное применение ИК визуализирующей системы продемонстрировано в Форте Бельвуар, США
1946	Первый военный ИК строчный сканер со временем кадра 1 ч разработан в США
1954	ИК сканер со временем кадра 45 мин, США
1958	Первый ИК прицел для военных применений, США
1950 — 1960 гг.	Первый коммерческий эвапорограф, США
1960-е гг.	ИК сканеры создают изображения за 5 мин, становление российского тепловидения в исследованиях М.М. Мирошникова, П.В. Тимофеева, В.И. Архангельского, М.А. Собакина
1961	П. Линдберг и Х. Холмберг разработали сканирующую систему с использованием вращающихся призм
1964	Фирма Texas Instruments разработала первую "впередсмотрящую" ИК систему (FLIR)
1965	На рынке появился первый коммерческий ИК тепловизор AGA-650 (фирма AGA, Швеция)
1967	Фирмой AGA получена первая электронная цветная термограмма
1972	Разработан измерительный двухканальный ИК тепловизор Dynarad 210, США
1973	Портативный ИК тепловизор AGA 750 с питанием от аккумуляторов, Швеция
1974	Малогабаритный ("ручного" применения) ИК тепловизор Hushes Probeye, США
1977	ИК тепловизор Inframetrics 510 с телевизионным выходом, США
1978	Двухканальный аналоговый ИК тепловизор AGA 780 для научных исследований, работающий в реальном времени, Швеция
1970 -	В СССР разработаны тепловизоры "Факел", "Рубин", ТВ-03, "Радуга",

1980 гг.	ИФ-10ТВ, АТП, "Лазеровизор"
1980	Длинноволновый пироэлектрический видикон ISI VideoTherm
1984	Портативный ИК тепловизор Inframetrics 600 с питанием от аккумуляторов и измерением температуры в реальном времени, США
1987	Одноблочный ИК тепловизор AGEMA 470 со встроенной цифровой записью термограмм, Швеция
1987	Первый тепловизор Mitsubishi IR-5120 на матричном ИК FPA-детекторе с холодильником Стирлинга, Япония
1990	В СССР разработаны охлаждаемые линейки фотоприемников, предназначенные для использования в тепловизорах военного применения
1993	Малогабаритная FPA ИК камера InfraCAM фирмы Inframetrics на стандартных аккумуляторах с холодильником Стирлинга, США
1995	Полнофункциональный тепловизор камкордерного исполнения ThermaCAM фирмы Inframetrics со встроенными измерительными функциями и цифровой записью, США
1997	Первая низкостоимостная ИК камера типа snap-shot (ИК фотоаппарат) на базе линейного сканера (Infrared Solutions IR Snapshot)
1997	Тепловизор AGEMA 570 на базе неохлаждаемого болометрического матричного детектора, Швеция
1999	Первый коммерческий тепловизор SC 3000 фирмы FLIR Systems на базе QWIP детектора, США
2000	Тепловизор с записью ИК и видеоизображений, звука и текста ThermaCAM PM 695 фирмы FLIR Systems, затем модель ThermaCAM P65 той же фирмы
2003-2009 гг.	На рынке появились низкостоимостные измерительные тепловизоры на базе неохлаждаемых FPA,- приемников излучения с форматом изображения 80 x 80 и 160 x 120 (фирмы FLIR Systems, NEC, Raytek, Irisys и др.), а также тепловизионные модули. Одновременно частота записи термограмм повысилась в специальных моделях до нескольких сотен (в специальных случаях - тысяч) герц
2011	Тепловизор SC 8000 фирмы FLIR Systems для научных исследований с форматом изображения 1240x1024

## 1.2 Термины и определения, применяемые в тепловидении

Температура, как количественный показатель внутренней энергии тел, является универсальной характеристикой объектов и процессов физического мира, в котором непрерывно происходит генерация, преобразование, передача, накопление и использование энергии в ее различных формах. Промышленная деятельность сопровождается необратимыми потерями тепловой энергии, поэтому очевидно, что анализ тепловых процессов (температурных полей, потерь тепла и т.п.) позволяет получать разнообразную информацию о состоянии объектов и протеканий

физических процессов в природе, энергетике, строительстве, промышленности и медицине [1].

Основные термины и определения тепловидения прописаны в государственном стандарте ГОСТ Р 8.619-2006, применяют следующие термины с соответствующими определениями:

- тепловизионный измерительный прибор (теповизор) – оптико-электронный прибор, предназначенный для бесконтактного (дистанционного) наблюдения, измерения и регистрации пространственного/пространственно-временного распределения радиационной температуры объектов, находящихся в поле зрения прибора, путем формирования временной последовательности термограмм и определения температуры [2] поверхности объекта по известным коэффициентам излучения и параметрам съемки (температура окружающей среды, пропускание атмосферы, дистанция наблюдения и т.п.);
- эталонный (образцовый) излучатель – излучатель в виде модели абсолютно черного тела (АЧТ), удовлетворяющий требованиям ГОСТ 8.558, ГОСТ Р 8.566;
- эталонный (образцовый) протяженный излучатель – эталонный (образцовый) излучатель, угловые размеры которого в 10 и более раз превышают элементарное поле зрения тепловизора;
- тепловой тест-объект – устройство, предназначенное для создания картинной плоскости, содержащей теплоизлучающий объект с заданными пространственной частотой или формой, температурным контрастом на равномерно излучающем фоне с известным значением его температуры и излучательными способностями объекта и фона;
- термограмма – многоэлементное двумерное изображение, каждому элементу которого приписывается цвет, или градация одного цвета, или градация яркости экрана, определяемые в соответствии с условной температурной шкалой;
- количество чувствительных элементов (элементов разложения термограммы) – количество фоточувствительных элементов в фотоприемном устройстве тепловизора;
- угол поля зрения – пространственный угол, в пределах которого осуществляется формирование термограммы;
- элементарное поле зрения (мгновенный угол поля зрения) – пространственный угол, в пределах которого инфракрасное излучение воспринимается одним фоточувствительным элементом фотоприемного устройства;
- пространственное (угловое) разрешение – размер (угловой или в элементах разложения) щели в экране, установленном перед протяженным излучателем в поле зрения тепловизора, при котором отношение пикового приращения температуры щели над температурой

экрана на термограмме к разности температур излучателя и экрана достигает заданного значения;

- порог температурной чувствительности (разность температур, эквивалентная шуму) – приращение температуры, равное среднему квадратическому значению шума в термограмме при наблюдении однородного фона с заданной температурой;
- неравномерность чувствительности тепловизора по полю – максимальное значение перепада температур фрагментов термограммы равноизлучающего по поверхности эталонного (образцового) протяженного излучателя.

### 1.3 Энергетические величины и единицы их измерения

Энергетические соотношения в оптико-электронных приборах с использованием полупроводниковых приемников излучения и оптико-механического сканирования достаточно подробно изложены в ряде монографий, например, в книге Дж. Ллойда [2]. В ней выполнены систематизация и анализ этих данных.

Могут быть рекомендованы и другие работы: [3], [4], [5], из более поздних - работы [24], [34], [17] и многие другие.

Электромагнитное (тепловое или ИК) излучение возникает вследствие колебаний атомов в кристаллической решётке или вращательно-колебательного движения молекул. Принято считать, что ИК излучение лежит в диапазоне 0,75 мкм до 1000 мкм, и находится между видимым спектром и радиоволнами. Принято разбивать ИК спектр на несколько участков, см. таблицу 1.2 и рисунок 1.1. В тепловидении терминами «средневолновый» (СВ) и «длинноволновый» (ДВ) участки спектра, как правило обозначают диапазоны 3 – 5,5 мкм и 7 – 14 мкм, что связано со спектральной чувствительностью популярных ИК детекторов на основе антимонида индия (*InSb*) и тройных соединений (*CdHgTe*) [1].

Таблица 1.2 – Диапазоны ИК излучения

Длина волн (мкм)	Название
0,76-1,5	Ближнее инфракрасное излучение
1,5-2,2	Коротковолновое инфракрасное излучение (SWIR)
2,2-5,6	Средневолновое инфракрасное излучение (MWIR)
5,6-30	Длинноволновое инфракрасное излучение (LWIR)
30-300	Дальнее инфракрасное излучение (ТГц излучение)



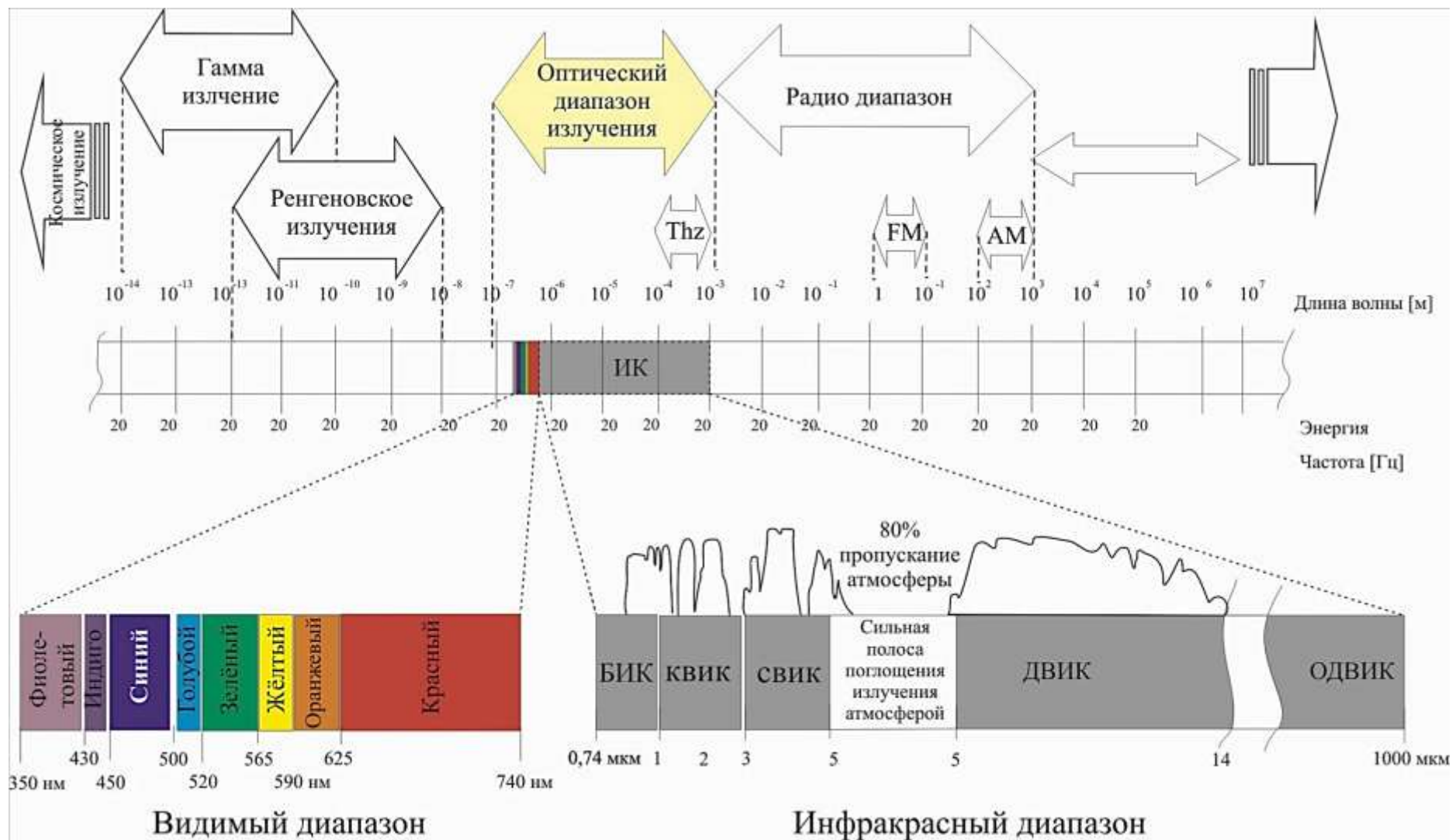


Рисунок 1.1 – Электромагнитный спектр

В таблице приведены основные энергетические величины и единицы их измерения, используемых в тепловидении.

Таблица 1.3 – Энергетические величины и единицы их измерения

Наименование (синонимы)	Определяющее выражение	Основная единица измерения
Поток излучения (лучистый поток, мощность излучения) Radiant power, radiant flux	$\Phi_e = \int_0^{\infty} \Phi_e d\lambda$	[Вт] 1 Вт = 10 <sup>7</sup> эрг · с <sup>-1</sup> = = 0,239 кал · с = = 6,24 · 10 <sup>18</sup> эВ · с <sup>-1</sup>
Энергия излучения (лучистая энергия) Radiant energy	$Q_e = \int_0^{\tau} \Phi_e(\tau) d\tau$	[Дж] 1 Дж = 1 Втс = = 2,78 · 10 <sup>-7</sup> кВт · ч = 10 <sup>7</sup> эрг = 0,239 кал = 6,24 · 10 <sup>18</sup> эВ
Энергетическая сила света (сила излучения) Radiant intensity	$I_e = d\Phi_e / d\Omega$	[Вт/ср] 1 Вт · ср <sup>-1</sup>
Энергетическая светимость (поверхностная плотность потока излучения, излучательность) Radiant exitance	$M_e = d\Phi_e / dA_1$	[Вт/м <sup>2</sup> ] 1 Вт · м <sup>-2</sup> = 100 мкВт · см <sup>-2</sup> = = 92,9 мВт · фут <sup>-2</sup>
Энергетическая освещенность (облученность, плотность мощности, плотность дозы, радиация) Irradiance, dose-rate	$E_e = d\Phi_e / dA_2$	[Вт/м <sup>2</sup> ] 1 Вт · м <sup>-2</sup> = = 100 мкВт · см <sup>-2</sup> = = 92,9 мВт · фут <sup>-2</sup>
Энергетическая яркость (лучистость) Radiance	$L = \frac{I_e}{dA_1 \cdot \cos \theta}$	[Вт/(м <sup>-2</sup> · ср)] 1 Вт · м <sup>-2</sup> · ср <sup>-1</sup>
Энергетическая экспозиция (энергетическое количество освещения, количество облучения, доза, экспозиционная доза) Radiant exposure, irradiation	$H_e = \int_0^t E_e(t) dt$	[Дж · м <sup>-2</sup> ] 1 Дж · м <sup>-2</sup> = = 1 Втс · см <sup>-2</sup> = = 10 <sup>-4</sup> Дж · см <sup>-2</sup> = 2,78 · 10 <sup>-4</sup> Вт · ч · м <sup>-2</sup> = 10 <sup>3</sup> эрг · см <sup>-2</sup> = = 2,39 · 10 <sup>-5</sup> кал · см <sup>-2</sup>

Более подробно изучить основы теоретической фотометрии можно в источнике [6], где также подробно описаны основные закономерности теплового излучения.

## 2 Законы теплового излучения

Нагретые тела (твердые и жидкие) характеризуются непрерывным распределением излучения по спектру длин волн с единственным максимумом, положение которого зависит от температуры источника. Такие источники называют тепловыми, а тела эти обычно находятся в состоянии термодинамического равновесия. Излучение пламени или электрического разряда в газах сконцентрировано в узких интервалах – линиях и полосах. Такие источники называют селективными. Примерами селективных излучателей являются факелы двигателей самолетов и ракет, а также слои в скачке уплотнения, окружающие возвращающийся в атмосферу космический аппарат (КА) и отделившиеся боеголовки межконтинентальных баллистических ракет (МБР).

Тепловое излучение — электромагнитное излучение со сплошным спектром, испускаемое нагретыми телами за счёт их внутренней энергии. Это один из трёх элементарных видов переноса тепловой энергии (помимо теплопроводности и конвекции).

В физике для расчёта теплового излучения принята модель абсолютно чёрного тела (АЧТ – тело, поглощающее все падающее на него излучение любых длин волн), тепловое излучение которого описывается законом Стефана-Больцмана. Излучение реальных тел подчиняется закону излучения Кирхгофа.

Вывод формул основан на представлении, что тепловое излучение генерируется в процессе простого гармонического колебания линейных атомных осцилляторов не непрерывным образом, а дискретными квантами, энергия  $E$  которых является функцией частоты излучения  $\nu$ :  $E = h\nu$ , где  $h$  — постоянная Планка.

Спектральная плотность излучения абсолютно чёрного тела в зависимости от температуры и частоты определяется законом Планка, и необходимо учитывать спектральную излучательную способность (коэффициент излучения –  $\varepsilon_\lambda$ ):

для АЧТ:

$$M_{e,\lambda} = \frac{2 \cdot h \cdot \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (2.1)$$

для серого тела:

$$M_{e,\lambda} = \frac{2 \cdot \varepsilon_\lambda \cdot h \cdot \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}, \quad (2.2)$$

где  $\varepsilon_\lambda$  – спектральная излучательная способность (коэффициент излучения)  $\nu$  – частота излучения;  $T$  – температура излучающего тела;  $h$  – постоянная Планка ( $h = 6,6256 \cdot 10^{-34}$  Вт·с<sup>2</sup>);  $c$  – скорость света в вакууме ( $c = 2,9979 \cdot 10^8$  м/с),  $k$  – постоянная Больцмана ( $k = 1,38054 \cdot 10^{-23}$  (Вт·с)/К).

Это выражение эквивалентно для длин волн

$$M_{e,\lambda} = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}, \quad (2.3)$$

где  $\lambda$  – длина волны, мкм.

Закон Планка можно записать через коэффициенты:

$$M_{e,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)}, \left[ \text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1} \right], \quad (2.4)$$

где  $C_1 = 3,7418 \cdot 10^8 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^4$ ,  $C_2 = 1,4388 \cdot 10^4 \text{ мкм} \cdot \text{К}$ .

В зависимости от предпочтений и области применения закона Планка можно его записать в разных формах, приведены в таблице 2.1. В таблице, слева наиболее часто применяемые формы записи, в то время как на правом наиболее часто встречаются в теоретических областях.

Таблица 2.1 – Закон Планка, выраженный через различные спектральные переменные

Постоянная Планка		Постоянная Дирака (приведённая постоянная Планка)	
Частота	$M_{e,\nu} = \frac{2 \cdot h \cdot \nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$	Циклическая частота	$M_{e,\omega} = \frac{\hbar \cdot \omega^3}{4 \cdot \pi^3 \cdot c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar\omega}{kT}} - 1}$
Длина волны	$M_{e,\lambda} = \frac{2 \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}$	Циклическая длина волны	$M_{e,y} = \frac{\hbar \cdot c^2}{4 \cdot \pi^3 \cdot y^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar c}{y \cdot k \cdot T}} - 1}$
Волновое число	$M_{e,\tilde{\nu}} = \frac{2 \cdot h \cdot c^2 \cdot \tilde{\nu}^3}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc\tilde{\nu}}{kT}} - 1}$	Циклическое волновое число	$M_{e,\lambda} = \frac{\hbar \cdot c^2 \cdot k^3}{4 \cdot \pi^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{\hbar c k}{kT}} - 1}$

В 1879 г. Йозеф Стефан, основываясь на экспериментах, решил, что энергетическая светимость любого тела пропорциональна четвертой степени температуры. Однако через несколько лет Больцман доказал, что это утверждение справедливо только для абсолютно черных тел. Найденная ими зависимость получила названия закона Стефана – Больцмана. Получить данный закон можно проинтегрировав уравнения, описывающего закон Планка:

для АЧТ:

$$M_e = \int_0^{\infty} M_{e,\lambda} d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} \cdot T^4 = \sigma \cdot T^4, \quad (2.5)$$

для серого тела:

$$M_e = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4, \quad (2.6)$$

где  $\sigma = 5.670367(13) \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$  – постоянная Стефана-Больцмана.

Продифференцировав уравнение Планка (2.1), получим закон смещения Вина (плотность энергии излучения), которая справедлива при  $\lambda \cdot T < 5000$  (мкм · К):

$$M_{e,\nu} = C_1 \cdot \nu^3 \cdot e^{-C_2 \frac{\nu}{T}} \text{ или } M_{e,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{C_2/\lambda T})}, \quad (2.7)$$

где  $\nu$  — частота излучения;  $T$  — температура излучающего тела;  $C_1, C_2$  — константы.

Спектральная плотность излучения АЧТ в диапазоне температур от 3500 до 5500 К и от 280 до 320 К показана на рисунке 2.2, видно, что полный поток излучения АЧТ быстро возрастает с ростом температуры. При этом максимум спектральной плотности излучения с увеличением температуры сдвигается в сторону более коротких волн.

Для  $\lambda \cdot T > 10^5$  (мкм · К) имеет место приближение Релея – Джинса:

$$M_{e,\lambda} = 2 \cdot C_1 \cdot T / (C_2 \cdot \lambda^4), \quad (2.8)$$

В тепловидении величина  $(\lambda \cdot T)$  обычно берётся в пределах от 800 до 5000 мкм · К, что соответствует спектральному диапазону от 3 до 14 мкм и температуре объектов от 0 до плюс 100°C, отсюда следует возможность использовать формулу Вина.

Графики функции Планка  $M_{e,\lambda}$  для различных температур АЧТ согласно формулам (2.1) и (2.7) показаны на рис. 2.2, откуда следует, что:

1) для каждой температуры максимум излучения имеет место на определенной длине волны, которая возрастает с уменьшением температуры;

2) мощность излучения резко падает с уменьшением температуры.

Вышеуказанные особенности теплового излучения тел выражаются соответственно законами Вина и Стефана-Больцмана.

Закон Вина для длины волны  $\lambda_{max}$ , характеризующейся максимальным значением функции Планка, имеет следующий вид, мкм:

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \approx \frac{3000}{T}. \quad (2.9)$$

Графически соотношение законов теплового излучения можно представить на рисунке, следующим образом.



Рисунок 2.1 – Графики функций описывающие излучение по формулам Вина, Рэлея-Джинса и экспериментальные данные (закон Планка)

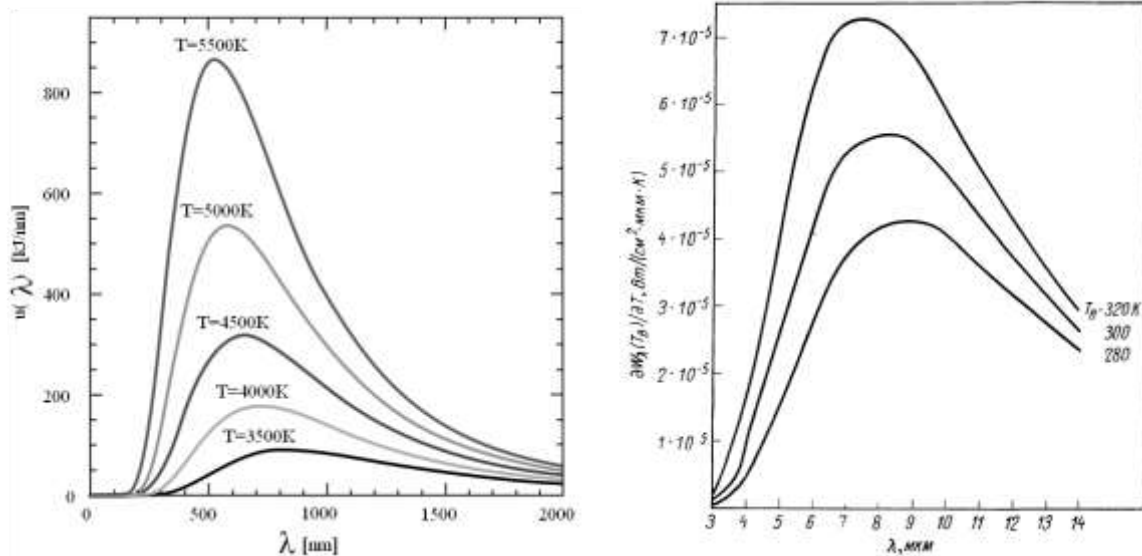
В диапазоне длин волн  $\lambda_1 \dots \lambda_2$  поверхностную плотность потока излучения определяют по формуле:

$$M_{e,\Delta\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e\lambda}(T, \varepsilon_\lambda) d\lambda, [Bm / m^2]. \quad (2.10)$$

Спектральный ход коэффициента излучения  $\varepsilon_\lambda$  может быть весьма причудливым, в особенности у газов, которые характеризуются линейчатым спектром излучения. Для многих твердых и жидких тел, называемых серыми, зависимостью коэффициента излучения от длины волны можно пренебречь, тогда

$$M_{e,\Delta\lambda} = \varepsilon \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left( e^{\frac{C_2}{\lambda \cdot T}} - 1 \right)} d\lambda = \varepsilon \cdot M_e. \quad (2.11)$$

Значения интеграла  $M_e$  в формуле (2.4), описывающего поверхностную плотность потока излучения АЧТ в отдельных спектральных интервалах, табулированы в книге Брамсона М.А. «Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел». В ИК термографии преимущественно используют средневолновый (3...5.5 мкм) и длинноволновый (7...14 мкм) спектральные диапазоны, что соответствует, с одной стороны, окнам преимущественной прозрачности атмосферы, а с другой стороны, подкреплено наличием распространенных приемников излучения, в частности, на основе  $InSb$  и  $CdHgTe$ . Кроме того, согласно закону Вина, в указанных диапазонах сосредоточена основная мощность излучения тел при температурах от 0 до +100 °С,



А. Для высокотемпературных тел В. Для низкотемпературных тел (3500К-5500К) [Wiki] (280К-320К)

Рисунок 2.2 – Зависимость мощности излучения чёрного тела от длины волны

Если не брать в расчёт прошедшее оптическое излучение через тело, то в общем случае падающее на тело излучение частично поглощается этим телом и частично отражается от него. Поглощательная способность тела  $a_{\nu,T}$  показывает, какая доля падающей на него энергии электромагнитных волн  $dW_{над}$  с частотами от  $\nu$  до  $\nu + d\nu$  поглощается этим телом

$$a_{\nu,T} = \frac{dW_{погл}}{dW_{над}}, \quad (2.12)$$

где  $dW_{погл}$  – поглощаемая той же поверхностью тела энергия, приходящаяся на тот же диапазон частот за одинаковый промежуток времени

Изучение излучательных и поглощательных свойств тел привело Кирхгофа (1859 г.) к установлению важного закона (теоремы). Он доказал, что отношение испускательной и спектрального коэффициента поглощения (поглощательной способностей) тела не зависит от его природы, а является для всех тел одной и той же (универсальной) функцией частоты (или длины волны  $\lambda$ ) и температуры

$$\frac{r_{\nu,T}}{a_{\nu,T}} = f(\nu, T), \quad (2.13)$$

где  $f(\nu, T)$  – универсальная функция Кирхгофа.

Закон Кирхгофа отражает тот факт, что в случае равновесного излучения, чем сильнее тело поглощает излучение какой-либо частоты, тем интенсивней оно испускает данное излучение.

Универсальные функции Кирхгофа частоты  $f(\nu, T)$  и длины волны  $\varphi(\nu, T)$  связаны друг с другом выражением [7]:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{c}{\lambda^2} \cdot f(\nu, T). \quad (2.14)$$

Универсальная функция  $f(\nu, T)$  связана со спектральной плотностью  $M_{e,\lambda}$  энергии равновесного излучения соотношением:

$$\varphi(\lambda, T) = \frac{c}{4} \cdot M_{e,\lambda}. \quad (2.15)$$

Особый случай представляет собой изучение абсолютно черного тела, так как его поглощательная способность  $a_{\nu, T} \equiv 1$ , то из (2.13) следует, что излучательная способность  $r_{\nu, T}$  абсолютно черного тела и есть универсальная функция Кирхгофа

$$r_{\nu, T}^* = f(\nu, T), \quad (2.16)$$

а с учётом (2.15)

$$r_{\nu, T}^* = f(\nu, T) = \frac{c}{4} \cdot M_{e,\lambda}. \quad (2.17)$$

При данной температуре излучательная способность  $r_{\nu, T}^*$  абсолютно черного тела максимальна по сравнению с другими телами, измеряя ее, можно экспериментально определить вид функции  $f(\nu, T)$  или  $\varphi(\nu, T)$ . Результаты таких опытов приведены на рисунке 2.3.

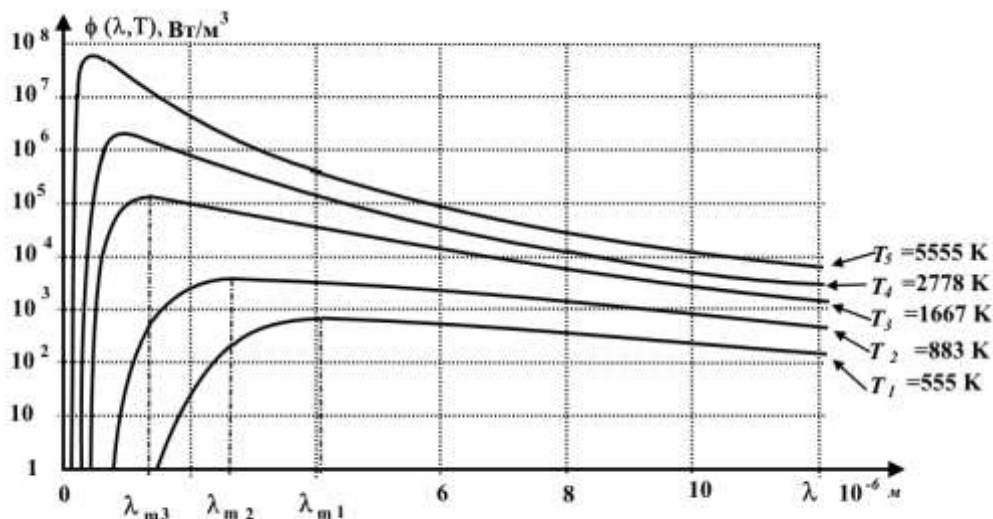
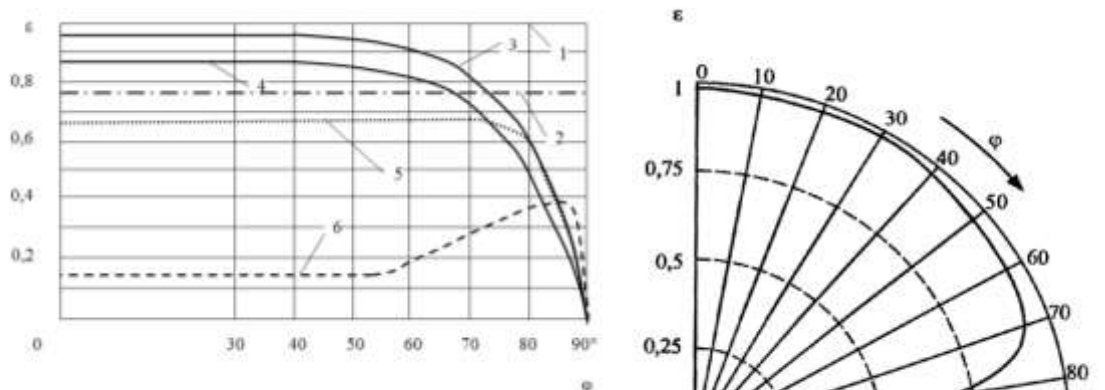


Рисунок 2.3 – Вид кривых  $\varphi(\lambda, T)$  соответствующих различным фиксированным температурам



Нахождение вида функции  $M_{e,\lambda}(\lambda, T)$  стало основной проблемой теории теплового излучения в конце XIX в. – начале XX в.



Черное тело; 2. Серое тело (условное); 3...5. Диэлектрики с показателями преломления  $n=1,5; 2,0$  и  $4,0$  соответственно; 6. Металл

а. Зависимость коэффициента излучения  $\varepsilon$  от угла наблюдения  $\varphi$

б. Зависимость коэффициента излучения  $\varepsilon$  воды на длине волны  $\lambda=10$  мкм от угла

Рисунок 2.4 – Зависимости коэффициентов излучения различных материалов и воды от угла наблюдения при формировании термограмм [24]

При интерпретации термограмм, получаемых в тепловизионных системах (ТПС), необходимо учитывать условия наблюдения объектов и зависимости коэффициентов собственного излучения объектов и коэффициентов отражения от объектов собственного излучения фона. Чтобы сравнивать интегральные величины излучения чёрного тела и селективного излучателя, введено понятие радиационной температуры – температуры чёрного тела, имеющего такую же суммарную (по всему спектру) энергетическую светимость, что и данный селективный излучатель (объект).

### 3 Прохождение излучения через атмосферу

При проектировании ИК системы любой разработчик решает задачу создания аппаратуры с учётом прохождения теплового излучения в поглощающих средах [50].

Почти всегда (за исключением случая "космос–космос") излучение от цели проходит сквозь слой земной атмосферы и либо ослабляется, либо вовсе затухает за счет рассеяния и поглощения молекулами водяного пара, углекислого газа и озона. Спектральное пропускание излучения атмосферой приведено на рисунке 3.1.

Озоновый слой на высоте около 80 км задерживает сверхкоротковолновое ультрафиолетовое излучение.

На рисунке 3.1: *a* – обычный ультрафиолет (от 0,2 до 0,4 мкм) и видимый диапазон – от 0,45 до 0,8 мкм; *b* – ближний ИК диапазон (0,76 – 1,5 мкм) и коротковолновый (1,5 – 2,8); *v* – средний ИК диапазон (2,8 – 5,6 мкм); *z* – длинноволновый ИК диапазон (5,6 – 29,0 мкм); *d* – дальний ИК, или ТГЦ диапазон (30 – 300 мкм).

В атмосфере имеются окна прозрачности, которые стандартизованы в международной фотометрической системе (МФС) через  $\lambda \pm \Delta\lambda$ :

- в видимом и начале ближнего ИК диапазонов: *B*, *V*, *R*, *J* – до 1,2 мкм;
- Н-диапазон – (1,6 ± 0,1) мкм;
- К-диапазон – (2,2 ± 0,3) мкм;
- L-диапазон – (3,6 ± 0,45) мкм;
- М-диапазон – (4,6 ± 0,5) мкм;
- N-диапазон – (10,0 ± 2,0) мкм;
- Q-диапазон – (20,0 ± 0,4) мкм.

Между полосами прозрачности имеются полосы полного поглощения ИК-излучения атмосферой: парами воды H<sub>2</sub>O (2,7; 3,2; 6,3 мкм), углекислым газом CO<sub>2</sub> (2,7; 4,3; 15 мкм), закиси азота (4,7; 7,8 мкм), окиси углерода (4,8 мкм) и метана (3,2; 7,8 мкм) [2]. Самыми сильными фактором ослабления, не считая ослабления в плотных дисперсных средах, является молекулярное поглощение следующими компонентами: пары воды, углекислый газ и озон. В нижних слоях атмосферы можно пренебречь поглощением закисью азота и окисью углерода.

Полосы поглощения водяного пара с центром 6,3 мкм и углекислого газа с центрами 2,7 и 15 мкм ограничивают пропускание излучения атмосферой в диапазоне длин волн 2–20 мкм, определяя положение двух окон прозрачности: 3,5 – 5 и 8 – 14 мкм.

Эффективность работы тепловизионных систем в значительной степени зависит от состояния условий теплообмена между подстилающей поверхностью и воздушной средой. В равновесных условиях теплообмена тепловизором (ТпВ) наблюдают только температурно-контрастные цели без привязки к окружающей местности, т.к. различия в температурах

отдельных участков фона практически полностью нивелируются. Кроме того, значительное ослабление сигналов о собственном тепловом излучении целей и фона наблюдается в условиях густого тумана и мелкого дождя, размеры водных капель в которых соизмеримы со средней длиной волны в диапазоне чувствительности наблюдательного прибора. В то же время, затухание терагерцового (ТГц) излучения в указанных средах значительно меньше. Представление о степени поглощения (пропускании) излучения атмосферой на разных длинах волн можно составить по приведенным ниже (рис. 3.1) графикам.

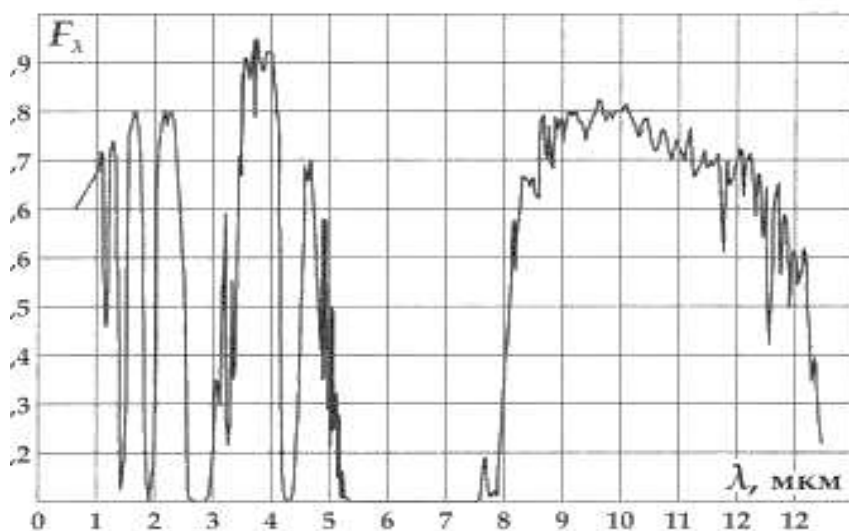


Рисунок 3.1 – Графики пропускания атмосферы в ИК области

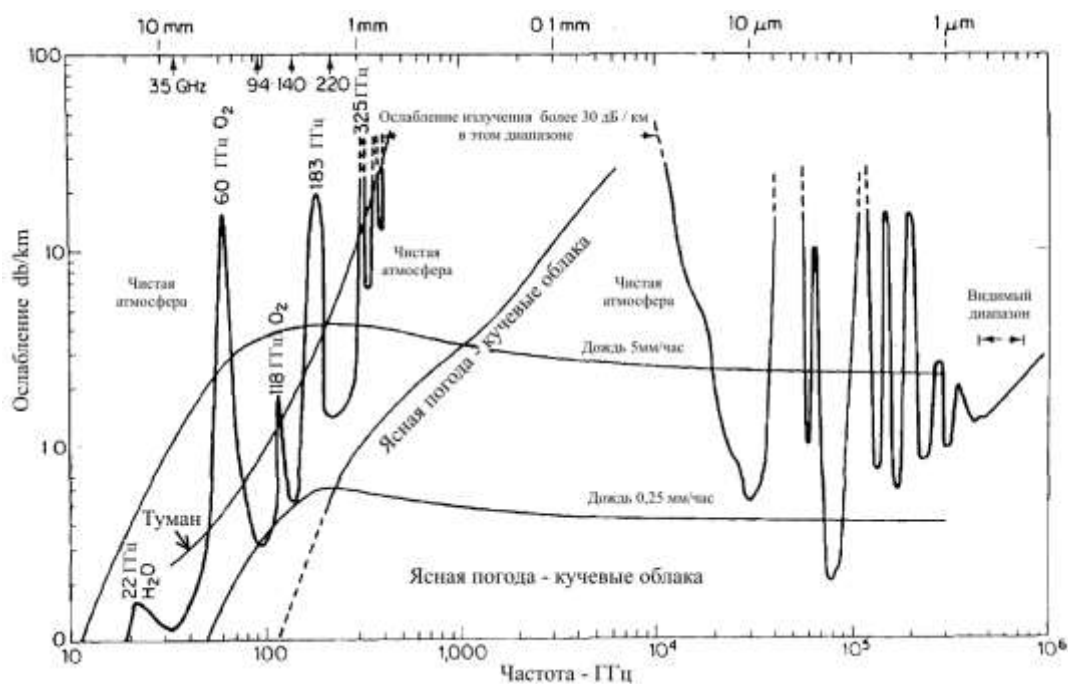


Рисунок 3.2 – Графики ослабления атмосферы от миллиметровой до УФ областей спектра [8]

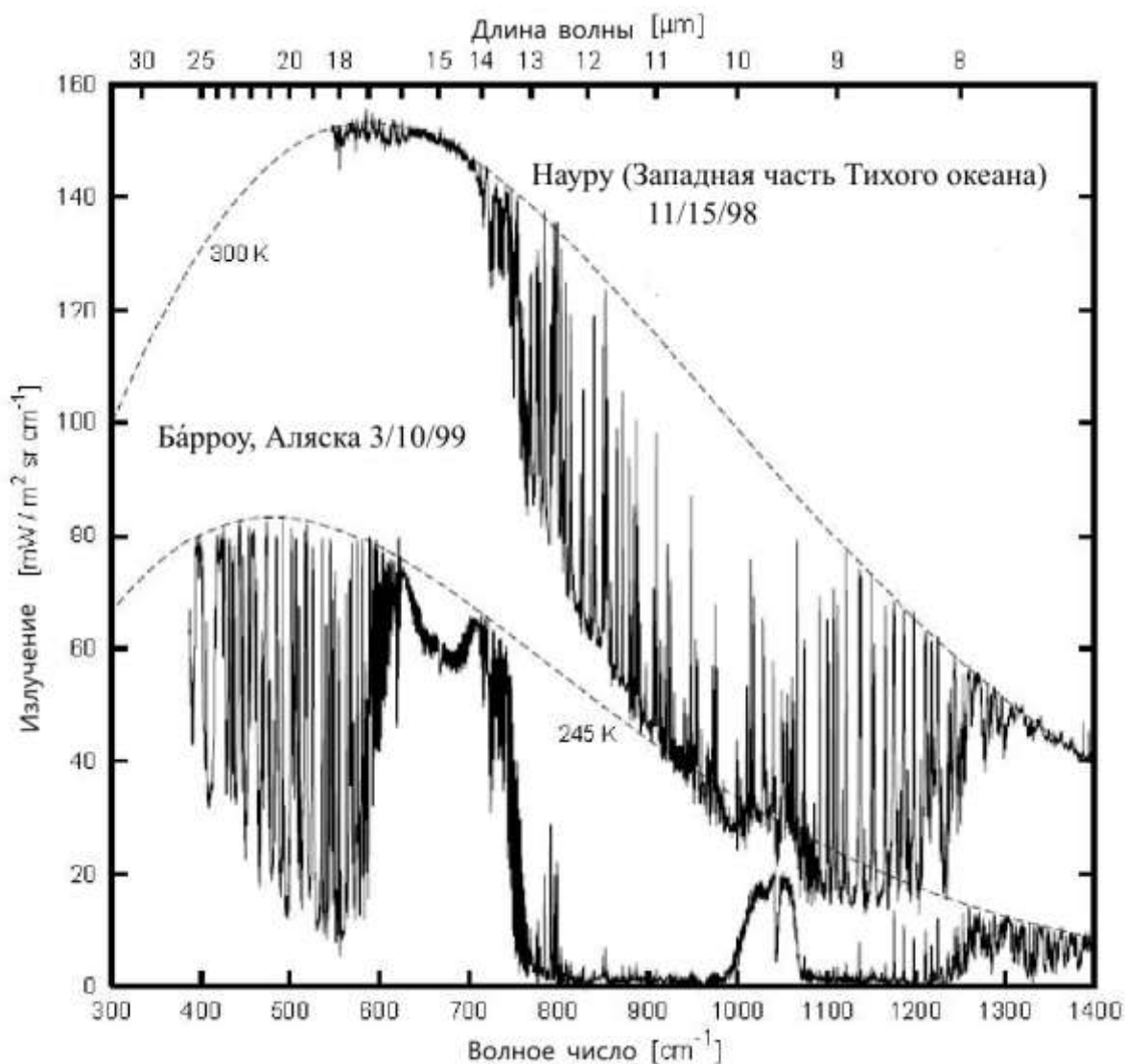


Рисунок 3.3 – Пример измеренных спектров пропускания атмосферы в двух разных точках, вместе с графиками закона Планка для двух температур (пунктирные линии) [9]

Интерес к ТГц излучению обусловлен следующими его свойствами:

- это неионизирующее излучение (энергия фотонов 0,04 – 0,004 эВ);
- это излучение хорошо проходит через мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния ( $1/\lambda^4$ );
- это область вращательных спектров молекул, колебаний биологически важных коллективных мод ДНК и белков, колебаний твердотельной плазмы;
- это область водородных связей и вандерваальсовских сил межмолекулярного взаимодействия;
- энергия фотонов ТГц излучения лежит в области энергетической щели сверхпроводников [10].

Интегрирование указанных диапазонов позволит получить большую дальность действия и всепогодность при угловой разрешающей способности, свойственной ИК диапазону. Использование единой приемной системы обеспечит соответствующее уменьшение габаритов и веса интегрированной системы.

### 3.1 Состав атмосферы

Атмосфера состоит из смеси газов и твердых частиц, находящихся в ней во взвешенном состоянии. Водяной пар (концентрация от 0 до 45 %) является наиболее поглощающим компонентом. Его содержание в атмосфере может сильно меняться в зависимости от многих факторов: от температуры, высоты, времени года, широты и т.д. Существует понятие абсолютной и относительной влажности, которая характеризует содержащиеся в атмосфере количество паров воды. Абсолютная влажность – количество граммов воды в одном кубическом метре воздуха. Относительная влажность  $f$  (%) – отношение фактической влажности к предельной при данной температуре.

В таблице 3.1 приведены предельная  $a_\phi$  абсолютная влажность водяного пара в зависимости от температуры при относительной влажности  $f=100\%$ .

Таблица 3.1 – Предельная абсолютная влажность водяного пара в зависимости от температуры при относительной влажности 100%

t°С	-20	-15	-10	-5	0	+5	+10	+20	+30	+40	+50
$\alpha_\phi$ (г/м <sup>3</sup> )	1,08	1,6	2,35	3,41	4,86	6,32	9,41	17,32	30,38	51,1	82,8

В реальности зависимость абсолютной, относительной влажности и температуры имеет более сложную форму, рисунок 3.4.

С высотой концентрация паров воды быстро убывает и может быть вычислена:

$$a_H = a_0 \cdot 10^{-H/K}, \quad (3.1)$$

где  $a_H$  – влажность на высоте  $H$ ;  $a_0$  – влажность на уровне моря;  $H$  – высота, в метрах;  $K$  – коэффициент ( $K = 5000$ , если высота в метрах).

На практике для расчета поглощения излучения в атмосфере используется понятие водности, т.е. количество воды, осаждаемой в слое единичного сечения протяженностью  $L$ :

$$\omega = \frac{L \cdot f \cdot a_\phi}{\gamma \cdot 10^6}, \quad (3.2)$$

где  $L$  – дистанция в метрах;  $f$  – относительная влажность, в относительных единицах;  $a_{\varphi}$  – абсолютная влажность, из таблицы 3.1;  $\gamma$  – удельный вес воды, г/м<sup>3</sup>.

Или по формуле:

$$\omega = \frac{2,167 \cdot 10^4}{T} \cdot f \cdot E_p \cdot L, \quad (3.3)$$

где  $T$  – температура воздуха, в кельвинах;  $E_p$  – упругость насыщенных паров, в паскалях (см. таблицу 3.2);  $L$  – дистанция в километрах.

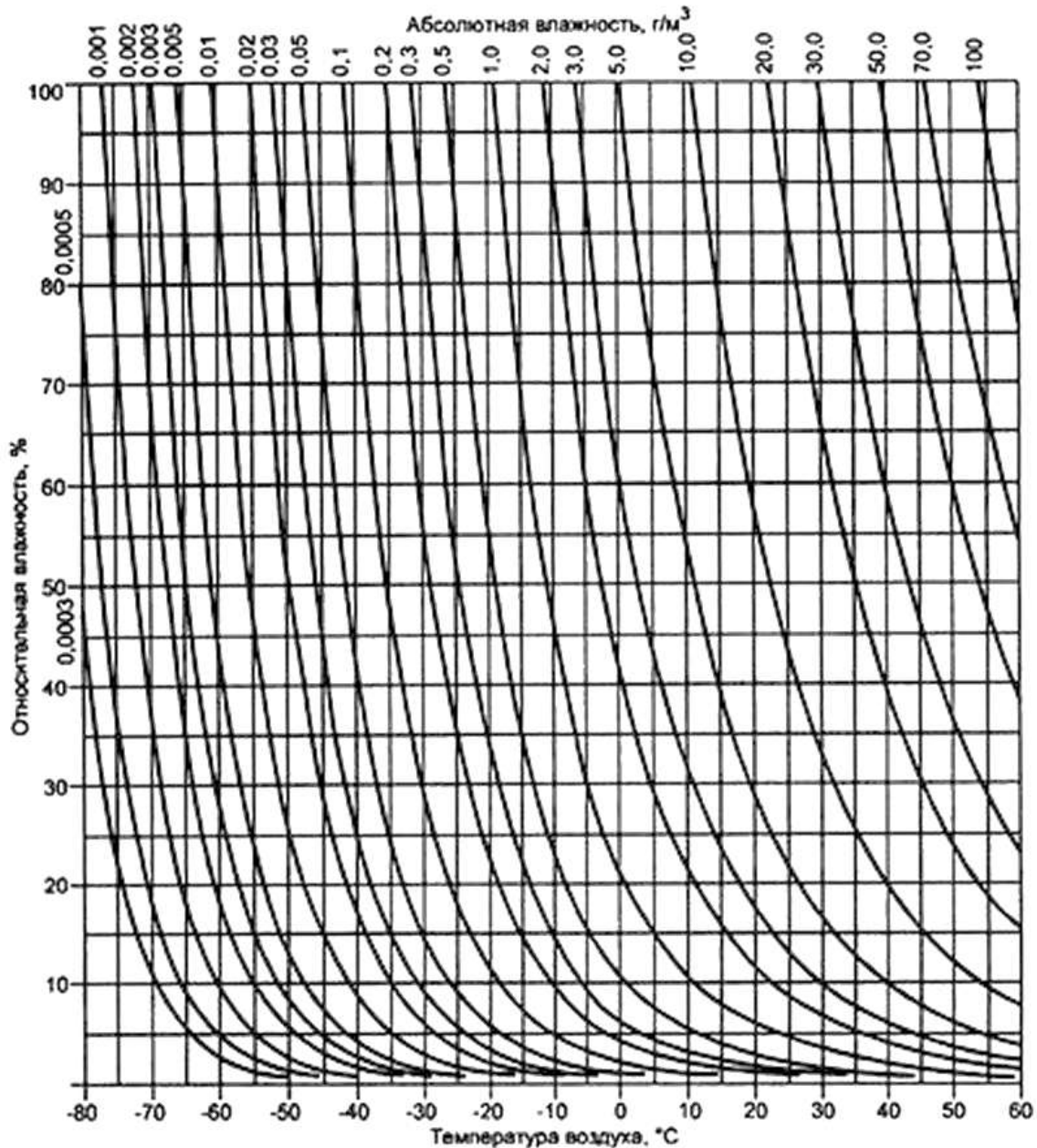


Рисунок 3.4 – Климатограмма зависимости относительной и абсолютной влажности воздуха от температуры [11]

Таблица 3.2 – Упругость насыщающих паров в зависимости от температуры воздуха

$t_B, ^\circ\text{C}$	$e, \text{Па}$
0	$6.108 \cdot 10^{-4}$
5	$8.719 \cdot 10^{-4}$
10	$1.227 \cdot 10^{-3}$
15	$1.704 \cdot 10^{-3}$
20	$2.337 \cdot 10^{-3}$
25	$3.167 \cdot 10^{-3}$
30	$4.243 \cdot 10^{-3}$
35	$5.624 \cdot 10^{-3}$
40	$7.377 \cdot 10^{-3}$
45	$9.585 \cdot 10^{-3}$
50	$1.234 \cdot 10^{-2}$

*Углекислый газ.* Концентрация не зависит от высоты и равна 0,03–0,04%. Над городами концентрация углекислого газа повышается до 0,05%. Углекислый газ довольно равномерно распределён до высоты 25 км. На высоте более 25 км его можно не учитывать.  $W$ , атм·см. – концентрация углекислого газа, показывающая длину пути в сантиметрах, на котором содержится то же число молекул газа, находящегося при атмосферном давлении, как и в столбе произвольной длины и произвольного давления. Вычисляется по формуле:

$$W = 30 \cdot 10^{-4} \cdot L \text{ [атм} \cdot \text{см]}, \quad (3.4)$$

где  $L$  – произвольная дистанция, км.

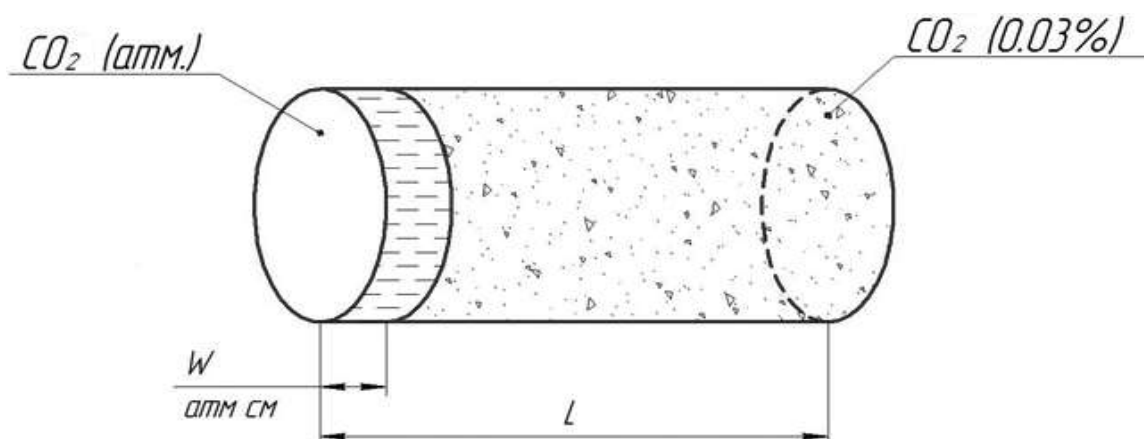


Рисунок 3.5 – Пояснение к расчёту содержания  $CO_2$  в воздухе

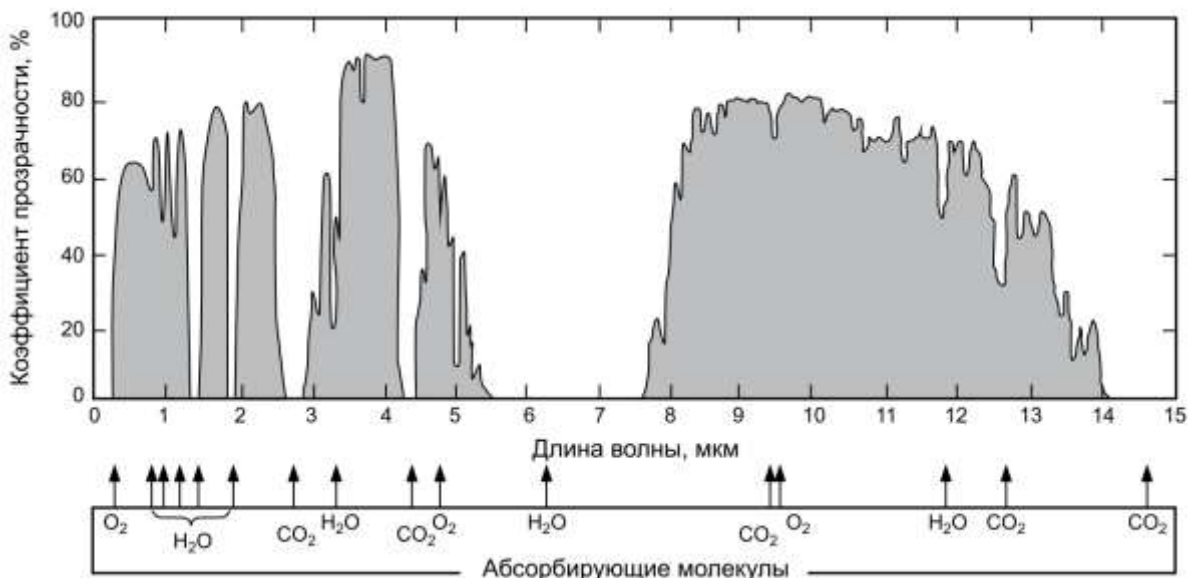


Рисунок 3.6 – Спектр пропускания атмосферы Земли

Озон сосредоточен в основном на высотах 25–33 км, вызывается ионизацией воздуха ультрафиолетом излучения Солнца. Концентрация озона в воздушной атмосфере составляет 0,00004%.

### 3.1.1 Влияние гидрометеоров и атмосферных газов

Пыль, дым, частицы солей, пыльца растений, бактерий, микробы, капли воды, кристаллы льда и другие частицы играют большую роль при рассеивании излучения, а также являются центрами конденсации водяных паров при образовании туманов и облаков. Распределение частиц по высоте связано со скоростью их падения, которая пропорционально квадрату их размера и может быть вычислена по формуле Стокса [12]:

$$V = 1.26 \cdot 10^6 \cdot r, \tag{3.5}$$

где  $r$  – радиус частиц, см.

Распределение частиц по высоте можно подсчитать по следующей формуле:

$$n_H = n_0 \cdot e^{(-V \cdot H / K)}, \tag{3.6}$$

где  $K$  – коэффициент турбулентности ( $V/K=400 \div 750$ ).

В чистом сельском воздухе содержится до 0,00025 г/м<sup>3</sup> пыли, после дождя концентрация уменьшается в 3-5 раз.

Количество воды в дождевых каплях при дожде существенно меньше, чем в парах воды в тумане при том же объёме атмосферы. Следовательно, при дожде поглощение излучения увеличивается слабо, но растёт рассеивание, см. таблицу 3.3.



Таблица 3.3 – Количество и размер частиц, содержащихся в воздухе

Примесь	Размер частиц, мкм	Число частиц, см <sup>3</sup>	Содержание воды, г/м <sup>3</sup>
Ионы	10 <sup>-3</sup>	10	
Пыль	1÷100	1÷10	
Капельки дымки	10 <sup>-1</sup> ÷1	10	
Слабый туман	5	100	6·10 <sup>-2</sup>
Плотный туман	2050	200	5·10 <sup>-1</sup>
Изморозь	100	-	9·10 <sup>-3</sup>
Слабый дождь	500	-	0,28
Ливень (100 мм/ч)	2000	-	5,4

В литературе имеются обширные и в то же время неполные и не всегда согласующиеся друг с другом данные по влиянию гидрометеоров на излучение. Имея в виду задачу грубой сопоставительной оценки затухания волн миллиметрового и ИК диапазонов, обратимся к графику затухания излучения в тумане (метеорологическая дальность видимости (МДВ) – 100 м) и дожде от малой до средней интенсивности.

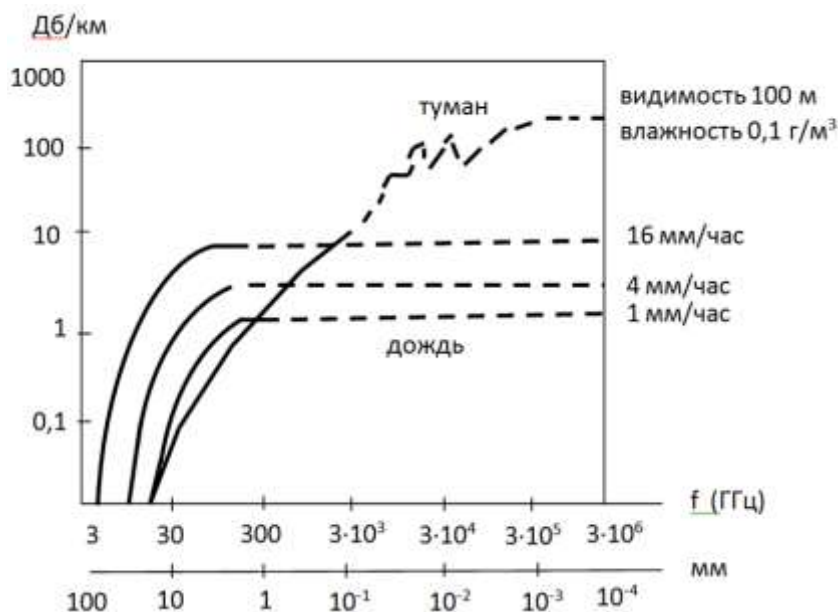


Рисунок 3.7 – График затухания излучения в тумане и дожде

Как видно из графика (рис. 3.7), затухание ИК излучения в таком тумане составляет 100 дБ/км и более, что делает канал неработоспособным. При  $\lambda > 1$  мм затухание  $\gamma < 1$  дБ/км, что говорит о приемлемых условиях распространения. По более жёстким оценкам  $\gamma < 1$  дБ/км при  $\lambda \approx 1$  мм и видимости не хуже 600 м или при  $\lambda \sim 3$  мм и видимости не хуже 300 м.

Ниже, на рисунке 3.8, представлены зависимости затухания от МДВ для четырёх длин волн.

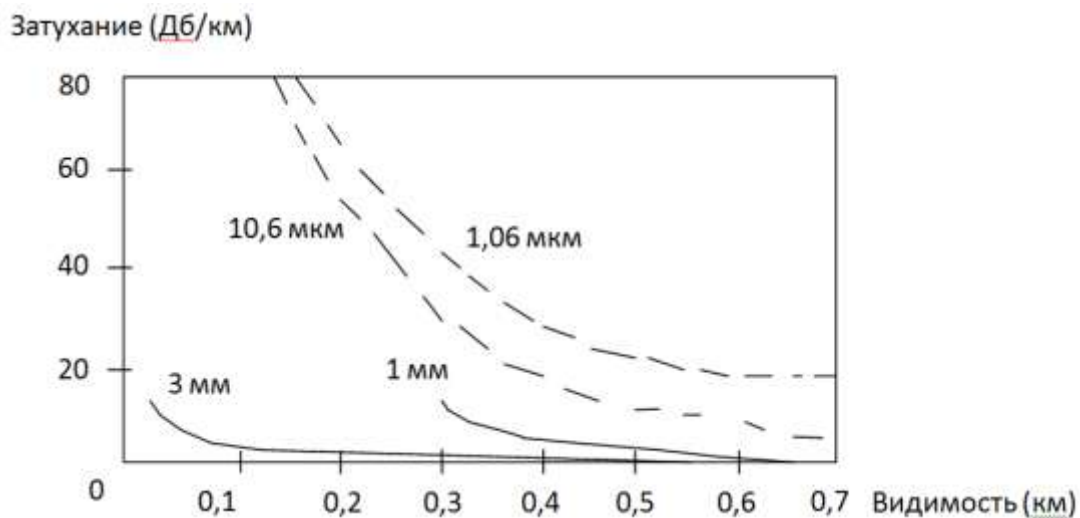


Рисунок 3.8 – Зависимость затухания излучения от МДВ

Сравнение ИК и радиодиапазонов приводит к выводу, что работоспособность в относительно густом тумане может обеспечиваться в диапазоне волн  $\lambda \geq 3$  мм. По величине затухания излучения в дожде ИК- и радиоканалы сопоставимы и сохраняют работоспособность (затухание не более 1 дБ/км) при относительно слабом дожде с интенсивностью около 1 мм/ч на трассе длиной около 1 км (распространение в одном направлении), либо при более сильном дожде на части трассы.

Затухание излучения в облаках зависит от их параметров (толщина, водность, концентрация и размеры капель) и для длин волн от 0,48 до 10,6 мкм лежит в пределах 50 – 650 дБ/км, мало меняясь в зависимости от длины волны. Данные по миллиметровому диапазону ограничены: в [2, 21] приводятся значения затухания для  $\lambda = 9$  мм в пределах от 0,647 до  $1,25 \frac{\text{дБ} \cdot \text{г}}{\text{км} \cdot \text{м}^3}$ . Там же отмечается пренебрежимо малое затухание, вносимое ледяными облаками. Следует отметить, что существенное значение при работе сквозь облака может иметь изменение затухания при движении носителя аппаратуры за счёт пространственной неоднородности параметров облаков.

Затухание СВЧ колебаний в сухом снеге значительно меньше, чем в дожде, а в мокром – примерно в 2,5 раза больше (при одинаковой интенсивности). О влиянии снегопада на затухание в ИК диапазоне имеется мало сведений. Средней интенсивности снегопада соответствует затухание примерно 3,4 дБ/км, что, по-видимому, больше затухания миллиметровых волн в сухом снеге и меньше – в случае мокрого снега.

Сухой град не ослабляет излучение СВЧ, но покрытые плёнкой воды тающие частицы могут создавать значительное ослабление.

Таким образом, наиболее неблагоприятными для ТГц диапазона являются мокрый снег или тающий град.

Затухание оптических волн в дымке при МДВ около 1-2 км составляет 3,4 дБ/км для  $\lambda = 10,6$  мкм и 10 дБ/км для  $\lambda = 1$  мкм. Данные по затуханию в дымке и пыли недостаточны. По мнению зарубежных специалистов, именно в этих условиях (наряду с туманом) волны миллиметрового диапазона обладают преимуществом по сравнению с оптическим (включая ИК область).

В целом приведённые данные свидетельствуют о целесообразности использования излучений в области  $\lambda \geq 3$  мм для решения задач обнаружения и, возможно, радионаблюдения в условиях действия тумана, дыма и пыли. При ограничениях на размер приёмной антенны и требованиях максимального разрешения рабочий диапазон определяется окном прозрачности 2,6 – 4,2 мм с затуханием 0,3 дБ/км в чистой атмосфере и 1 дБ/км при МДВ 100 – 300 м при  $\lambda \sim 3,2$  мм. Соответствующая средняя рабочая частота составляет 94 ГГц.

### **3.2 Методы расчёта влияния атмосферы на пропускание оптического излучения**

Для вычисления ослабления оптического излучения есть закон Бугера – Ламберта – Бера, который для реальных расчётов не применим, у него есть ограничения. Этот закон описывает ослабление параллельного монохроматического пучка света при распространении его в поглощающей среде, состоящей из агрегатов молекул, отдельные молекулы или ионы, которые являются поглощающими центрами, остаются неизменными [13].

#### **3.2.1 Метод расчета коэффициентов пропускания по Эльдару - Стронгу**

В основе данного метода лежит определение коэффициента прозрачности (пропускания) атмосферы, исходя из концентрации водяного пара, точнее - исходя из величины слоя осажденной воды (водности). Метод Эльдара – Стронга базируется на том, что пропускание атмосферы определяется в районе окон прозрачности. Кроме того, принимается, что вариации коэффициента поглощения определяются только параметрами воды, это позволяет использовать только один изменяющийся параметр - толщину слоя осажденной воды. Весь диапазон излучения от 0,7 до 5,9 мкм разбивается на семь диапазонов неравной ширины. Ширину интервала можно посмотреть в таблице 3.4.

Алгоритм расчёт состоит из ряда этапов.

1. Определить величину слоя осажденной воды, в метрах. Величину осажденного слоя воды можно вычислить по формулам (3.2) и (3.3). Эльдар

и Стронг предложили следующую формулу для определения коэффициента пропускания, которая применимая для дистанций свыше 2 км:

$$\tau_n = t_0 - K_1 \cdot \lg(\omega \cdot 1000), \quad (3.7)$$

где  $t_0$  и  $K_1$  – коэффициент, зависящие от длины волны,  $\omega$  – водность в метрах.

Расчёт коэффициентов по этому методу возможен лишь для ИК области от 0,7 мкм до 5,9 мкм, данные для расчёта из таблицы 3.4.

Таблица 3.4 – Данные для расчета коэффициентов  $K_1$  и  $t_0$

Интервал	Спектральный интервал, мкм.	$K_1$	$t_0$
I	0,70 – 0,92	15,1	106,3
II	0,92 – 1,10	16,5	106,3
III	1,10 – 1,40	17,1	96,3
IV	1,40 – 1,90	13,1	81,0
V	1,90 – 2,70	13,1	72,5
VI	2,70 – 4,30	12,5	72,3
VII	4,30 – 5,90	21,2	51,2

2. Вычислить значения коэффициентов пропускания в относительных единицах для семи интервалов

$$\tau_{\lambda_i} = (t_{0_i} - K_{1_i} \cdot \lg(\omega \cdot 1000)) / 100, \quad (3.8)$$

где  $\omega$  – водность в метрах.

3. Определить испускательную способность АЧТ (или спектральная плотность энергетической светимости) для каждого интервала. Значения светимости можно рассчитать, или для всего интервала, через определённый интеграл, или в упрощённом виде, используя теорему о среднем, по формулам (2.1) – (2.4) в относительных единицах:

$$M_{e,\lambda_i} = \left( \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda \right) / M_{e,\lambda_{\max}}. \quad (3.9)$$

Согласно теореме о среднем, светимость можно определить по формуле:

$$M_{e,\lambda_{cp}} \cdot \Delta\lambda_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e,\lambda}(\lambda, T) d\lambda.$$

Согласно следствию теоремы о среднем, можно оценить значение интервала:

$$M_{e,\lambda_2} \cdot \Delta\lambda_i < \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{e,\lambda_{cp}}(\lambda, T) d\lambda < M_{e,\lambda_1} \cdot \Delta\lambda_i.$$

4. Вычислить светимость без учёта прохождения атмосферы:

$$M_{e0} = \sum_{i=1}^7 M_{e,\lambda_i}(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda_i. \quad (3.10)$$

5. Вычислить светимость с учётом прохождения атмосферы:

$$M_{e\tau} = \sum_{i=1}^7 M_{e,\lambda_i}(\lambda, T) \cdot \Delta\lambda_{i\cdot\tau_{\lambda_i}}. \quad (3.11)$$

6. Определить коэффициент пропускания для всего диапазона:

$$\tau_n = \frac{M_{e\tau}}{M_{e0}}, \quad (3.12)$$

Для расчёта полного коэффициента пропускания надо найти коэффициент рассеяния в атмосфере. Для этого надо использовать формулу, предложенную Элдаром и Стронгом для ясной погоды:

$\tau_p = 0,998^{\omega}$  и суммарный коэффициент будет:

$$\tau = \tau_n + \tau_p. \quad (3.13)$$

**Расчёт пропускания методом Эльдера – Стронга на наклонных трассах.**

Расчёт для наклонных трасс ничем принципиально не отличается от обычного расчёта, но надо учитывать изменение влажности воздуха с высотой по формуле (3.14):

$$\omega_{\text{накл.тр.}} = \frac{a_0 \cdot f \cdot K \cdot \lg(e)}{\gamma \cdot \sin(\alpha)} \left( 1 - 10^{\frac{-L_H \cdot \sin(\alpha)}{K}} \right), \quad (3.14)$$

где  $K \cdot \lg(e) = L_{\text{эфф}}$  – эффективная расстояние для горизонтальной трассы с одинаковым поглощением ( $K=5000$ ),  $\alpha$  – угол наклона трассы к горизонту.

Если наклонная трасса начинается с некоторой высоты  $H$ , тогда расчет ведется согласно:

$$\omega_{L_H} = \omega_{L_H+L_1} - \omega_{L_1}, \quad (3.15)$$

где  $L_1 = \frac{H_1}{\sin(\alpha)}$  – эффективная расстояние для горизонтальной трассы с одинаковым поглощением ( $K=5000$ ),  $\alpha$  – угол наклона трассы к горизонту.

### 3.2.2 Метод расчета коэффициентов пропускания по Говарду, Бёрчу и Вильямсу

По методу Говарда, Бёрча и Вильямса коэффициенты пропускания вычисляются отдельно для окон пропускания и отдельно для полос поглощения. Причем в окнах учитывается только рассеяние, а в полосах - только поглощение.

Установлено, при большой концентрации поглотителя поглощение учитывается пропорционально логарифму количества поглотителя, а при слабой - пропорционально квадратному корню из количества поглотителя.

Согласно этому используются следующие выражения для вычисления полного поглощения  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ :

для «слабой» полосы:

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} a_\nu d\nu = C_1 \cdot \tilde{W}^{1/2} \cdot (P + p)^{\alpha_1}, \quad (3.16)$$

для «сильной» полосы:

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} a_\nu d\nu = C + D \cdot \lg(\tilde{W}) + \alpha_2 \cdot \lg(P + p), \quad (3.17)$$

где  $a_\nu$  – спектральный коэффициент поглощения в шкале волновых чисел;  $\tilde{W}$  – это или концентрация углекислого газа (атм·см), или слой осаждённой воды  $\omega$ , соответственно;  $C$ ,  $C_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  – постоянные, характеризующие отдельные полосы поглотителя (табличные данные, приведенные в таблицах 3.5, 3.6, 3.7 и 3.8);  $(P + p)$  – полное давление, где  $p = \frac{f}{100}$ ,  $E_w$  – упругость насыщенных паров, зависящая от температуры ( $0,75$  мм рт. ст =  $1$  мб =  $10^3$  г/см·с<sup>2</sup>);  $\nu_1$  и  $\nu_2$  – волновые числа, соответствующие рассматриваемому спектральному интервалу.

Таблица 3.5 – Постоянные коэффициенты для вычисления поглощения парами воды для слабой полосы

Полосы поглощения $\text{H}_2\text{O}$ , мкм	Граница полос		$\Delta\nu$ , см <sup>-1</sup>	$C_1$	$\alpha_1$	Пределы применимости формулы
	$\nu$ , см <sup>-1</sup>	$\lambda$ , мкм				
0,94	11500÷10200	0,87÷0,98	1300	38	0,27	200
1	9300÷8300	1,075÷1,24	1000	31	0,26	200
1,38	8000÷6500	1,25÷1,54	1500	163	0,3	350
1,87	5900÷4800	1,70÷2,08	1100	152	0,3	275
2,7	4400÷3340	2,30÷3,00	1060	316	0,32	200
3,2	3340÷2800	3,00÷3,75	540	40,2	0,3	500
6,3	2050÷1150	4,90÷8,7	900	356	0,3	160

Таблица 3.6 – Постоянные коэффициенты для вычисления поглощения парами воды для сильной полосы

Полосы поглощения $\text{H}_2\text{O}$ , мкм	Граница полос		C	D	$\alpha_2$
	$\nu$ , см <sup>-1</sup>	$\lambda$ , мкм			
1,38	8000÷6500	1,25÷1,54	202	460	198
1,87	5900÷4800	1,70÷2,08	127	232	144
2,8	4400÷3340	2,30÷3,00	334	246	150
6,3	2050÷1150	4,90÷8,7	302	218	157

Таблица 3.7 – Постоянные коэффициента для вычисления поглощения углекислым газом для слабой полосы

Полосы поглощения CO <sub>2</sub> , мкм	Граница полос		Δν, см <sup>-1</sup>	C <sub>1</sub>	α <sub>1</sub>	Пределы применимости формулы
	ν, см <sup>-1</sup>	λ, мкм				
1,4	7250 – 6650	1,38 – 1,5	600	0,058	0,41	80
1,6	6650 – 6000	1,52 – 1,67	550	0,063	0,38	80
2,0	5200 – 4750	1,92 – 2,1	450	0,492	0,39	80
2,7	3800 – 3480	2,64 – 2,87	320	3,15	0,43	50
4,3	2500 – 2160	4,0 – 4,63	340	–	–	50
4,8	2160 – 1980	4,63 – 5,05	180	0,12	0,37	60
5,2	1980 – 1870	5,05 – 5,35	110	0,024	0,40	30
15,0	800 – 570	18,2 – 12,5	250	3,16	0,44	50

Таблица 3.8 – Постоянные коэффициента для вычисления поглощения углекислым газом для сильной полосы

Полосы поглощения CO <sub>2</sub> , мкм	Граница полос		Δν, см <sup>-1</sup>	C	D	α <sub>2</sub>
	ν, см <sup>-1</sup>	λ, мкм				
2,0	5200 – 4750	1,92 – 2,1	450	-536	138	114
2,7	3800 – 3480	2,64 – 2,87	320	-137	77	68
4,3	2500 – 2160	4,0 – 4,63	340	27,5	34	31,5
15,0	800 – 570	18,2 – 12,5	250	-68	55	47

Расчёт среднего коэффициента пропускания для выбранной полосы  $\Delta\lambda = \lambda_1 \div \lambda_2$ , производится по формуле:

$$\tau_{\Delta\lambda} = 1 - a_{\text{погл}} = 1 - \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} a_{\nu} d\nu}{\nu_1 - \nu_2}. \quad (3.18)$$

3. В случае перекрытия полос поглощения углекислого газа и паров воды (см. рисунок 3.10), суммарное поглощение вычисляется по следующей формуле:

$$\int_{\nu_2}^{\nu_3} a_{\nu(C_2O+H_2O)} d\nu = \int_{\nu_2}^{\nu_3} a_{\nu(H_2O)} d\nu + \varepsilon_1 \int_{\nu_2}^{\nu_3} a_{\nu(C_2O)} d\nu, \quad (3.19)$$

где  $\varepsilon_1$  – коэффициент взаимного влияния поглотителей, зависящий от поглощения паров воды, см. рисунок 3.9.

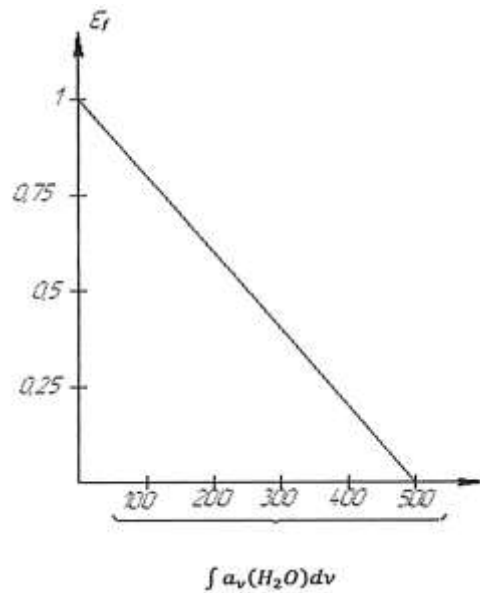


Рисунок 3.9 – Коэффициент взаимного влияния поглотителей  $\varepsilon_1$

Если  $\int_{\nu_1}^{\nu_2} a_{\nu(H_2O)} d\nu \geq 500$ , то поглощение  $CO_2$  не учитывается. При вычислениях  $\tau(H_2O, CO_2) \neq \tau(H_2O) \cdot \tau(CO_2)$ , а суммарное пропускание вычисляется по формуле:

$$\tau_{\Delta\nu=\nu_1-\nu_2} = \underbrace{\left( 1 - \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_2} a_{\nu(H_2O)} d\nu}{\nu_1 - \nu_2} \right)}_{*} \cdot \underbrace{\left( 1 - \frac{\varepsilon_1 \int_{\nu_4}^{\nu_3} a_{\nu(CO_2)} d\nu}{\nu_3 - \nu_4} \right)}_{**} \quad (3.20)$$

В формуле для компонента (\*) в данном спектральном интервале расчёт коэффициента поглощения начинается вести по слабой полосе, т.к. их больше. Если её нет, или суммарный коэффициент поглощения в относительных единицах больше коэффициента применимости, то расчёт по формуле - для сильной полосы. Если в нашем спектральном интервале сильной полосы нет, то расчёт ведут для ближайшей сильной полосы.

Алгоритм расчёта пропускания.

1. Определение концентрации  $H_2O$  и  $CO_2$  (то есть  $\omega$  и  $W$ ).
2. Вычисление спектральных коэффициентов  $\tau_{i\lambda_{H_2O}}$  и  $\tau_{i\lambda_{CO_2}}$  для полос поглощения воды и углекислого газа. Результат вычислений сводим в таблицу 3.9.
3. Там где области поглощения перекрываются, находим коэффициент пропускания  $\tau_{i\lambda_{H_2O}}$  и  $\tau_{i\lambda_{CO_2}}$  для комбинированных полос поглощения.



4. При вычислении интервал полосы поглощения берётся табличным ( $\Delta\nu_{H_2O} = \nu_1 - \nu_2$ ;  $\Delta\nu_{CO_2} = \nu_3 - \nu_4$ ), а в таблице записывается истинный спектральный интервал с учётом полосы перекрытия:

$$\Delta\nu_{CO_2} = \nu_2 - \nu_4; \Delta\nu_{H_2O} = \nu_1 - \nu_3; \Delta\nu_{H_2O+CO_2} = \nu_3 - \nu_2;$$

$$\Delta\lambda_{CO_2} = \lambda_4 - \lambda_2; \Delta\lambda_{H_2O} = \lambda_3 - \lambda_1; \Delta\lambda_{H_2O+CO_2} = \lambda_2 - \lambda_3.$$

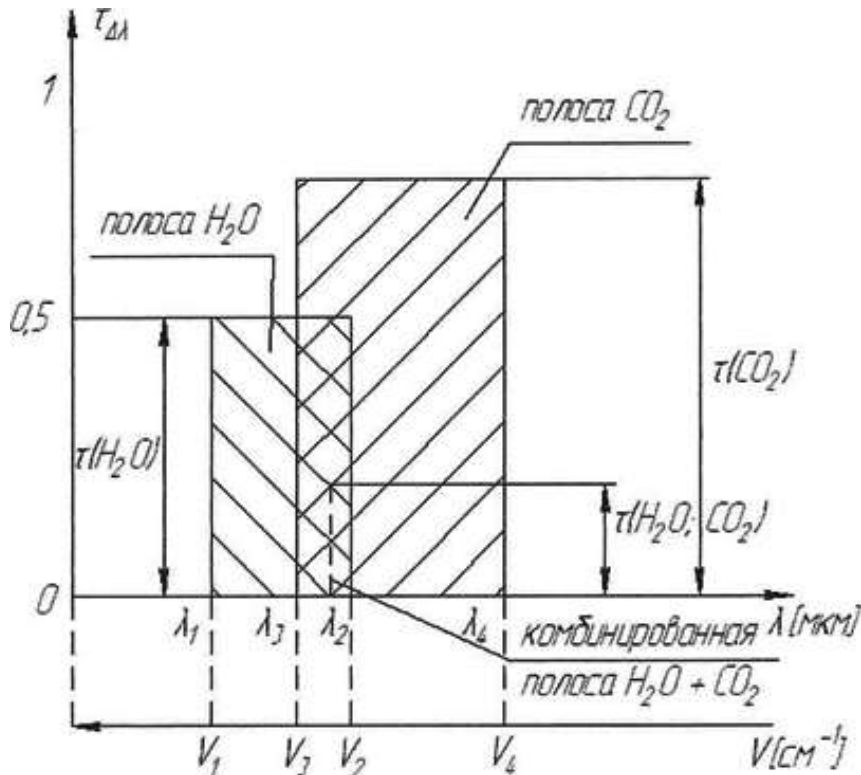


Рисунок 3.10 – К расчёту пропусканию по методу Говарда, Бёрча и Вильямса

Таблица 3.9 – Таблица для ввода результатов вычисления спектральных коэффициентов  $\tau_{i\lambda_{H_2O}}$  и  $\tau_{i\lambda_{CO_2}}$  для полос поглощения воды и углекислого газа

$\lambda$ , мкм	Граница интервала, мкм	Характеристика интервала	$M_{e,\lambda_i,ср}$	$M_{e,\lambda_i}\Delta\lambda_i$	$\tau_\lambda$	$M_{e,\lambda_i}\tau_\lambda\Delta\lambda_i$
		Полоса $H_2O$				
		Полоса $CO_2$				
		Комбинированная полоса $H_2O$ и $CO_2$				
		«Окно»				

5. Построение кривой  $M_{e\lambda T}$  и нанесение на ней полос поглощения и «око» пропускания.

6. Определение по графику значений  $M_{e\tau\lambda_{i\text{cp}}}$  для каждой полосы.
7. Вычисление суммарного коэффициента пропускания по формуле:
 
$$\tau_n = \left( \sum M_{e\lambda_{i\text{cp}}} \cdot \tau_{\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i \right) / \left( \sum M_{e\lambda_{i\text{cp}}} \cdot \Delta\lambda_i \right). \quad (3.21)$$

### 3.2.3 Расчета коэффициентов пропускания по методу Говарда, Бёрча и Вильямса на наклонных трассах

На наклонных трассах концентрация  $\text{H}_2\text{O}$  принимает вид формулы, а концентрация  $\text{CO}_2$  в пределах высот от нуля до 25 км остается постоянной и ее формула выглядит следующим образом:

$$W_{\text{CO}_2} = 30 \cdot L_H, [\text{атм} \cdot \text{см}],$$

где  $L_H$  – наклонный путь в километрах.

Учет изменения давления с высотой следует вести отдельно для “слабых” и ”сильных” полос, согласно соотношению:

$$P = P_0 \cdot e^{-H/h}, \quad (3.22)$$

где  $h = f(H)$ , приближенно  $h$  можно принять постоянным и равным 7000 м до высоты 25 км.

Для расчета пропускания методом Говарда, Бёрча и Вильямса на наклонных трассах необходимо в выражениях (3.16), (3.17) вместо  $(P + p)^{\alpha_1}$  и  $\lg(P + p)$ , которые меняются с высотой, подставить некоторые средние значения  $(P)_{cp}^{\alpha_1}$  и  $\lg(P)_{cp}$ :

$$P_{cp}^{\alpha_1} = \frac{P_0^{\alpha_1} \cdot h}{(H_2 - H_1)\alpha_1} \cdot (e^{-H_1 \cdot \alpha_1/h} - e^{-H_2 \cdot \alpha_1/h}). \quad (3.23)$$

$$\text{Если } H_1 = 0, H_2 = H, \text{ то } P_{cp}^{\alpha_1} = \frac{h}{H \cdot \alpha_1} \cdot P_0^{\alpha_1} (1 - e^{-H \cdot \alpha_1/h}).$$

$$\text{Для сильной полосы } (\lg P)_{cp} = \lg P_0 - \left( (\lg(e \cdot (H_2 + H_1))) / (2h) \right).$$

Данный метод пригоден для высот меньших или равных 20 км. При  $H \rightarrow \infty$  средние величины стремятся к нулю, так как за пределами 20 км давление резко падает. Таким образом, получим для слабой полосы пропускание 100%, поглощение – 0%.

### 3.2.4 Метод стандартных атмосфер

Этот метод базируется на наличии большого числа экспериментально измеренных характеристик спектрального пропускания трасс различной протяженности при различных условиях.

Как уже было сказано, закон Бугера для однородной среды имеет следующий вид:

$$\Phi_{\tau\lambda} = \Phi_{0\lambda} \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot L}, \quad (3.24)$$

где  $e^{-\alpha_\lambda \cdot L} = \tau_{\lambda L}$ .

Аналогично этот закон можно записать для спектральной плотности энергетической светимости:

$$M_{\tau_{L_i}(\lambda)} = M_{0L_i}(\lambda) \cdot e^{-\alpha_\lambda \cdot L_i} = M_{0L_i}(\lambda) \cdot \tau_{\lambda L_i}. \quad (3.25)$$

Если обозначить спектрозональное пропускание слоя атмосферы  $L_0$  при конкретных условиях  $\tau_{0\lambda}$ , то пропускание на расчетной дальности будет:

$$\tau_{\lambda i} = \tau_{0\lambda i}^{L/L_0}. \quad (3.26)$$

Учитывая это соотношение, в конечном итоге получим:

$$\tau = \left( \sum_{i=1}^n M_{e\lambda_i} \cdot \tau_{0\lambda i}^{L/L_0} \cdot \Delta\lambda_i \right) / \left( \sum_{i=1}^n M_{e\lambda_i} \cdot \Delta\lambda_i \right), \quad (3.27)$$

Для вычисления  $\tau_{\lambda i}$  используется набор стандартных атмосфер с экспериментально определенными коэффициентами  $\tau_{0\lambda i}$ .

В тех случаях, когда нет подходящих характеристик пропускания, в качестве нормализованных характеристик стандартной атмосферы можно воспользоваться таблицами спектрозонального пропускания воды и углекислого газа с поправкой на рассеивание с учетом ожидаемого значения метеорологической дальности видения.

### 3.2.5 Порядок расчета по методу стандартных атмосфер

1. Построение кривой  $M_{e\lambda_i}$  и разбиение её на участки через  $\Delta\lambda_i$ , при этом спектральный интервал выбирается достаточно малым - не более 0,1-0,2 мкм; с учетом теоремы о среднем определяется  $M_{e\lambda_{cp}}$  для  $\Delta\lambda_i$ .

2. Нанесение ближайшей кривой пропускания стандартной атмосферы, то есть  $\tau_{0\lambda i} = f(\lambda)$  при известной дистанции  $L_0$ .

3. Вычисление значения  $\tau_{\lambda i} = \tau_{0\lambda i}^{L/L_0}$ .

4. Заполнение таблицы

$\lambda_i$ , мкм	$\Delta\lambda_i$ , мкм	$M_{e,\lambda_i cp}$	$M_{e,\lambda_i cp} \Delta\lambda_i$ , мкм	$\tau_{0\lambda}$	$\tau_{\lambda i} = \tau_{0\lambda}^{L/L_0}$	$M_{e,\lambda_i} \tau_{\lambda} \Delta\lambda_i$ , мкм

5. Вычисление интегрального коэффициента пропускания.

Рассмотренный интегральный метод учитывающий поглощение и рассеяние, значительно проще наличия хорошего набора стандартных атмосфер. Он дает хорошие результаты. Первые два метода (см.п. 3.2.1 и 3.2.2) учитывают только поглощение. В литературе имеются таблицы зависимости  $\tau_{i\lambda_{H_2O}}$  от осажденного слоя воды, а также  $\tau_{i\lambda_{CO_2}}$  от концентрации  $CO_2$ , которыми можно пользоваться для прикидочных расчетов, так как суммарный коэффициент пропускания как произведение в

этом случае брать нельзя из-за взаимного влияния поглотителей. На рисунке 3.11 показано общее спектральное пропускание атмосферы толщиной 1850 м в области длины волн  $0,6 \div 15$  мкм при приведенной толщине водяных паров 17 мм.

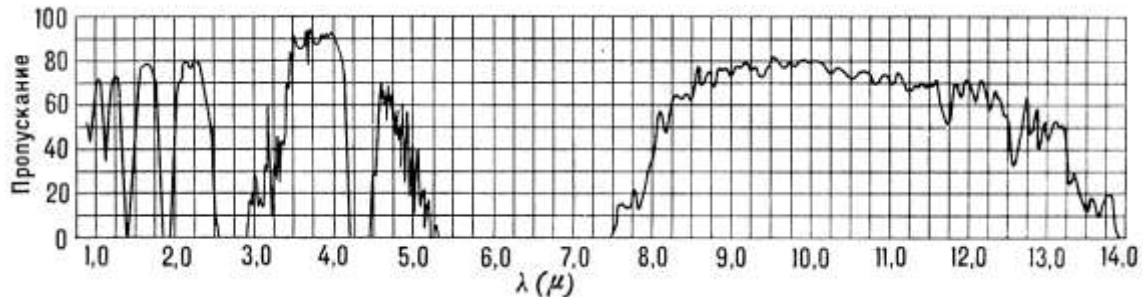


Рисунок 3.11 – Спектральное пропускание атмосферы толщиной 1850 м в области длины волн  $0,6 \div 15$  мкм

### 3.3 Выбор спектральных диапазонов в неблагоприятных условиях наблюдения

Типичные значения коэффициентов пропускания некоторых типов излучения приведены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Типичные значения коэффициентов пропускания некоторых типов излучения [14]

Видимый свет	$3 \div 5$ мкм	$8 \div 12$ мкм
1,0 (без тумана)	1,0	1,0
0,5 (в тумане)	0,67	0,97
0,1	0,36	0,56
0,01	0,01	0,22

Таким образом, когда атмосфера пропускает только 1% видимого света, количество пропускаемого ИК излучения в диапазоне  $8 - 12$  мкм составляет 22 %.

В процессе морских испытаний тепловизионного канала, установленного на платформе прицеливания 9LV – 200 – Швеция (фирмы Philips – Швеция, Филипс USFA Голландия, Mullarg LTD – Великобритания (приёмник)) при МДВ  $\geq 20$  км получена дальность обнаружения цели (имитатор – чёрный сосуд диаметром 40 см, заполненный водой, с нагревателем и датчиком температуры, расположенный на буксируемой платформе на высоте  $3 \text{ м} \div 7 \text{ км}$ . Даже при плохой метеовидности (МДВ  $\approx 2 \div 3$  км) при  $\Delta T = 30 \text{ К}$  цель обнаруживалась на дальности  $L > 4 \text{ км}$ .

Исходя из приведённых соображений, надо полагать, что наиболее приемлемым диапазоном в тепловизионном канале является окно прозрачности  $8\div 12$  мкм. Использование указанного диапазона вместо диапазона  $3\div 5$  мкм диктуется также тем, что в нем примерно в 10 раз меньше помехи от излучения неоднородностей небосвода, переотраженного от взволнованной морской поверхности. Это особенно важно при захвате и сопровождении низколетящих целей

Перспективы повышения эффективности современных систем наблюдения связаны с обеспечением их работоспособности с учётом требований всепогодности, помехозащищённости, независимости от условий естественного освещения и других факторов. Одним из путей решения этой задачи является создание многоканальных комплексированных систем, работающих в широком спектральном диапазоне.

В частности, эффективному применению ТПС препятствует ряд ограничений, связанных с выравниванием температурных контрастов при отсутствии суточного изменения температуры, ухудшением пропускания ИК излучения в атмосфере при наличии тумана, пыли, дымовых завес. В то же время затухание субмиллиметрового излучения в указанных средах значительно меньше.

### **3.4 ИК материалы**

При выборе оптических материалов для оптики ТПС необходимо учитывать: условия работы, рассчитанные габаритные характеристики объектива и характеристики выбранных приёмников излучения, условия формирования изображений (средняя температура фона, дисперсия температуры фона, минимальная и максимальная температура объекта и т.д.). Основная задача любого тепловизионного прибора заключается в визуализации теплового поля с пространственным периодом  $\psi$  в заданном телесном угле за определённое время формирования кадра  $\tau$  кадра с требуемым температурным разрешением  $\delta T$  для мгновенного поля зрения по горизонтали  $\Delta h$  и по вертикали  $\Delta v$  [15, 16]. Исходя из этих основных положений, далее можно рассматривать и вырабатывать требования к оптическим материалам приёмных систем ИК техники.

Исходя из этого, можно провести первую сводную классификацию применимых оптических материалов. На рис. 3.12 приводятся грубые оценки спектральных характеристик основных материалов ИК техники [16].

К основным оптическими постоянными оптического стекла можно отнести следующие параметры [16, 17].

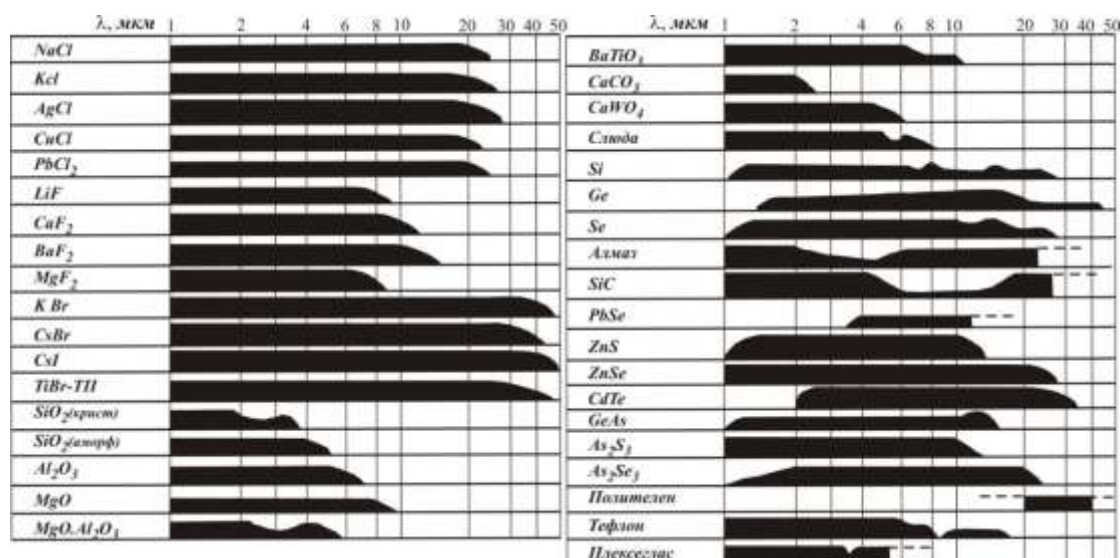


Рисунок 3.12 – Прозрачность оптических материалов в ИК области спектра ЭМК

*Показатель преломления.* В качестве основного показателя преломления оптического стекла конкретной марки в соответствии с ИСО 7944-84 установлен показатель преломления  $n_e$  для длины волны 546,97 нм спектральной линии ртути  $e$ .

*Средняя дисперсия.* В качестве основной средней дисперсии принята разность показателей преломления  $n_f - n_c$  для длин волн 479,99 и 643,85 нм спектральных линий  $F$  и  $C$  кадмия, ограничивающих видимую часть спектра (ИСО 7944 - 84):

$$v = (n_1 - 1) / (n_2 - n_3), \quad (3.28)$$

где  $n_2$  и  $n_3$  - показатели преломления для длин волн, ограничивающих какой-либо диапазон спектра;  $n_1$  - показатель преломления для длины волны, расположенной внутри диапазона.

В качестве основного коэффициента дисперсии, называемого также числом Аббе (ИСО 7944-84), принят  $v_e = (n_e - 1) / (n_f - n_c)$ .

Оптические бесцветные стекла классифицируют по типам в зависимости от значений показателя преломления и коэффициента дисперсии. Для удобства выбора типов и марок стекол строится диаграмма Аббе [16, 18] в координатах  $n_e, v_e$  (рис. 3.13).

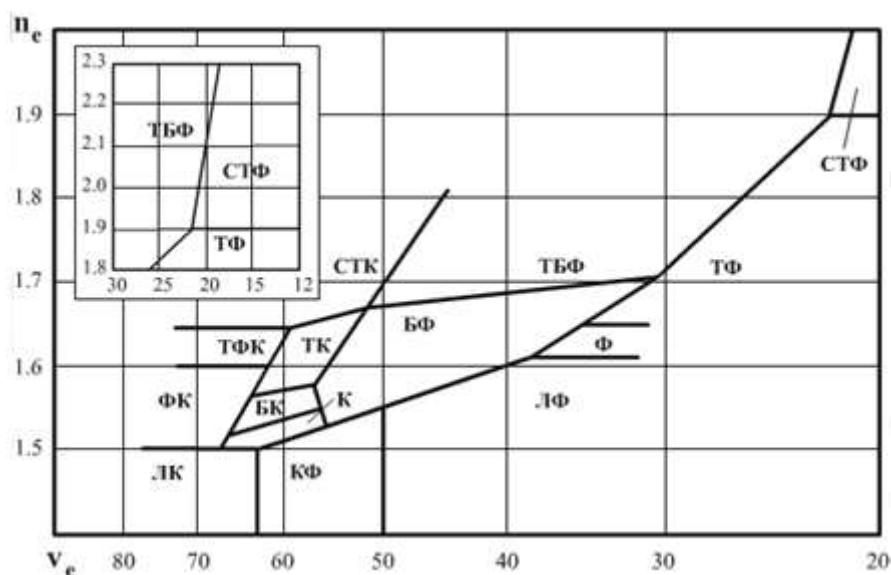


Рисунок 3.13 – Диаграмма Аббе в координатах  $n_e$ ,  $v_e$

### 3.4.1 Выбор оптических материалов для приборов ракетной техники

Среди большого числа материалов, пригодных для создания светофильтров и защитных окон-обтекателей в первую очередь могут быть названы ситаллы и различные керамики.

Ситаллы (стеклокристаллические материалы) – неорганические материалы, получаемые направленной кристаллизацией различных стёкол при их термической обработке. Они состоят из одной или нескольких кристаллических фаз. В ситаллах мелкодисперсные кристаллы (до 2000 нм) равномерно распределены в стекловидной матрице. Количество кристаллических фаз в ситаллах может составлять 20-95 % (по объёму). Изменяя состав стекла, тип инициатора кристаллизации (катализатора) и режим термической обработки, получают ситаллы с различными кристаллическими фазами и заданными свойствами (см. табл. 3.11). Впервые ситаллы были изготовлены в 50-х гг. XX в. Материалы, подобные ситаллам, за рубежом называются пирокерамом, девитрокерамом, стеклокерамом.

О механических свойствах и обобщённых показателях прозрачности можно судить по данным, приводимым в таблице 3.12.

Оптически прозрачные термостойкие и радиопрозрачные химически стойкие ситаллы получают на основе стекол системы  $Li_2O - Al_2O_3 - SiO_2$  (сподумено-эвкрипитовые составы); инициатор кристаллизации –  $TiO_2$ . В оптически прозрачных ситаллах размер кристаллов не превышает длины полуволны видимого света. Ситаллы, содержащие в качестве основных кристаллических фаз эвкрипит ( $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) или сподумен

( $Li_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ ), имеют, кроме того, температурные коэффициенты расширения, близкие к нулю, а иногда даже отрицательные – до  $-5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ . Области применения – космическая и лазерная техника, астрооптика, ракетостроение [19]. Как уже отмечалось, в ракетостроении для обтекателей-светофильтров головок самонаведения используются ситаллы и керамики на основе полудрагоценных и драгоценных кристаллов.

В настоящее время в головках самонаведения (ГСН) современных противоракетных комплексов (ПРК) используются защитные обтекатели-светофильтры на основе сапфиров (спектр пропускания представлен на рис. 3.14). Головка самонаведения американского мобильного ПРК дальнего перехвата THAAD (Theater High Altitude Area Defense) имеет ИК прозрачное сапфировое неохлаждаемое окно.

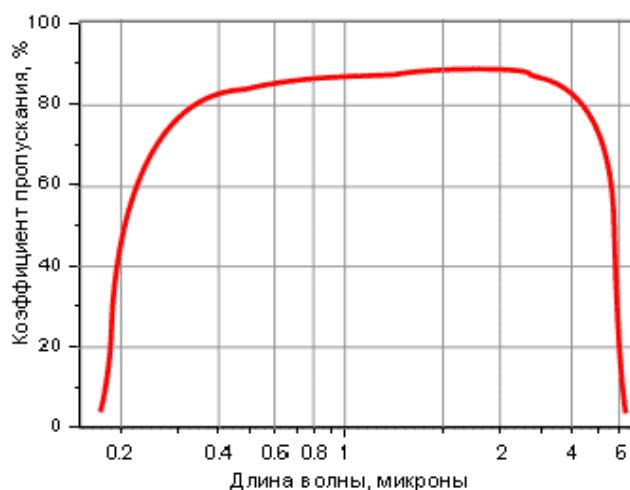


Рисунок 3.14 – Спектр пропускания отечественного сапфирового окна толщиной 2 мм

Характеристики сапфира (корунда) можно рассмотреть по данным, приводимым Санкт-Петербургским малым частным предприятием ЗАО «TYDEX» [20], созданным группой исследователей, несколькими учёными из Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН.

Сапфир (корунд) является анизотропным одноосным кристаллом. Это один из наиболее твёрдых и прочных синтетических материалов. Он обладает химической инертностью и низким коэффициентом трения. Износостойкость корунда в 8 раз выше, чем у стали. Являясь диэлектриком и термически стабильным материалом вплоть до  $1600 \text{ }^\circ\text{C}$ , отечественный синтетический корунд обладает также отличными оптическими свойствами – прозрачностью от 0,17 до 5,5 микрон.



Таблица 3.11 – Свойства промышленных ситаллов

Свойство	Высокопрочный MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -4SiO <sub>2</sub>	Радиопрзрачный химически стойкий Li <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -4SiO <sub>2</sub>	Прозрачный термически стойкий Li <sub>2</sub> O-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -2SiO <sub>2</sub>	Износостойкий и химически стойкий CaO-MgO- -SiO <sub>2</sub>	Слюдоситалл MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -SiO <sub>2</sub> -K <sub>2</sub> O-F	Биоситалл CaO-MgO- -SiO <sub>2</sub> -P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Ситаллоцемент PbO-ZnO- -B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>	Шлакоситалл CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - -SiO <sub>2</sub>
Главные кристаллич. фазы	Кордиерит	р-Сподумеп	р-Эвкрипит	Пироксен*	Фторфлогопит	Апатит, волластонит	Бораты свинца	Волластонит**
Плотн., кг/м <sup>3</sup>	2610	2420-2550	2228-2610	2970-3000	2520-2630	2600-2700	6300-4500	2650-2700
Прочность при изгибе, МПа	240-350	115-180	70-130	130-150	60-103	140-220	100-170	80-120
Модуль Юнга, ГПа	100-120	49,0-87,4	52,0-98,0	-	59,0-64,0	76,0-104,0	120-160	88-108
Микротвердость, МПа	6080-11000	5700-9300	5100-8750	8500-9200	2460	6400-6500	-	650-7500
Коеф. линейного расширения (20-320 °С) К <sup>-1</sup>	(11-57) · 10 <sup>-7</sup>	(6,0-20,0) · 10 <sup>-7</sup>	(-50-6) · 10 <sup>-7</sup>	(76-85) · 10 <sup>-7</sup>	(63-97) · 10 <sup>-7</sup>	(85,0-90,0) 10 <sup>-7</sup>	(40,0-120,0) · 10 <sup>-7</sup>	(80-85) · 10 <sup>-7</sup>
Макс. рабочая т-ра, °С	1250-1300	1200-1300	800-900	1000-1050	800-1000	-	—	850-900
Термич. стойкость, °С	800-900	750-850	1000-1200	200-350	-	-	-	150-200
Уд. электр. сопротивление. Igr	14-15	10-12	9-12	-	12	-	6,5-11,7 (250 °С)	10-15
ε (20°С, 1 МГц)	5,6-7,5	5,5-7,8	6,9-9,1	-	6,9-6,1	-	6,1-20,4 (10 <sup>3</sup> Гц)	-6,5-7,5 (50 Гц)
tg δ (25°С, 1 МГц)	(15-30) · 10 <sup>-4</sup>	(26-90) · 10 <sup>-4</sup>	(60-200) · 10 <sup>-4</sup>	-	(6-30) · 10 <sup>-4</sup>	-	(10-20) · 10 <sup>-4</sup> (10 <sup>3</sup> Гц)	280 · 10 <sup>-4</sup> (50 Гц)
Хим. стойкость, мг/см <sup>2</sup> кипячение в 5%-ном р-ре HCl	10-30	0,01-2,00	0,5	0,1-0,2	56-87	30-35	-	-
кипячение в 5%-ном р-ре NaOH	0,01-0,10	0,00-6,0	3		3,6-8,5			

\* Истираемость 0,001 г/см<sup>2</sup>. \*\* Истираемость 0,015-0,030 г/см<sup>2</sup>, водостойкость 99,9%, кислотостойкость 99,3%, щелочестойкость 80-85%.

Перечисленные качества корунда делают его незаменимым материалом для работы в жёстких условиях: при высокой температуре и/или давлении, в кислотном или щелочном окружении, когда требуется химическая стойкость, а также при высоких механических нагрузках. Даже в этих тяжелых условиях корунд не теряет своих оптических свойств.

Таблица 3.12 – Физические свойства сапфира

Химическая формула	$Al_2O_3$
Тип кристаллической структуры	гексагональная, 3 m
класс симметрии	
Параметры решетки	$a = 4,758; c = 12,991$
Плотность, г/см <sup>3</sup>	3,98
Твердость по Моосу	9
Диапазон оптической прозрачности, мкм	0,17-5,5
Показатель преломления (на длине волны 0,532 мкм)	$n_o = 1,7717; n_e = 1,76355$
Влагопоглощение	отсутствует
Модуль Юнга, ГПа	345
Модуль сдвига, ГПа	145
Модуль объемной упругости, ГПа	240
Предел упругости, МПа	275
Модуль разрыва, МПа	420 при 20°C; 280 при 500°C; 420 при 1000 °C
Коэффициенты упругости	$C_{11} = 496; C_{12} = 164; C_{13} = 115; C_{33} = 498; C_{44} = 148$
Коэффициент Пуассона	0,25–0,3
Коэффициент трения	0,15 на стали; 0,1 на сапфире

Однако, следует особо указать, что тенденция развития принципов построения ГСН в зарубежных разработках сводится к комбинированию каналов оптического и радиодиапазонов.

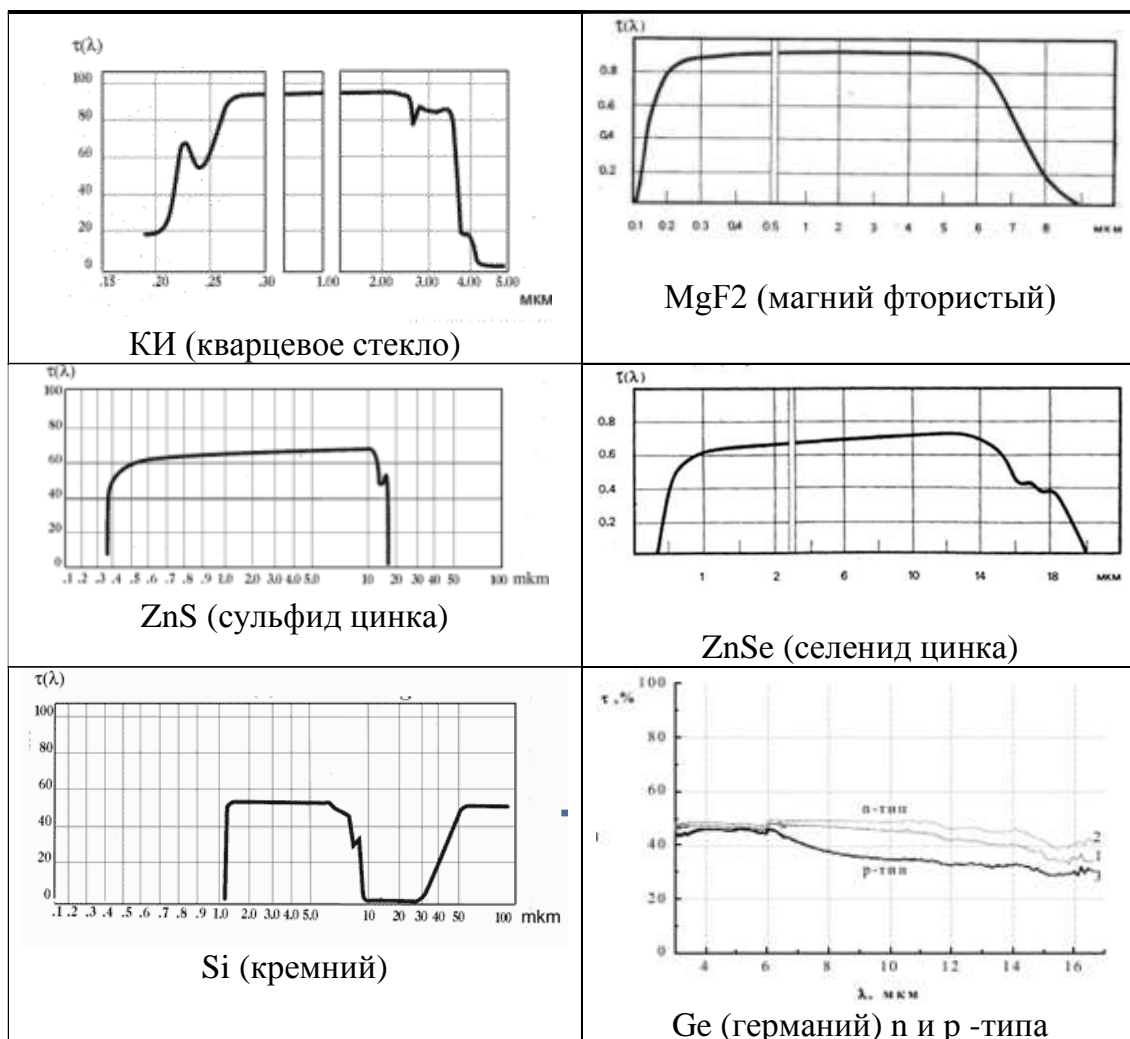
### 3.4.2 Выбор оптических материалов для комплексированных систем ИК и ТГц каналов формирования изображений

Как показали исследования сотрудников отдела субмиллиметровой спектроскопии ИОФ РАН [20], поглощение материалов прозрачных в ТГц, и СВЧ диапазонах слабо зависят от частоты излучения и составляют величины  $\epsilon''$  от  $10^{-1}$  до  $10^{-4}$  (см. рисунок 3.15).

Однако, как показали экспериментальные исследования сотрудников ФГУП «НПК ГОИ им. С.И. Вавилова» использование единого, целикового

защитного окна на ТГЦ и ИК каналы не совсем целесообразно, т.к. защитные окна из сапфиров либо будут иметь ухудшенные показатели пропускания в ИК канале (сапфиры USA), либо в длинноволновом - ТГЦ канале. Представление о пропускании различных материалов в ИК и ТГЦ диапазонах можно составить по таблице 3.13.

Таблица 3.13 – Пропускание различных материалов в ИК и ТГЦ диапазонах



Использование в качестве защитных окон полупрозрачных светофильтров из сапфиров и керамик, хорошо пропускающих ТГЦ излучение и полупрозрачных для ИК канала, возможно только до определённой границы ослабления. При этом допустимое ослабление в ИК канале не должно превышать 2 раз.

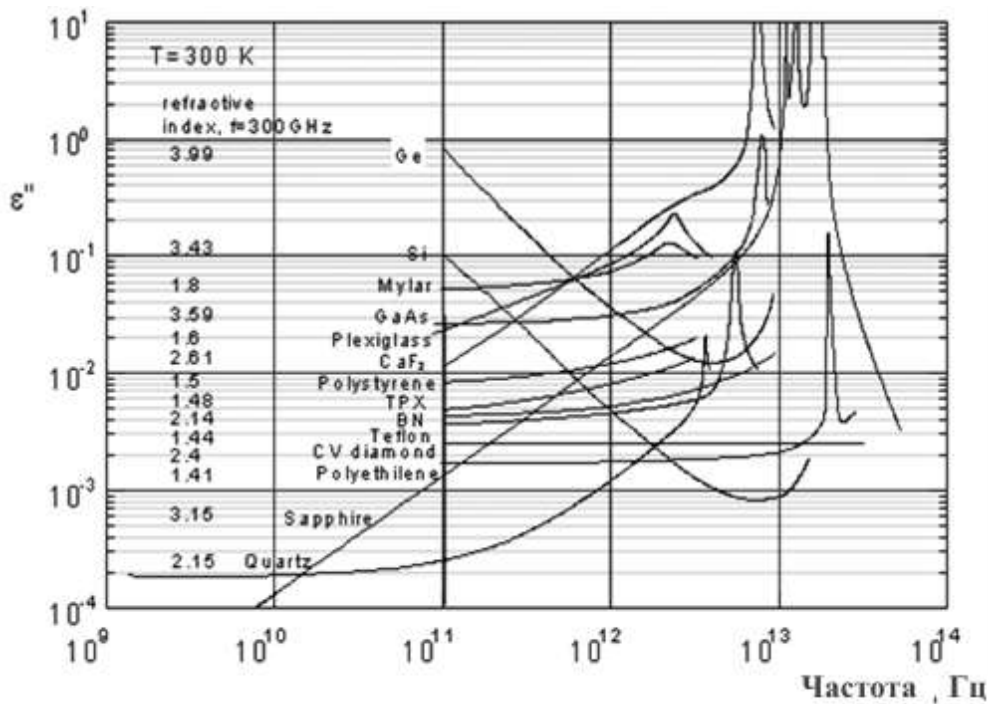


Рисунок 3.15 – Сравнительные данные дисперсии  $\epsilon'$  и поглощения  $\epsilon''$  для ММ - СБММ прозрачных материалов при комнатной температуре - кристаллических диэлектриков, полупроводников, полимеров. На частотах 10<sup>10</sup>-10<sup>13</sup> ГГц  $\epsilon'$  не зависит от частоты. В полупроводниках и полимерах  $\epsilon''$  частично зависит от образца

Общий вывод:

- если не ставить перед собой задачу увеличения разрешения в ТГц канале, можно строить систему ИК и ТГц каналов с общим входным окном и светофильтрами с использованием кремниевых стёкол;
- если задаваться задачами максимального использования возможностей от совмещения ИК и ТГц изображений, необходимо применять принцип разделения потоков: для ИК канала выбирать материал окон и светофильтров из Ge, ZnSe (селенида цинка) или ZnS (сульфида цинка), а для ТГц канала использовать кремниевую керамику с ограничением её чувствительности в ИК диапазоне.

## **4 Тепловизионная техника**

В основу задачи тепловизионной техники положено двумерное преобразование собственного теплового излучения от объектов и местности или фона, в видимое изображение.

Начало бурного развития тепловизоров техники было положено в начале 60-х годов 20-го столетия и можно разделить условно на четыре поколения [21, 22, 23]:

- нулевое поколение основано на применении единичных охлаждаемых приемников и двумерной (строчной и кадровой) развертки с помощью сканирующей оптико-механической системы;
- первое поколение – на применении строчных линеек приемников и упрощенной кадровой развертки;
- второе поколение – на использовании сгруппированных нескольких линеек (с временной задержкой и накоплением) и низкоскоростной системой развертки; ко второму поколению относят вакуумные приборы с электронным сканированием приемной мишени – пироконы;
- третье поколение основано на применении «одновременно смотрящих» – фокально-плоскостных (FPA – Focal Plate Area) и двумерных твердотельных многоэлементных (матричных) приемников излучения (МПИ), то есть без использования оптико-механических систем развертки.

Тепловизоры без механического сканирования («смотрящего» типа), первоначально названные FLIR (Forward Looking Infrared) системами, используют аналогию с органами зрения живых существ – многоэлементные матричные приёмники оптического излучения (focal plane array – FPA) [24].

Сканирующие системы тепловидения используют различные типы сканирования: одноэлементное, параллельное и последовательное.

Сканирование может проводиться как в пространстве предметов (объектов), так и их изображений. Различаются типы сканирования по траекториям сканирования, закону сканирования и ряду других признаков.

Типовые схемы тепловизионных систем 0-го, 1-го и 2-го поколений приведены в приложении А.

### **4.1 Сканирующие и матричные тепловизоры**

На данный момент можно считать, что сканирующие тепловизоры применяются для узкого круга специальных задач, для которых важны уникальные характеристики. А в остальных случаях матричные тепловизоры покрывают весь спектр решаемых практических задач.

На рис. 4.1 представлена обобщенная функциональная схема тепловизора с системой оптико-механического сканирования (ОМС).

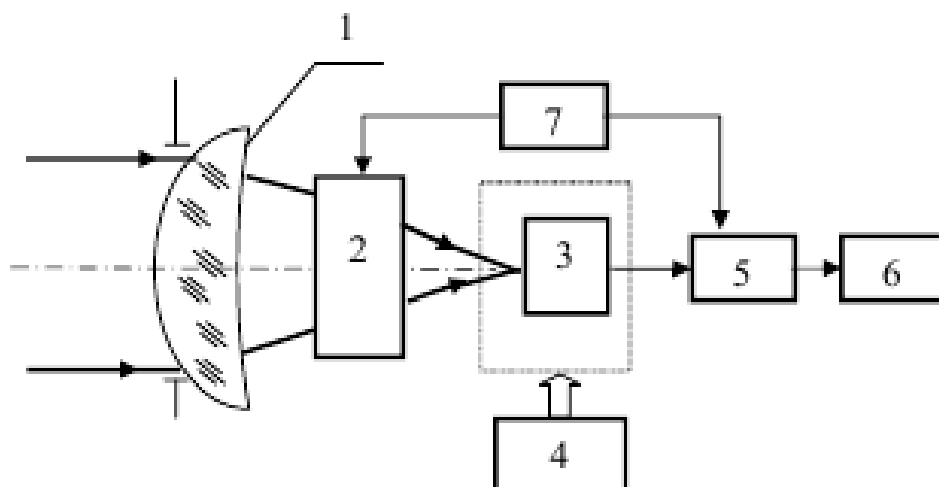


Рисунок 4.1 – Обобщенная функциональная сканирующего тепловизора: 1 – оптическая система; 2 – блок оптико-механического сканирования; 3 – приемник излучения; 4 – система охлаждения; 5 – электронный тракт; 6 – видеоконтрольное устройство; 7 – система синхронизации

Система ОМС, в общем случае, должна обеспечивать обзор пространства предметов - сканирование, как в направлении строк (по горизонту), так и по кадру (в вертикальном направлении).

На рисунке 4.2 представлена типичная функциональная схема тепловизора с фокальной ИК матрицей.

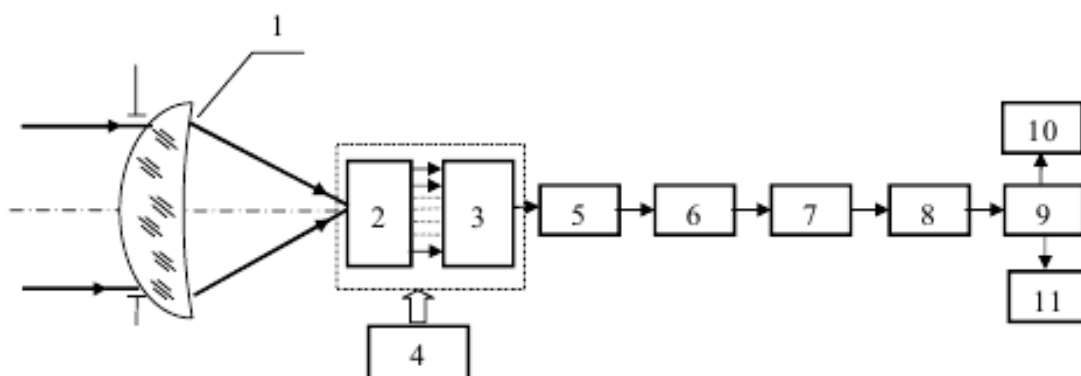


Рисунок 4.2 – Обобщенная функциональная схема тепловизора с фокальной матрицей: 1 – оптическая система; 2 – фокальная матрица с предусилителями; 3 – мультиплексор; 4 – система охлаждения; 5 – корректор неоднородности характеристик чувствительных элементов; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – цифровой корректор неоднородности; 8 – корректор неработающих ячеек; 9 – формирователь изображения; 10 – дисплей; 11 – цифровой выход

Параметры фокальных матриц можно посмотреть в приложении В. Фокальные матрицы изготавливаются как функционально законченные ФПУ, включающие систему охлаждения, предусилители, мультиплексор, корректор неоднородности характеристик 1 чувствительных элементов, аналого-цифровой преобразователь, блоки цифровой обработки и формирователь выходных сигналов. Сигналы с выхода такого ФПУ могут передаваться на ВКУ телевизионного типа либо в цифровом виде в блоки цифровой обработки.

В связи с использованием принципа накопления информационного сигнала матричные ТпВ при прочих равных условиях выигрывают у сканирующих систем по совокупности таких параметров, как надёжность, чувствительность, быстродействие и пространственное разрешение (но не всегда).

#### 4.2 Схемы сканирования и типы тепловизоров

Существует множество схем сканирующих тепловизоров, различающихся методами сканирования, обработки сигналов и представления выходного изображения [51]. Эти различия во многом обусловлены топологией ПИ, используемых в тех или иных приборах. В частности, в тепловизорах с системами ОМС могут использоваться одноэлементные, а также многоэлементные ПИ в виде линеек или матриц (рис. 4.5). Кроме этого, в качестве видеоконтрольного устройства, помимо широко применяемых ТВ-мониторов, используются различного рода устройства с линейками светодиодов и оптико-механическими системами развертки (на данный момент такая схема морально устарела).

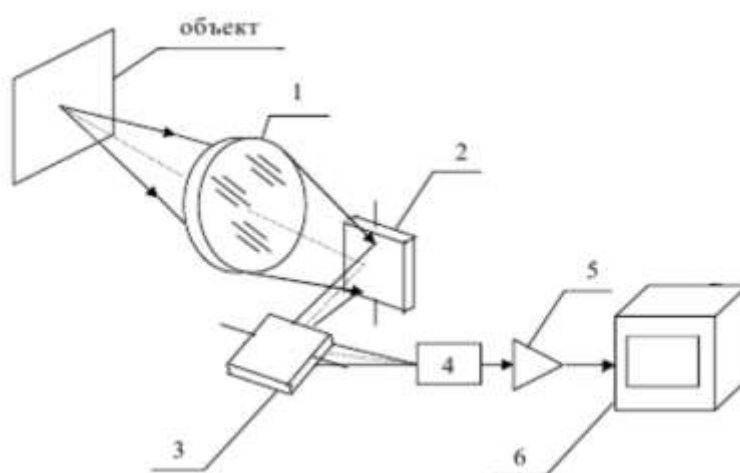


Рисунок 4.3 – Функциональная схема тепловизора со сканированием по строкам и кадру: 1 – объектив; 2 и 3 – сканирующие зеркала; 4 – приемник излучения; 5 электронный тракт; 6 – видеоконтрольное устройство

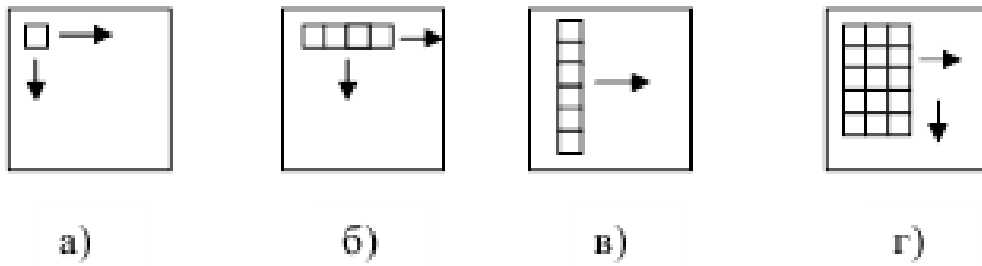


Рисунок 4.4 – Методы сканирования: а) - сканирование одноэлементным ПИ; б) – последовательное сканирование линейкой чувствительных элементов; в) – параллельное сканирование линейкой чувствительных элементов; г) параллельно-последовательное сканирование матричным ПИ

У Дж. Ллойда в книге «Системы тепловидения» [2] приводятся ряд схем сканирующего тепловизора, которые уже не применяются на практике, они представлены ниже. В этих примерах объединены схемы сканирования и развертки изображения, построенные на светодиодах.

В соответствии с наиболее целесообразными сочетаниями типов сканирования, обработки сигналов и развертки тепловизионные приборы с системами ОМС строят на основе следующих 4-х основных принципов:

- параллельное сканирование, параллельная обработка видеосигналов и параллельная развертка (рис. 4.5);

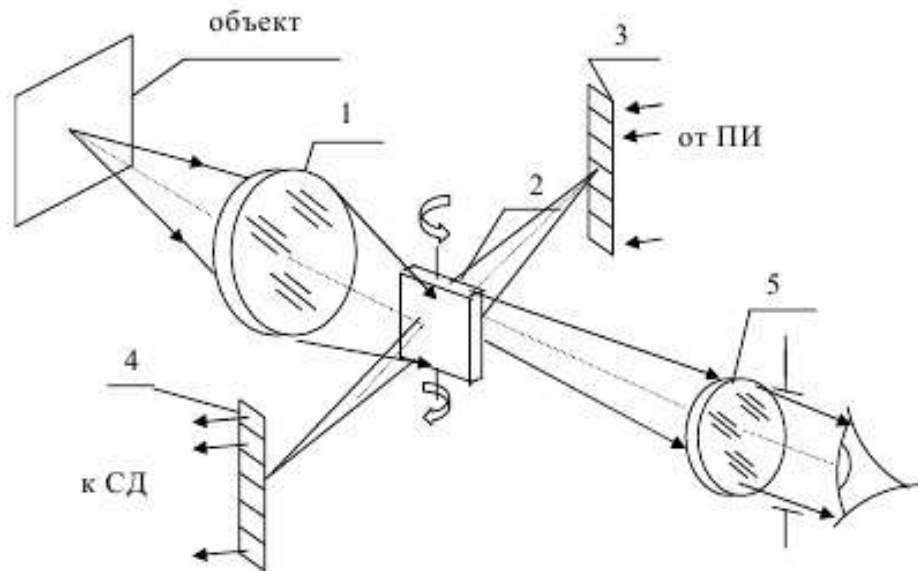


Рисунок 4.5 – Тепловизор с параллельным сканированием и параллельной разверткой изображения: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – линейка светодиодов; 4 – линейка ПИ; 5 – окуляр

- параллельное сканирование, параллельная обработка сигналов с последующим их преобразованием (мультиплексированием) для вывода изображения на ТВ-монитор (рис.4.6);



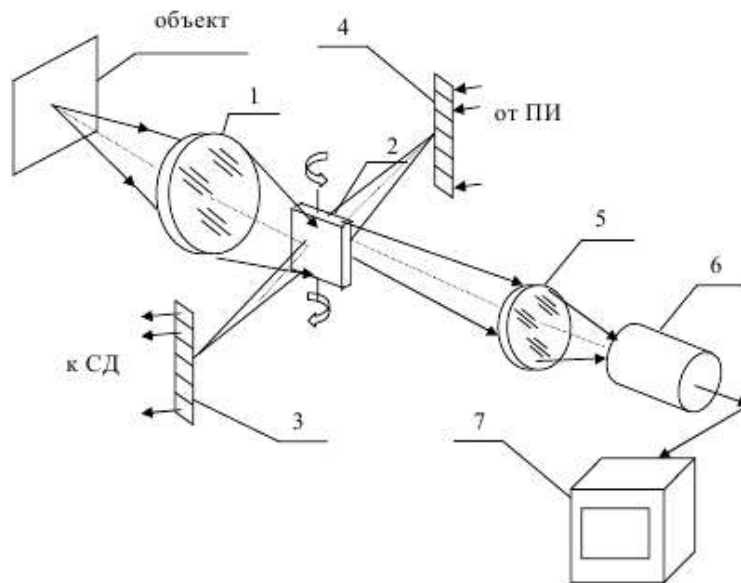


Рисунок 4.6 – Тепловизор с параллельным сканированием и параллельной обработкой сигналов с последующим мультиплексированием для вывода изображения на ТВ монитор: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – линейка ПИ; 4 – линейка светодиодов; 5 – проекционный объектив; 6 – передающая телевизионная трубка (матрица ПЗС); 7 – ТВ монитор

- параллельно-последовательное сканирование и развертка с параллельной обработкой сигналов (рис.4.7);

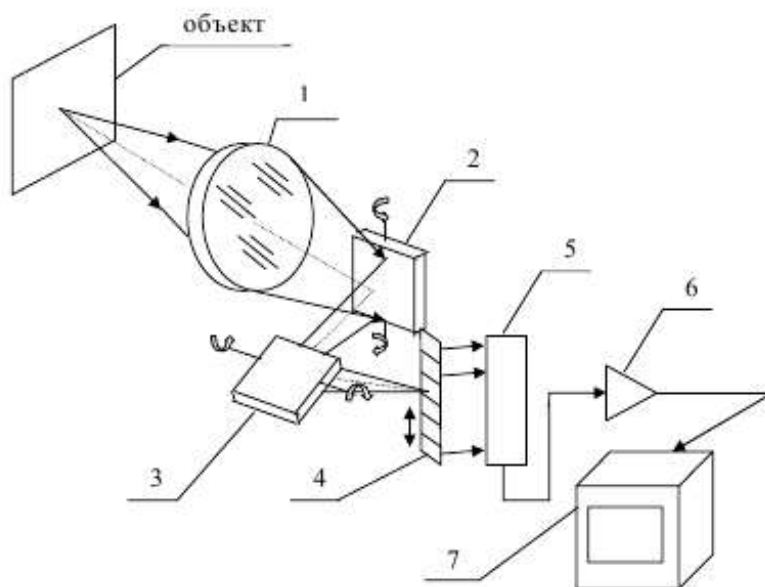


Рисунок 4.7 – Тепловизор с параллельно-последовательным сканированием, параллельной обработкой сигналов и параллельно-последовательной разверткой изображения: 1 – объектив; 2 – сканирующее зеркало; 3 – матрица светодиодов; 4 – матрица ПИ; 5 – окуляр

- последовательная обработка сигналов с преобразованием сигнала для вывода на ТВ-монитор (рис.4.8).

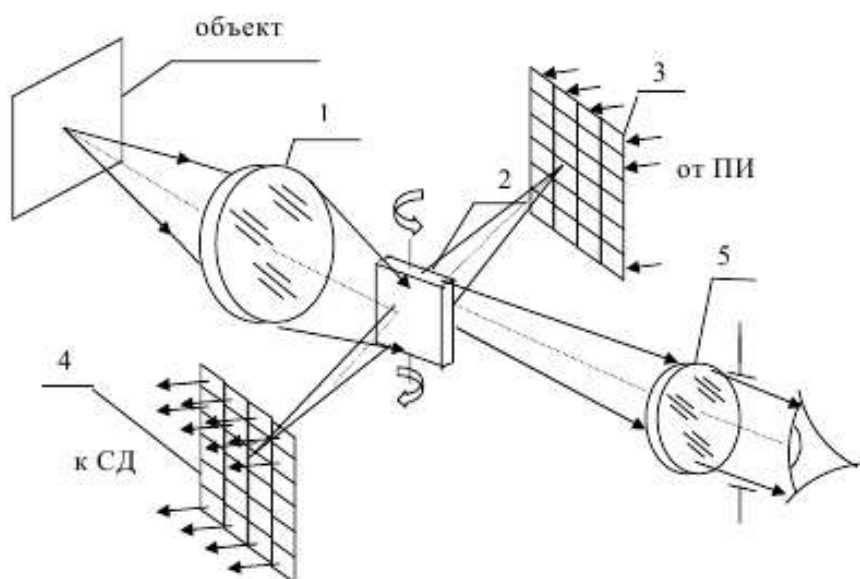


Рисунок 4.8 – Тепловизор с последовательным сканированием линейкой ПИ и преобразованием сигналов для вывода изображения на ТВ монитор:  
1 – объектив; 2 и 3 – сканирующие зеркала; 4 – линейка ПИ; 5 – линии задержки с сумматором; 6 – видеоусилитель; 7 – ТВ монитор

### 4.3 Оптические схемы объективов

В качестве схем для оптических систем тепловизионных приборов используются различные вариации стандартных схем, это различные системы на основе телескопа Ньютона, Максутова и др., рисунки 4.9 – 4.22 [25].

#### 1. Однозеркальная система Ньютона

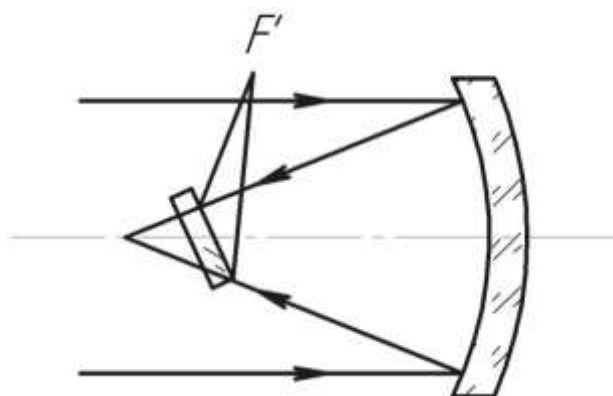


Рисунок 4.9 – Однозеркальная система Ньютона

Данную схему телескопов предложил Исаак Ньютон в 1667. Плоское диагональное зеркало (по сути оно вспомогательное), расположенное вблизи фокуса, отклоняет пучок света за пределы трубы. Главное зеркало параболическое, но если относительное отверстие не слишком большое, оно может быть и сферическим.

На больших наземных телескопах применяется однозеркальная система Ньютона. На БТА диаметр параболического зеркала 6 м, на верхнем конце "трубы" размещается ПИ и наблюдатель (в главном фокусе 25 м).

На самолётах, ракетах и КА применяют многозеркальную ОС и линзовые компенсаторы, и проекционные объективы, так как неудобно располагать ПОИ в прямом фокусе перед зеркалом.

## 2. Двухзеркальная ОС Кассегрена

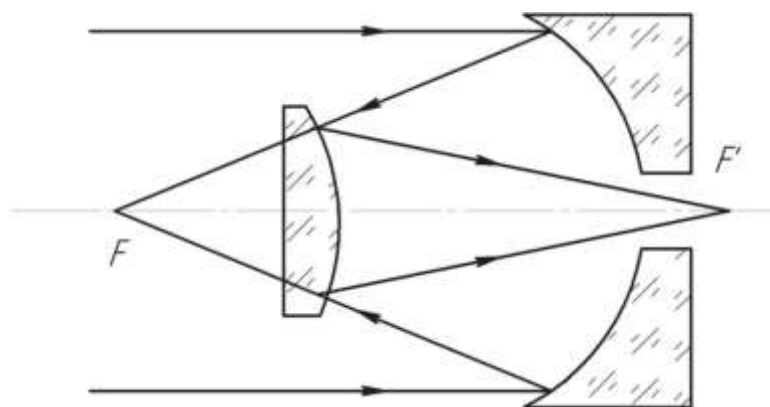


Рисунок 4.10 – Двухзеркальная ОС Кассегрена

Схема была предложена Лореном Кассегреном в 1672 г. Главное зеркало большего диаметра вогнутое (в оригинальном варианте параболическое) отбрасывает лучи на вторичное выпуклое меньшего диаметра (обычно гиперболическое).

По классификации Максудова схема относится к предфокальным удлинителям — то есть вторичное зеркало расположено между главным зеркалом и его фокусом и полное фокусное расстояние объектива больше, чем у главного зеркала.

Эта система широко применяется в телескопах, установлена она и в БТА.

Для того чтобы вынести вторичный фокус  $F'$  за пределы первичного (главного) зеркала, вторичное зеркало приходится приближать к главному и увеличивать его диаметр. Получаем довольно большое "слепое" пятно в центре главного зеркала, которое собирает поток. Наличие гиперболического зеркала вместо сферы устраняют сферические aberrации, но остаются хроматические [25].

Для их устранения в отверстие в слепом пятне главного зеркала устанавливается проекционный объектив (обычно четырехлинзовый ахромат), а вторичное зеркало уменьшают в диаметре и отодвигают ближе к первичному фокусу  $F$ .

### 3. ОС Кассегрена с проекционным объективом

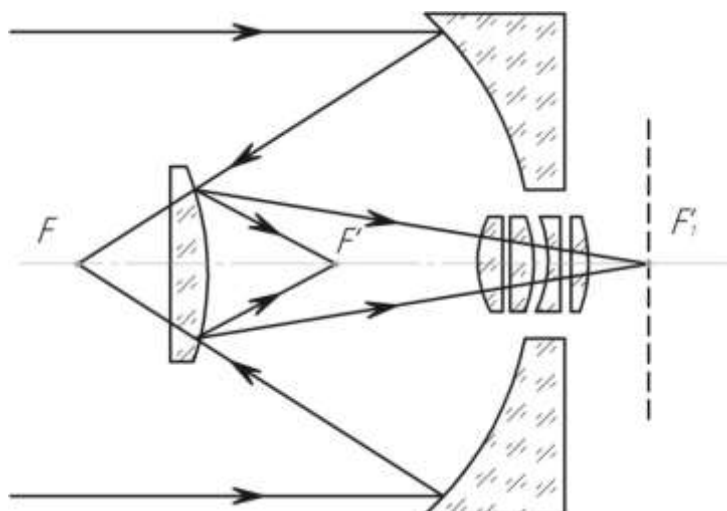


Рисунок 4.11 – ОС Кассегрена с проекционным объективом - компенсатором хроматических aberrаций

Такая ОС вторичный фокус переносит (проецирует) в плоскость ПОИ. Линзы объектива обычно делают из германия с просветлением. Зеркала покрывают полированным алюминием.

### 4. ОС телескоп Шмидта

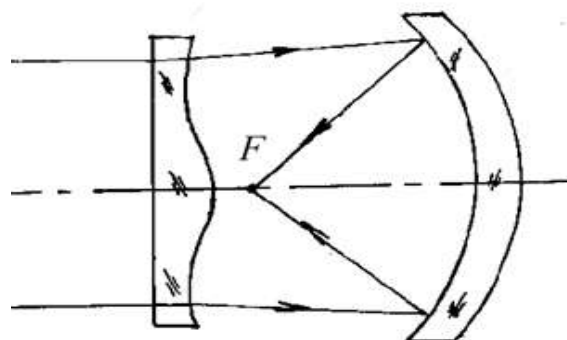


Рисунок 4.12 – ОС телескоп Шмидта

Среди космических телескопов большого диаметра в США наилучшие показатели имеет телескоп Шмидта. На КА на геостационарных орбитах летают ПИ с телескопами Шмидта с  $D = 1,0$  м,  $F = 1,5$  м и углом

поля зрения 16-17°, в котором обеспечивается качество на дифракционном пределе.

Недостатком системы Шмидта является неплоская фокальная поверхность. Она выпуклая с диаметром, равным фокусу. Недостатком такого очень сложен в изготовлении.

#### 5. Телескоп с зеркалом Манжена

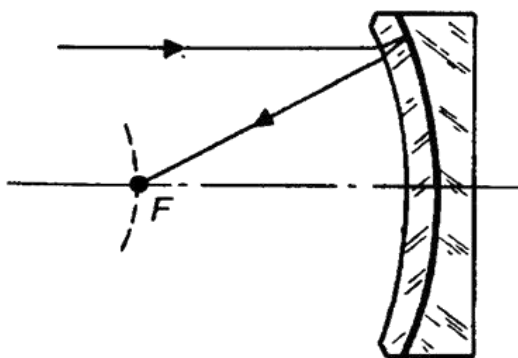


Рисунок 4.13 – Телескоп с зеркалом Манжена

Данную схему телескопов предложил Исаак Ньютон в 1667. Здесь плоское диагональное зеркало, расположенное вблизи фокуса, отклоняет пучок света за пределы трубы, где изображение проецируется на ПОИ. Главное зеркало параболическое, но, если относительное отверстие не слишком большое, оно может быть и сферическим [25].

#### 6. Телескоп Кассегрена с корригирующим элементом Бауэrsa

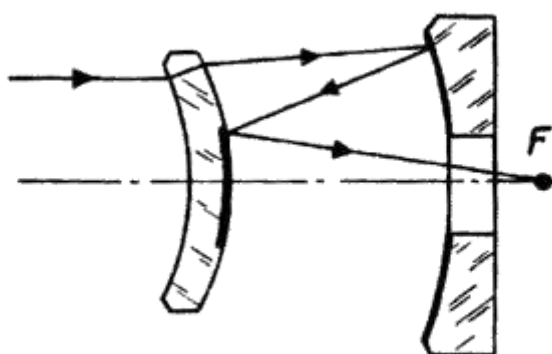


Рисунок 4.14 – Телескоп Кассегрена с корригирующим элементом Бауэrsa

Данную схему телескопов предложил Исаак Ньютон в 1667. Здесь плоское диагональное зеркало, расположенное вблизи фокуса, отклоняет пучок света за пределы трубы, где изображение рассматривается через окуляр или фотографируется. Главное зеркало параболическое, но если

относительное отверстие не слишком большое, оно может быть и сферическим.

#### 7. Менисковый объектив Д. Д. Максутова ( $f=260$ мм).

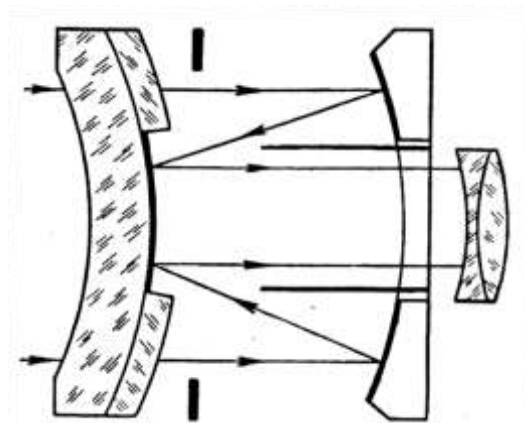


Рисунок 4.15 – Менисковый объектив Д. Д. Максутова

В некоторых конструкциях зеркально-линзовых объективов на линзу, служащую для защиты вогнутого зеркала от запыления, запотевания и механических повреждений, возлагают также исправление сферической аберрации, комы и астигматизма. Кроме того, на эту линзу наклеивается вторая — отрицательная, отражающая поверхность. Такие объективы получили название менисковых. Могут также устанавливаться одновременно две линзы — у входа в объектив и после выхода пучка из слепого отверстия (вблизи фокуса) [25].

#### 8. Объектив Максутова-Бауэрс-Шмидта

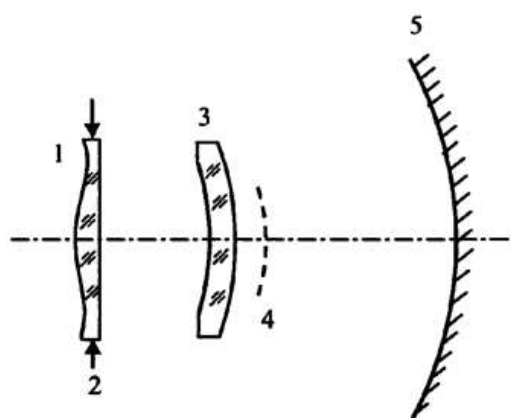


Рисунок 4.16 – Скорректированный концентрический объектив Максутова-Бауэрс-Шмидта: 1 - асферический корректор, 2 - диафрагма, 3 - менисковый корректор, 4 – фокальная поверхность, 5 – зеркало.

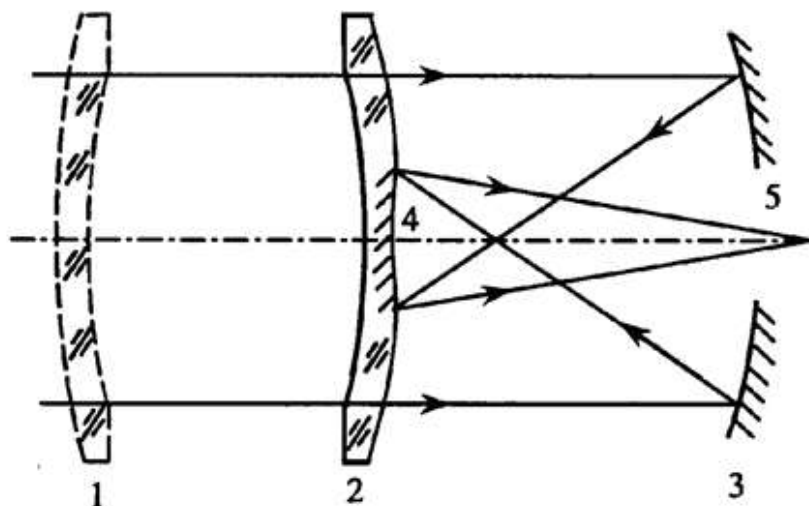


Рисунок 4.17 – Система Максудова-Бауэрс (1 - передний корректор, 2 - задний корректор, 3 - зеркало, 4 - контррефлектор, 5 - фокальная точка)

### 9. Оптическая система по системе Максудова

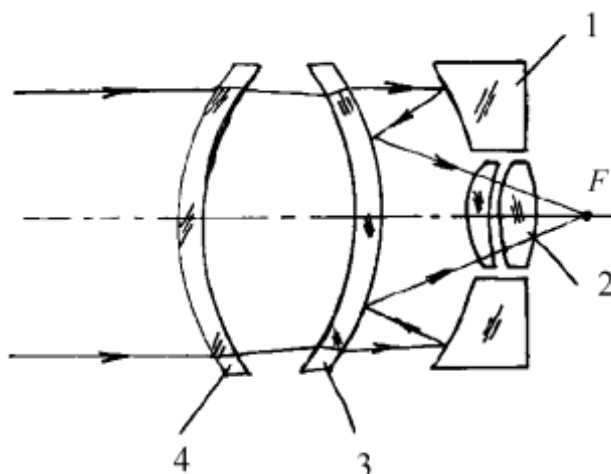


Рисунок 4.18 – ОС по системе Максудова: 4- мениск является элементом обтекателя и герметизации головки ракеты; 1 - главное зеркало; 2 - компенсатор; 3 - полусотражающий мениск

Для тепловых головок самонаведения часто используют простые германиевые линзовые объективы. Но наилучшие показатели имеют ОС по системе Максудова. Телескоп системы Максудова очень компактный и небольшого диаметра [25].

При установке на тепловую головку самонаведения или головку навигации крылатой ракеты мениск 4 является элементом обтекателя и герметизации головки ракеты; 1 - главное зеркало; 2 - компенсатор; 3 - полусотражающий мениск.

10. Теплопеленгационная система оптики тепловой головки самонаведения «Кребс» (Германия).

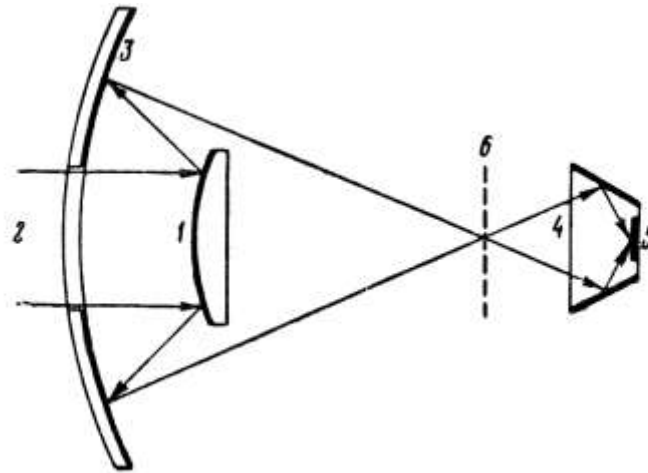


Рисунок 4.19 – Теплопеленгационная система оптики тепловой головки самонаведения «Кребс»

В качестве примера применения стеклянных отражателей в теплопеленгационных системах приведена схема оптики тепловой головки самонаведения «Кребс» (Германия), предназначенной для наведения катеров-брандеров на корабли противника.

Оптическая система состоит из выпуклого зеркала 1 диаметром 35 мм, на которое попадает излучение от цели 2 через слепое отверстие вогнутого зеркала 3 диаметром 250 мм и с фокусным расстоянием 55 мм. Отраженный от зеркал излучение попадает в зеркальный конденсор («световую ловушку») 4 и оттуда на приемник 5. В фокальной плоскости зеркала 3 располагается растровый диск 6, позволяющий определить направление на цель — «вправо — влево». Поле зрения оптической системы  $45^\circ$ , однако на его краях чувствительность резко падает, что позволяет практически использовать только центральную часть поля, т.е.  $20^\circ$ .

11. Схемы зеркально-линзовых объективов для тепловых головок самонаведения

Эти схемы включают в себя первичное вогнутое зеркало 1, вторичное зеркало с внешним или внутренним отражающим слоем 2, обтекатель 3 и коррегирующие линзы 4. Обтекатель в этих схемах играет активную роль, снижая сферическую аберрацию оптической системы.

Лучшая из этих схем (г) не имеет сферической и хроматической аберраций. Такое качество получаемых изображений делает схему перспективной для тепловых головок самонаведения и тепло-пеленгационных приборов с большим полем зрения.



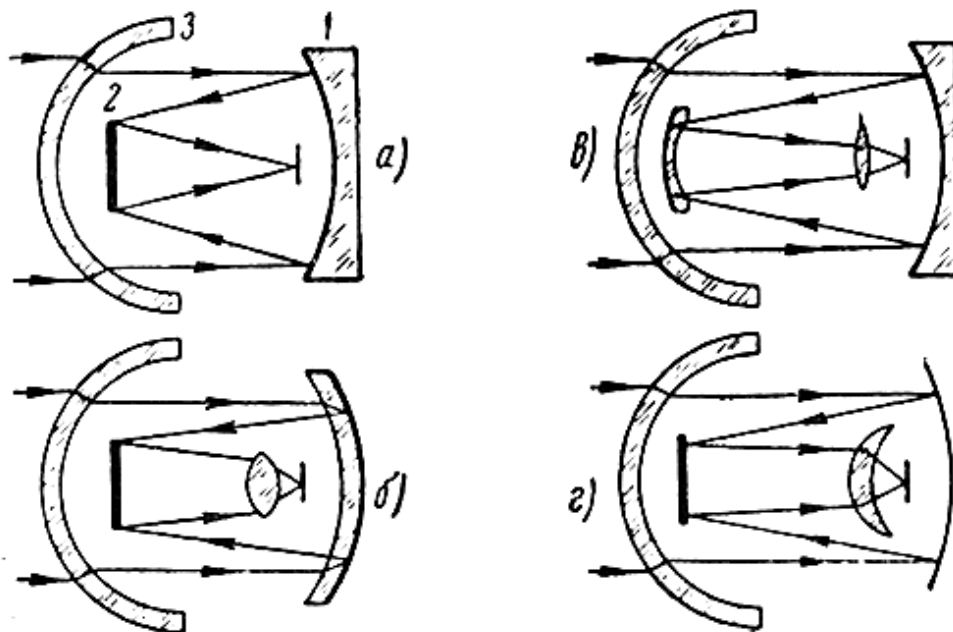


Рисунок 4.20 – Схема зеркально-линзовых объективов для тепловых головок самонаведения

Для систем с малым полем зрения очень удобной является схема, в которой обтекатель выполнен из плавленого кварца, а вторичное зеркало-линза и корригирующая линзы из трехсернистого мышьяка. Такая схема позволяет получить кружок рассеяния около 1 мрад для падающих пучков под углом  $2^\circ$ .

Однако в этой схеме хроматическая аберрация увеличивает изображение кружка рассеяния по всему полю зрения на 0,5 мрад.

Пример реализации оптической системы тепловой головки самонаведения Р Р-3С приведен на рисунке 4.21.

Остальные элементы оптической системы (за исключением фотосопротивления) жестко связаны с ротором гироскопа и вращаются вместе с ним. Фотосопротивление 7 закреплено во внутреннем кольце гироскопа и отклоняется вместе с кольцом на углы слежения головки для того, чтобы поверхность фотосопротивления оставалась перпендикулярной оптической оси. Сферическое зеркало 8 выполнено из оптического стекла и имеет наружное алюминирование. Линза-держатель 4, являясь элементом оптической системы, одновременно служит для крепления плоского зеркала 2 и бленды 3 на роторе гироскопа. Бленда 3 закрывает линзу 4 от попадания на нее прямых лучей (помимо лучей, идущих от зеркала 2), предохраняя фотосопротивление от прямой засветки. Диафрагма 5 уменьшает блики и улучшает качество изображения в плоскости модулирующего диска.

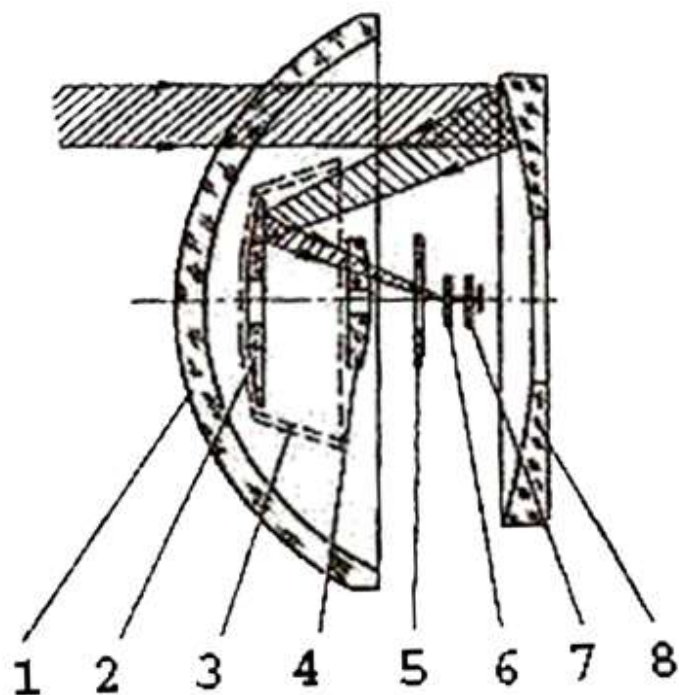


Рисунок 4.21 – Тепловая головка самонаведения Р Р-3С. Обтекатель -1, фотосопротивление - 7 закреплено во внутреннем кольце гироскопа, сферическое зеркало – 8, линза-держатель – 4, плоского зеркала - 2 и бленды - 3 на роторе гироскопа, диафрагма - 5

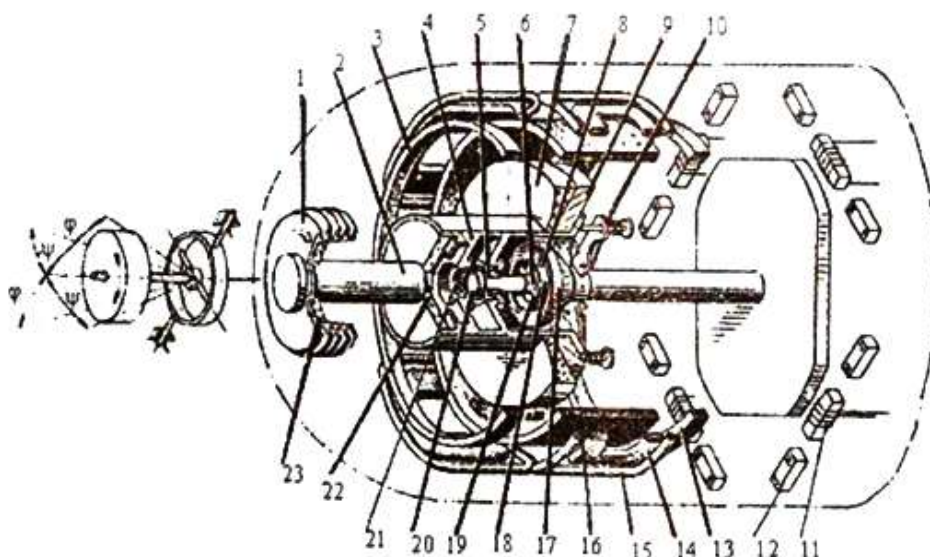


Рисунок 4.22 – Тепловая головка самонаведения УР Р-3С

Схема гироскопа (рис. 4.22) и расположения обмоток на нём: 1 - бленда; 2 - ось; 3 - катушка электрического арретира, 4 - стакан; 5 - шарикоподшипник; 6 - внутреннее кольцо карданного подвеса; 7 - сферическое зеркало; 8 - ось карданного подвеса; 9 - постоянный магнит; 10 - кулачок механического арретира; 11 - катушки с подмагничиванием; 12 - постоянные магнетики; 13 - катушка электрического арретира; 14-

катушка вращения ротора гироскопа; 15 - катушка генератора опорных напряжений; 16 - коррекционная катушка; 17 - обойма; 18 - внешнее кольцо карданного подвеса; 18 - ось карданного подвеса; 20 - фотосопротивление с германиевым фильтром. 21 - модулирующий диск; 22 - линза держатель; 23 - плоское зеркало

Модулирующий диск предназначен для модуляции теплового излучения цели, приходящего на фотосопротивление. Благодаря модулирующему диску сигнал рассогласования, вырабатываемый головкой самонаведения, несет в себе информацию об угловых координатах цели: угле рассогласования и угле фазирования.

В качестве приемника теплового излучения цели, преобразующего это излучение в электрические сигналы, в головке используется сернисто-свинцовистое фотосопротивление. Оно обладает максимальной чувствительностью к тепловому потоку с длиной волны 2,4 – 2,5 мк. Перед фотосопротивлением расположен германиевый оптический фильтр, задерживающий все лучи с длиной волны до 1,8 мк.

Таблица 4.1 – УР Р-3С Тактико-технические характеристики

Максимальная дальность захвата цели (типа ИЛ-28) на высоте более 15 км при ракурсе 0/4, м	7600
Пороговая чувствительность	не более 0.03мкВт/см <sup>2</sup>
Поле слежения, в котором осуществляется сопровождение выбранной цели (конус с углом при вершине)	50°
Полный угол поворота оси ТГСН	±28°
Поле захвата головки (конус с углом при вершине)	3°30'
Число оборотов ротора гироскопа, об/с при включении питания через 21с с момента включения питания	72±5 не менее 50
Время непрерывной работы ТГСН, мин при питании от внешних источников при питании от бортового генератора	120 около 6
Фокусное расстояние оптической системы, мм	84.3
Масса, кг	5.2
Габаритные размеры, мм	
диаметр	127
длина	320

## 4.4 Практические схемы сканирующих тепловизоров

### 4.4.1 Тепловизоры фирмы «АГЕМА», модели 661 и 680

Данные модели тепловизоров предназначены для получения изображения слабо нагретых объектов и имеют следующие характеристики [2]:

- поле обзора –  $5 \times 5^\circ$  или для модели 661 или  $10 \times 10^\circ$  для модели 680;
- оптическое разрешение – 100 элементов в строке;
- частота кадров – 16 Гц;
- температурная разрешающая способность  $0,2^\circ\text{C}$  ( $\Delta T_{\text{пор}} = 0,2^\circ\text{C}$  на уровне  $20^\circ\text{C}$ );
- динамический диапазон изменяется от  $T = 1^\circ\text{C}$  до  $200^\circ\text{C}$ ;
- диапазон регистрируемых температур объектов от  $-30^\circ\text{C}$  до  $+20^\circ\text{C}$ .

Тепловизоры «АГЕМА» были разработаны по заданию военного ведомства, но нашли применение в медицине и промышленности для проверки теплового режима электросетей, оборудования и т. д.

Структурная схема тепловизора «АГЕМА 661» приведена на рисунке 4.23.

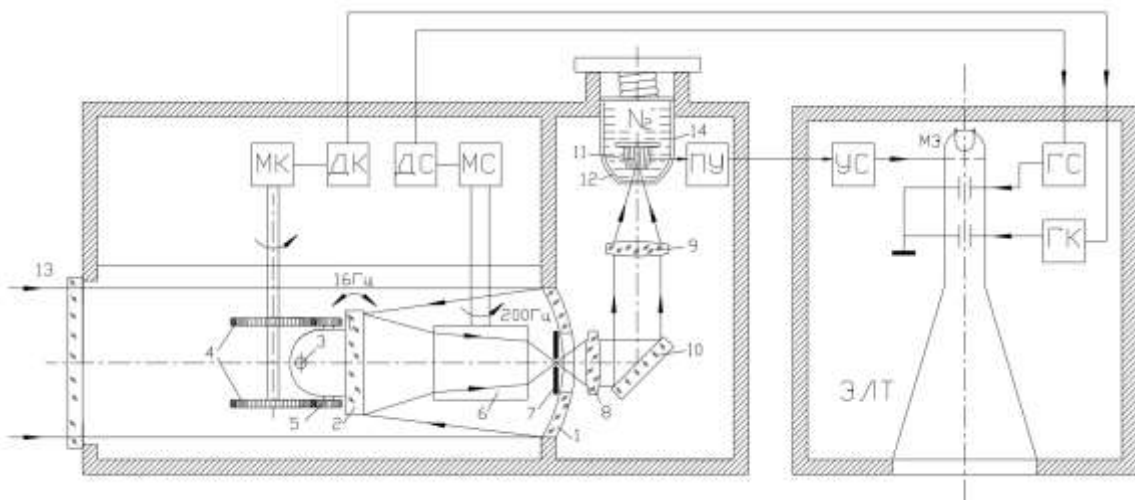


Рисунок 4.23 – Структурная схема тепловизора фирмы «АГЕМА», модель 661: 1 – большое сферическое зеркало –  $\varnothing 195$  мм;  $f = 350$  мм; 2 – малое плоское зеркало  $\varnothing 71,4$  мм; 3 – горизонтальная ось колебания зеркала 2; 4 – соосные кулачки; 5 – круглые роликовые подшипники; 6 – многогранная (4-х гр.) призма сканирования (по строкам); 7 – диафрагма; 8, 9 – линзы; 10 – плоское зеркало; 11 – приёмник излучения (InSb),  $R \approx 50$  кОм; 12 – охлаждаемая диафрагма; 13 – защитное окно; 14 – сосуд Дьюара; МК – мотор кадровой развертки; МС – мотор строчной развертки; ПУ – предусилитель; УС – усилитель; МЭ – модулирующий электрод ЭЛТ; ГС – генератор строчной развертки; ГК – генератор кадровой развертки; ДС – ДК – датчики сигналов синхронизации строк и кадров

Данная схема работает следующим образом. Оптическое излучение объекта попадает через защитное стекло 13 в объектив, состоящий из сферического зеркала 1 и плоского зеркала 2. Плоское зеркало 2 колеблется относительно горизонтальной оси 3 (перпендикулярной плоскости чертежа) с частотой 16 Гц, обеспечивая обзор пространства со скоростью 16 кадров в секунду, при времени обратного хода, составляющего 12%. Колебательное (пилообразное) перемещение зеркала осуществляется при помощи двух противоположно действующих соосных кулачков 4, воздействующих на круглые роликовые подшипники 5, смонтированные на верхнем и нижнем концах колеблющегося плоского зеркала. Кулачки вращаются мотором кадровой развертки МК. Угол поворота плоского зеркала равен  $5^\circ$ .

Сканирование в плоскости, перпендикулярной направлению сканирования зеркала (т.е. по строкам), осуществляется вращением четырехгранной призмы 6. Обычно используется германиевая или кремниевая призма, вращающаяся со скоростью 200 об/с мотором строчной развертки МС. За каждый оборот призмы сканируется 4 строки, что обеспечивает скорость обзора 1600 строк в секунду.

Поэтому, так как в кадре 100 строк, скорость обзора равна 16 кадров в секунду.

Рабочие поверхности призмы просветляются окисью кремния для обеспечения максимального пропускания в области спектра от 2 до 5,4 мкм.

Изображение элемента обзора формируется оптической системой в плоскости диафрагмы 7, передается линзами 8 и 9 и плоским зеркалом 10 на приемник 11, закрытый охлаждаемой диафрагмой 12, имеющей отверстие диаметром 0,5 мм.

Сосуд Дьюара 14 заливается жидким азотом до уровня, находящегося на расстоянии 5 мм от верхней кромки.

Сигнал, вырабатываемый приемником излучения, усиливается предусилителем ПУ и усилителем УС и воздействует на модулирующий электрод МЭ электронно-лучевой трубки ЭЛТ индикатора.

Развертка луча индикатора по строкам и кадрам осуществляется генераторами строчной ГС и кадровой разверток, которые синхронизируются датчиками сигналов синхронизации строк ДС и кадров ДК. Последние формируют сигналы синхронизации с помощью фотодиодов, освещаемых светом, прерываемые модулирующими дисками синхронно с вращением призмы и колебанием плоского зеркала.

#### **4.4.2 Функциональная схема тепловизора «Рубин»**

Схема тепловизора «Рубин» приведена на рисунке 4.24 [26].

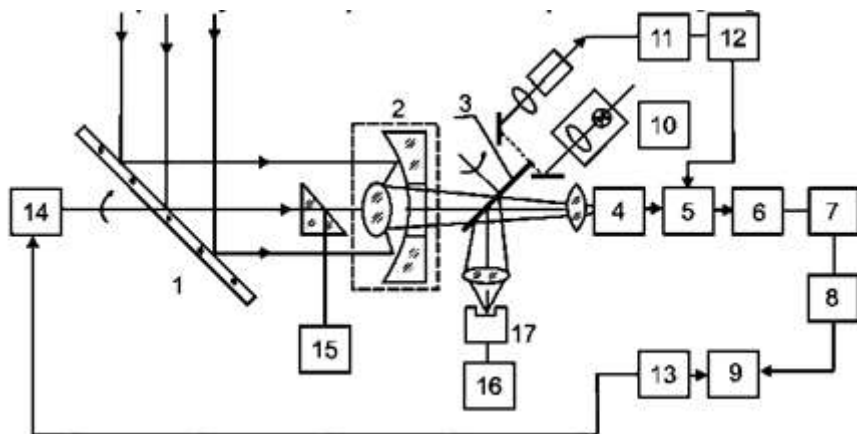


Рисунок 4.24 – Функциональная схема тепловизора «Рубин»:  
 1 - сканирующее зеркало; 2 - зеркальный объектив; 3 - модулятор; 4 - приемник излучения; 5 - предусилитель; 6 - усилитель; 7 – синхронный детектор; 8 - усилитель мощности; 9 - механизм записи; 10 - световой датчик; 11 - фотодиод; 12 - усилитель опорного сигнала; 13 - блок управления сканированием; 14 - механизм сканирования; 15 - визир; 16 - блок управления

Объектив состоит из эллиптического и сферического зеркал. В оптическую схему встроен модулятор 3, который перекрывает поток излучения, и в эти моменты на приемник попадает излучение от эталонного излучателя 17 ( $f_m = 1360$  Гц). Модулятор 3 используется для получения опорного сигнала предварительного усилителя 5. На выходе приемника излучения 4 возникает напряжение, пропорциональное разности потоков от объекта и эталонного излучателя. На вход предусилителя 5 поступает 2 сигнала: 1 - от приемника, 2 - компенсирующий, от усилителя опорного сигнала 12. Регулируя опорный сигнал, добиваются, чтобы результирующий сигнал был равен нулю. После предварительного усиления сигнал проходит обработку в блоке управления (6-8) и поступает в блок регистрации 9, где записывается на электрохимическую бумагу типа ЭХБ-4 или ЭХБ-6. Разрешающая способность записи - 3-4 эл/мм при размере изображения 90 x 45 мм и 150 строк в кадре.

Технические параметры и характеристики:

поле зрения	$10^\circ \times 20^\circ$ ;
частота кадров	$f_k - 0,016$ Гц;
период кадров	$T_k - 1$ мин;
число строк	$N_c - 200$ ;
число элементов в строке	$N_{эс} - 200$ ;
эквивалентное фокусное расстояние	$F_{экр} - 115$ мм;
диаметр входного зрачка	$D_{вх} - 100$ мм;
температурная чувствительность	$\Delta T_{пор} - 0,1^\circ\text{C}$ .

Тепловизор предназначен для регистрации стационарных и медленно меняющихся тепловых полей различных медицинских и промышленных объектов.

#### **4.5 Приёмники инфракрасного излучения**

Описанию типов приёмников и их характеристик посвящено значительное число работ и справочной литературы [2, 27], сложилась общепринятая физически корректная система описания свойств и характеристик чувствительных элементов приёмников. При выборе и обосновании материала приёмников излучения и выборе матриц приёмников излучения для построения тепловизоров в расчётах используются известные из литературных источников [28] данные.

Приёмники излучения оптического излучения можно разделить на два вида: биологические и физические. Среди биологических ПОИ следует выделить человеческий глаз, который регистрирует видимый свет в диапазоне длин волн от 0,38 до 0,78 мкм и диапазоне яркостей, перекрывающем 11 порядков. После адаптации к темноте глаз воспринимает тепловое излучение объектов, начиная с температуры 450°С. Таким образом, при соответствующих условиях, человек может видеть перегретые электрические контакты, горячий металл и другие объекты с температурой выше упомянутого порога.

Физические ПОИ генерируют сигнал, пропорциональный мощности оптического излучения, поглощенного их чувствительными площадками. Структура ПОИ работающих в ИК – диапазоне излучения включают:

- чувствительный элемент (элементы);
- входное окно, отделяющее внешнюю среду от замкнутого объема вокруг чувствительного элемента;
- апертуру, ограничивающую поле зрения (возможно ее охлаждение и/или термостабилизация);
- сосуд Дьюара с хладоагентом (возможна система охлаждения на базе термоэлектрических холодильников или микрохолодильника Стирлинга; некоторые детекторы работают при комнатной температуре).

ПОИ разделяют на два основных класса: тепловые и фотонные (фотоэлектрические).

Дерево классификации можно представить, как на рисунке 4.25.



Рисунок 4.25 – Классификация инфракрасных приёмников



Принцип действия тепловых детекторов основан на одном из четырех явлений:

1) болометрическом эффекте (изменение электрического сопротивления чувствительного элемента при нагреве поглощенным ИК излучением);

2) термовольтаическом эффекте (выходное напряжение генерируется нагретым спаем разнородных металлов);

3) термопневматическом эффекте (изменение температуры детектора вызывает расширение газового объема);

4) пироэлектрическом эффекте (изменение температуры вызывает модуляцию дипольного момента кристаллического чувствительного элемента).

В фотонных детекторах поглощенные кванты излучения (фотоны) увеличивают число свободных носителей электрического заряда, изменяя электрическое состояние чувствительного элемента. При использовании эффекта фотопроводимости поглощенное ИК излучение изменяет электропроводность чувствительного элемента. В рамках фотогальванического эффекта поглощенное излучение создает электронно-дырочные пары вблизи *p-n* перехода, генерируя электрический ток. В меньшей степени в детекторах ИК излучения используют фотоэлектромагнитный эффект.

#### **4.5.1 Тепловые приёмники**

Принцип действия болометра основан на изменении электрического сопротивления полупроводника или металла при нагреве чувствительного элемента поглощенным тепловым излучением. Исторически болометры были одними из первых видов ИК детекторов, однако их применение в тепловизорах в течение длительного времени сдерживалось значительной инерционностью. В конце XX-го века появились малоинерционные микроболометрические (ферроэлектрические) матрицы, на основе которых были созданы неохлаждаемые матричные тепловизоры, получившие в настоящее время большое распространение.

Пироэлектрические ПИ производят из материалов, называемых сегнетоэлектриками, например, из титаната бария. Эти материалы обладают постоянной электрической поляризацией, являющейся сильной функцией температуры. В течение длительного времени разрабатывали недорогие ИК тепловизоры на базе пироэлектрических видиконов (пировидиконов), однако в настоящее время они практически полностью вытеснены тепловизорами с матричными детекторами.

Существует сфера применения пироэлектрических матриц, где они имеют явное преимущество над болометрическими – это круглосуточные системы наблюдения, при работе которых имеется вероятность прямого

солнечного воздействия на чувствительную область матрицы. Вероятность выхода из строя в этом случае пирозлектрической матрицы значительно ниже чем болометрической [44].

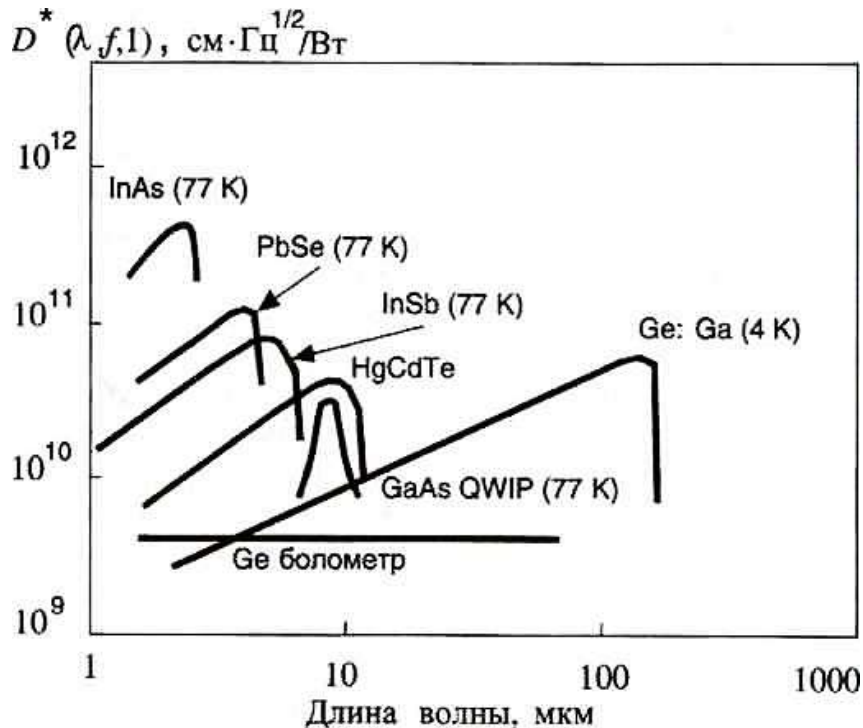


Рисунок 4.26 – Спектральные зависимости  $D^*$  для распространенных детекторов оптического излучения

ИК термометры (пирометры) часто используют тепловые приемники на основе термоэлементов, работающих на принципе термоэфекта Зеебека. В качестве материалов для металлических термоэлементов используют сурьмяно-висмутовые спаи, серебро, железо, теллур, константан, хромель и различные сплавы этих веществ. В полупроводниковых термоэлементах применяют сурьму, кремний, теллур, селен.

Тепловые детекторы характеризуются плоским характером спектрального хода обнаружительной способности  $D^*$ , т.е. являются неселективными, и не требуют охлаждения, но сама величина  $D^*$  при этом значительно меньше, чем у фотонных приемников (рис. 4.26).

#### 4.5.2 Фотоэмиссионные приёмники оптического излучения

В этих ПОИ поток фотоэлектронов, создающий электрический ток в первичной цепи, образуется за счет внешнего фотоэфекта, который имеет место на фотокатоде. К фотоэмиссионным фотоприемникам относят вакуумные и газонаполненные фотоэлементы (ГФЭ), а также фотоэлектронные умножители (ФЭУ). В ФЭУ электроны ускоряются в электрическом поле и умножаются за счет вторичной эмиссии на динодах. Коэффициент умножения в десятиступенчатой системе может составлять от

$10^5$  до  $10^7$ . Типичная постоянная времени составляет около 10 нс. Фотоумножители обычно используют для регистрации слабых световых потоков в микроваттном диапазоне мощностей, поскольку большие мощности регистрируемого излучения могут повредить последние диоды.

В тепловизионных системах фотоэмиссионные ПОИ не используются.

Так, для выбора материала приёмников при разработке трёхспектральных приёмников излучения с возможностью решения задачи спектральной селекции ориентироваться можно на публикации [29, 30] (таблица 4.2, рис. 4.27).

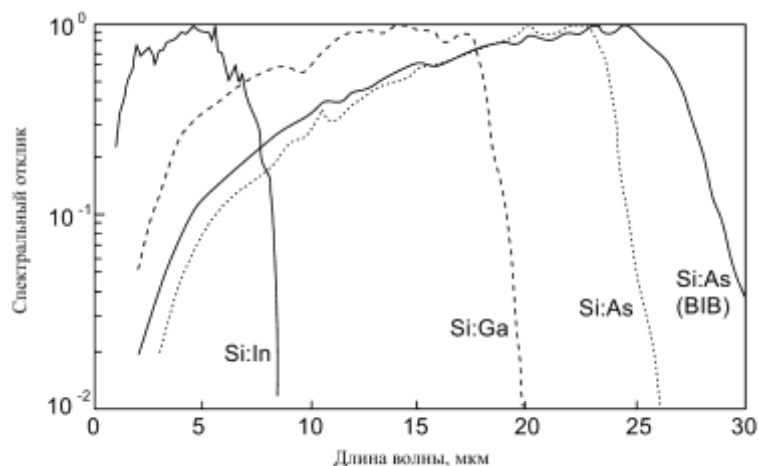


Рисунок 4.27 – Примеры спектральных характеристик ИК детекторов с внешним фотоэффектом. Показаны Si:In, Si:Ga и Si:As и Si:As (с ВІВ – структурой) [27, 30]

Таблица 4.2 – Основные ИК материалы

ПОИ	(DE) <sub>opt</sub> (meV)	$\lambda_p$ ( $\mu\text{m}$ )	$\lambda_c(T)$ ( $\mu\text{m}$ )(K)	$\eta(\lambda_p)$ (%)	$\Phi_B$ ( $\text{ph cm}^{-2}\text{as}^{-1}$ )	NEP ( $\text{WHz}^{-1/2}$ )	$\lambda(\mu\text{m}); T(\text{K}); f(\text{Hz})$
Si:As	53,76	23	24-24,5 (5)	50(T) 20(L)	$9 \times 10^6$ $6,4 \times 10^7$	$0,88 \times 10^{-17}$ $4,0 \times 10^{-17}$	(19;6;1,6) (23;5;5)
Si:P	45,59	24/26,5	28,29 (5)	~30(T)	$2,5 \times 10^8$	$7,5 \times 10^{-17}$	(28;4,2;10)
Si:Sb	42,74	28,8	31 (5)	58(T) 13(L)	$1,2 \times 10^8$ $1,2 \times 10^8$	$5,6 \times 10^{-17}$ $5,5 \times 10^{-17}$	(28,8;5;5) (28,8;5;5)
Si:Ga	74,05	15,0	18,4 (5)	47(T)	$6,6 \times 10$	$1,4 \times 10^{-17}$	(15;5;5)
Si:Bi	70,98	17,5	18,5 (27)	34(L)	$< 1,7 \times 10^8$	$3 \times 10^{-17}$	113;11;-)
Ge:Li	9,98		125 (calc)		$8 \times 10^8$	$1,2 \times 10^{-17}$	(120;2;13)
Gc:Cu	43,21	23	29,5 (4,2)	50	$5 \times 10^{10}$	$1,0 \times 10^{-17}$	(12;4,2;1)
Gc:Be <sup>b</sup>	24,81	39	50,5 (4,2)	100 <sup>b</sup>	$1,9 \times 10^{10}$	$1,8 \times 10^{-17}$	(43;3,8;20)
Ge:Ga	11,32	94	114(3)	34	$6,1 \times 10^9$	$5,0 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Gc:Ga <sup>b</sup>	11,32	94	114(3)	- 10 <sup>b</sup>	$5,1 \times 10^9$	$2,4 \times 10^{-17}$	(94;3;150)
Ge:Ga <sup>b</sup> (a) <sup>e</sup>	~6	150	193 (2)	73 <sup>b</sup>	$2,2 \times 10^{10}$	$5,7 \times 10^{-17}$	(150;2;150)

### 4.5.3 Фотонные приёмники оптического излучения

Фотонные ПОИ основаны на явление внутреннего фотоэффекта. Согласно зонной теории твердого тела, фотоэлектроны не покидают материал детектора, а переходят в зону проводимости либо с примесного уровня, либо из валентной зоны. Спектральный ход детектирующей способности распространенных фотонных детекторов показан на рис. 4.26. Сульфид свинца  $PbS$  был первым практическим детектором, разработанным в Германии перед второй мировой войной. В 50-е годы прошлого века появление новых фотопроводящих материалов, таких как селенид свинца  $PbSe$ , теллурид свинца  $PbTe$  и антимонид индия  $InSb$ , позволило освоить спектральный диапазон приемников ИК излучения до 3...5 мкм. Использование примесных уровней меди, цинка и золота в Германии расширило диапазон до 30 мкм. В конце 50-х годов в Великобритании был разработан приемник на тройном соединении  $HgCdTe$ , который, наряду с ПОИ из антимонида индия, длительное время оставался одним из наиболее распространенных в силу стабильности свойств и возможности варьировать основные параметры. Уже в начале 1960-х годов появилась технология фотолитографии, которая позволила создавать матричные детекторы, первоначально на основе  $PbS$ ,  $PbSe$  и  $InSb$ , но к 1970-м годам большинство линейных матричных детекторов военного применения были изготовлены из  $HgCdTe$ . Интересно упомянуть, что первые линейные матрицы, включавшие до 200 пикселей, имели физические выводы от каждой площадки. По мере улучшения параметров детекторов появились приборы, выполненные по так называемой СПРАЙТ (SPRITE-Signal Processing In The Element) технологии, которая была предложена К. Эллиотом с сотрудниками [31]. Охлаждаемые до криогенных температур СПРАЙТ-приемники остаются одними из наиболее применяемых детекторов ИК излучения (рис. 4.28). Их изготавливают в виде полоски из материала  $HgCdTe$ , которую размещают на сапфировой подложке. Сущность технологии состоит в том, что полоска вытянута в направлении сканирования и на нее подается электрическое смещение таким образом, что скорость дрейфа носителей заряда совпадает со скоростью сканирования.

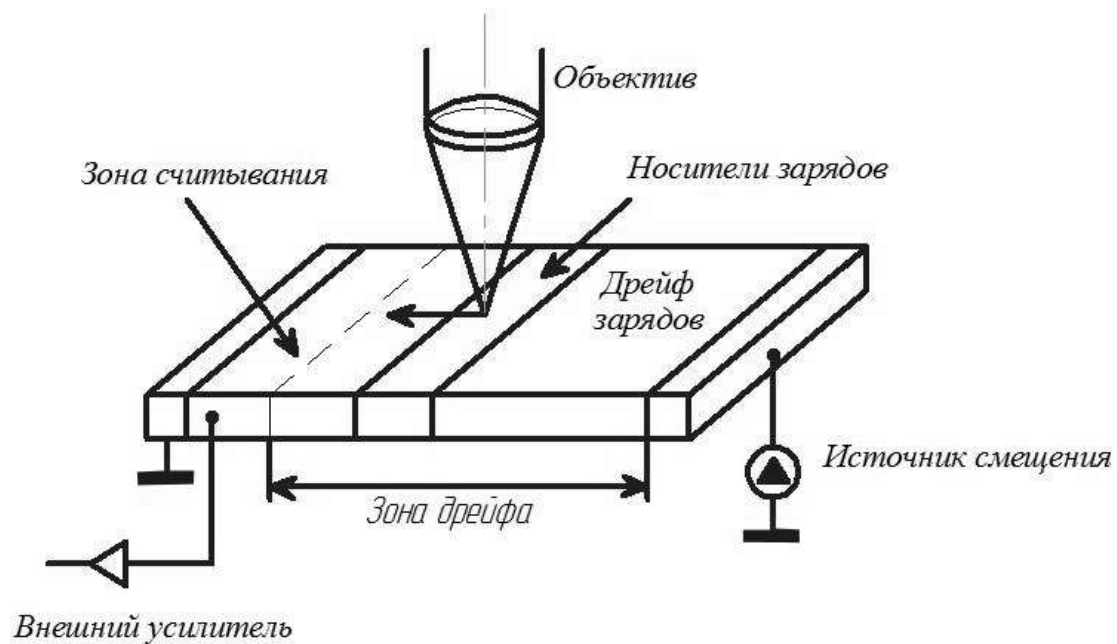


Рисунок 4.28 – Принцип действия СПРАЙТ-приёмника оптического излучения

По мере того, как точка изображения движется вдоль полосы детектора, индуцируемые ею заряды движутся синхронно, накапливаясь к концу полосы.

Таким образом, основным преимуществом СПРАЙТ-приёмника является интегрирование сигнала в фокальной плоскости самим детектором, что снижает шумы. При последовательном считывании сигнала скорости сканирования СПРАЙТ и одиночного приемника совпадают. Однако, если множество СПРАЙТ-детекторов собраны параллельным образом, скорость сканирования может быть уменьшена за счет одновременного интегрирования. Длинноволновые фотонные ПОИ, как правило, требуют охлаждения до криогенных температур для того, чтобы подавить излучение чувствительной площадки самой на себя и снизить истощение энергетических уровней за счет теплового возбуждения атомов примесей. Поэтому первые фотонные ПОИ устанавливали внутри сосуда Дьюара, заполняемого жидким азотом с температурой 77 К. С целью избежать проблем, связанных с жидким азотом, были разработаны микрохолодильники на основе эффекта Джоуля-Томсона (микрохолодильник Стирлинга), в которых, в частности, использовалась замкнутая циркуляция жидкого гелия. Такие холодильники применяла известная в 1980 - 90-х годах американская фирма Inframetrics (в настоящее время фирма FLIR Systems).

Наиболее практичными являются термоэлектрические холодильники, однако достигаемая с их помощью степень охлаждения ограничена температурами выше 190 К; кроме того, они весьма энергоемки. Постоянная времени фотонных ПИ находится в пределах от  $10^{-11}$  секунд для

сверхбыстрых кремниевых детекторов до нескольких миллисекунд для приемников на основе *PbS*.

Теоретическое значение обнаружительной способности для тепловых детекторов, имеют гораздо меньшую температурную зависимость, чем для фотонных детекторов. При температуре ниже 50 К и нулевом фоне тепловые детекторы LWIR характеризуются более низкими значениями  $D^*$ , чем фотонные. Тем не менее, при температурах выше 60 К пределы показывают преимущества тепловых детекторов.

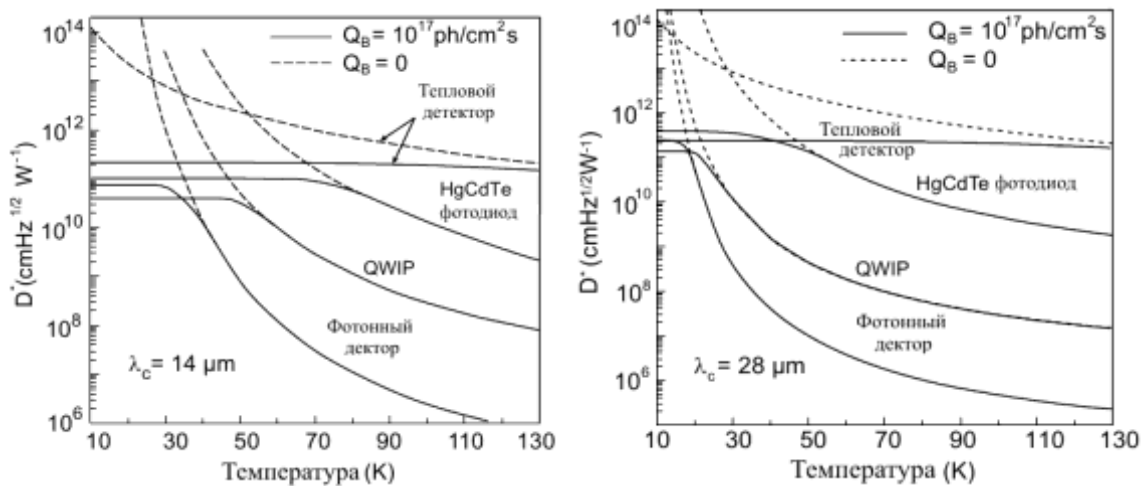


Рисунок 4.29 – Зависимость (теоретический предел, ограничивающий достижения)  $D^*$  для фотонных и тепловых детекторов LWIR и VLWIR на длинах волн  $\lambda_c = 14$  мкм и  $\lambda_c = 28$  мкм, соответственно, при нулевом фоне и фоне  $10^{17}$  фотонов  $\cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  от температуры приёмника [32]

При комнатной температуре обнаружительная способность тепловых детекторов гораздо лучше, чем у фотонных детекторов LWIR. Интересно отметить, что теоретические кривые  $D^*$  для фотонных и тепловых детекторов показывают, что аналогичные основные ограничения наблюдаются при низких температурах. Подобные соображения были проведены для детекторов сверхдлинноволнового инфракрасного излучения (VLWIR), работающих в дальнем спектральном диапазоне. Результаты расчётов показывают, что детекторы, работающие в этом диапазоне, – это криогенные *Si* и *Ge* с внешней фотопроводимостью и криогенные тепловые детекторы, т.е. обычные болометры.

Детализацию знаний о достигнутых результатах по предельной чувствительности ФРА ИК излучения из *HgCdTe* при заданной температуре охлаждения матрицы ФРА можно составить по данным из обзора [27] и работ [32, 33]. Данные приведены на рисунке 4.30.

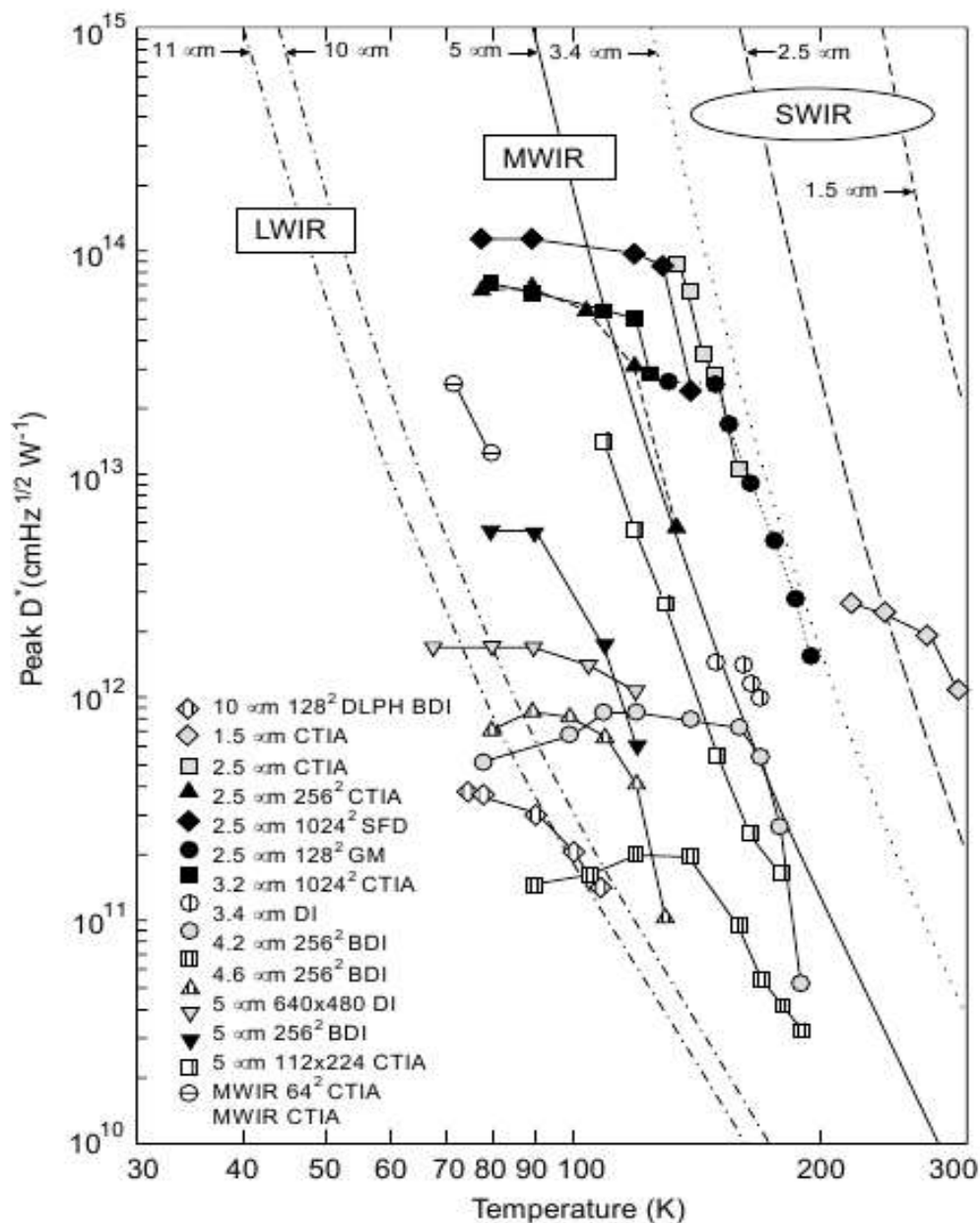


Рисунок 4.30 – Обнаружительная способность FPA из HgCdTe в зависимости от температуры [33]

Объяснение высоких значений пиковой обнаружительной способности  $D^*$  для MWIR на фотодиодах FPA из HgCdTe проясняются из рассмотрения графика (рис. 4.31) спектральной зависимости коэффициента адсорбции для приёмников, чувствительных в диапазонах MWIR и LWIR. Как видно из графика, заимствованного из работ [27, 34], приёмники из InSb и  $\text{Hg}_{0,73}\text{Cd}_{0,27}\text{Te}$  имеют близкие спектральные характеристики в области MWIR как при температуре приёмников 300 К, так и при температуре 77 К, а приёмники на фотодиодах со структурой  $\text{Hg}_{0,79}\text{Cd}_{0,21}\text{Te}$  простирают свою чувствительность в область LWIR. При этом дальняя граница чувствительности приёмников существенно зависит от температуры охлаждения приёмников.

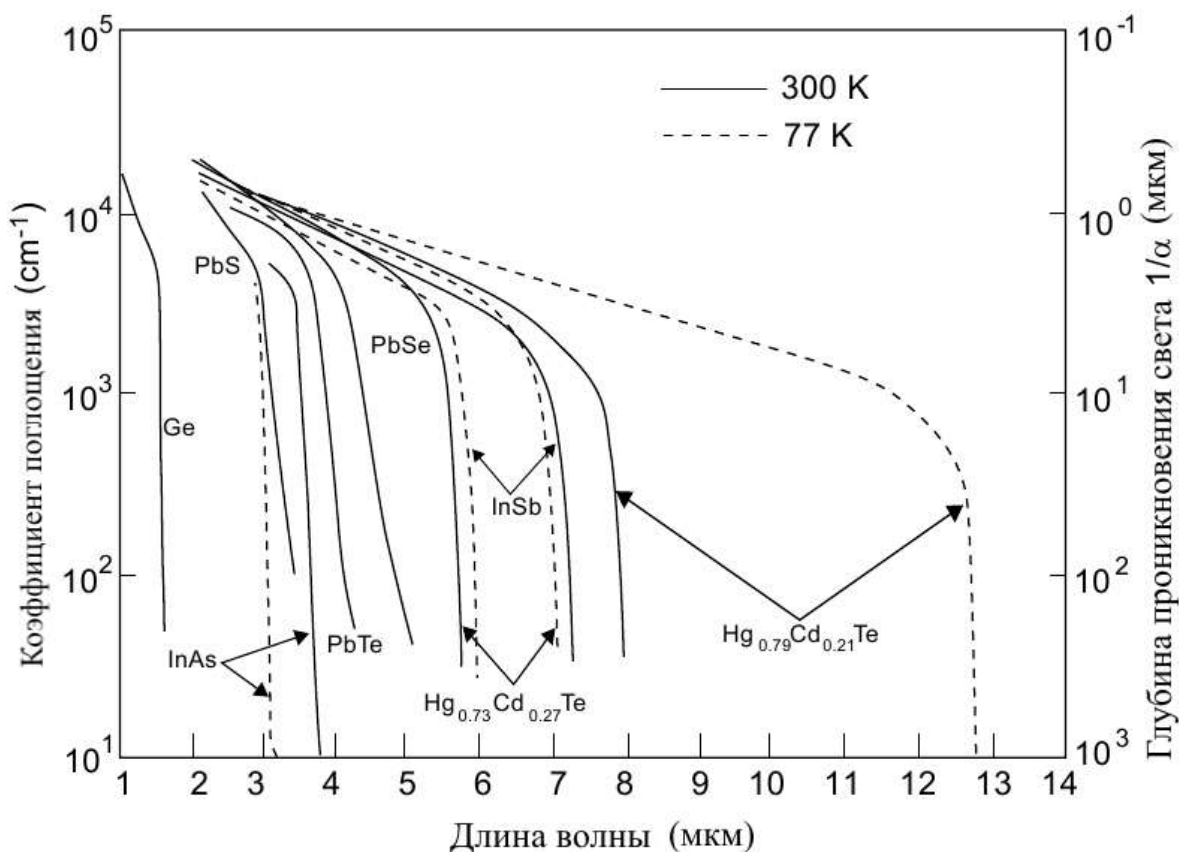


Рисунок 4.31 – Коэффициент поглощения для различных материалов фотоприёмников в спектральном диапазоне 1-14 мм

Выбор ФПУ для работы в условиях наблюдения на этапе выхода из плотных слоёв атмосферы носит сложный и противоречивый характер. С одной стороны, безусловными выводами являются следующие теоретические и экспериментальные данные.

Матрицы на основе силицида платины *PtSi* являются наиболее однородными с характерной неоднородностью элементов от 0,5% до 1%. Для *InSb* эта неоднородность в настоящее время составляет от 5% до 10%, а для КРТ от 10% до 20%. Неоднородности, получаемые после изготовления матрицы, могут быть скомпенсированы электрическим путём, путём накопления информации о неоднородностях в то время, когда матрица «смотрит» на однородный фон, с последующим вычитанием этих неоднородностей поэтапно по отношению к случаю, когда матрица «смотрит» на реальную среду.

В лабораторных условиях при этом было достигнуто десятикратное уменьшение геометрического шума. В натуральных условиях компенсация неоднородностей может оказаться более трудной задачей, т.к. распределение неоднородностей может зависеть от температуры. По результатам модельных расчётов и лабораторных испытаний неоднородности могут быть выровнены до 0,05%. В этом случае матрица из КРТ имеет явное преимущество перед *PtSi*. Если достигнуть указанной



компенсации для матрицы из  $InSb$ , она будет особенно эффективна для диапазона 3,2 – 5,2 мкм.

Потеря эффективности матриц из  $PtSi$  при низких температурных контрастах обусловлена к тому же ее низкой квантовой эффективностью на более длинных волнах. Однако достигнутый к настоящему времени более высокий уровень развития матриц из  $PtSi$  оставляют их достаточно конкурентоспособными.

#### 4.5.4 Приёмники оптического излучения на основе квантовых ловушек

В последней декаде прошлого века стали коммерчески доступными приемники ИК излучения, использующие принцип так называемых квантовых ловушек (quantum well). В англоязычной научной литературе такие приемники носят название QWIP (Quantum Well Infrared Photodetectors) [35]. В QWIP -приёмниках использован эффект фотовозбуждения электронов (дырок) между основным и первым возбужденным состоянием в зоне проводимости (валентной зоне) квантовой ловушки (рис. 4.32). Структура ловушки такова, что фотовозбужденные носители заряда могут "выбираться" из нее и создавать электрический ток. Например, в одном из первых серийных матричных QWIP приёмников была использована ловушка из  $GaAs$  высотой 45 Å и барьер из  $AlGaAs$  высотой 500 Å. Основные состояния электронов в квантовой ловушке создавались примесным кремнием.

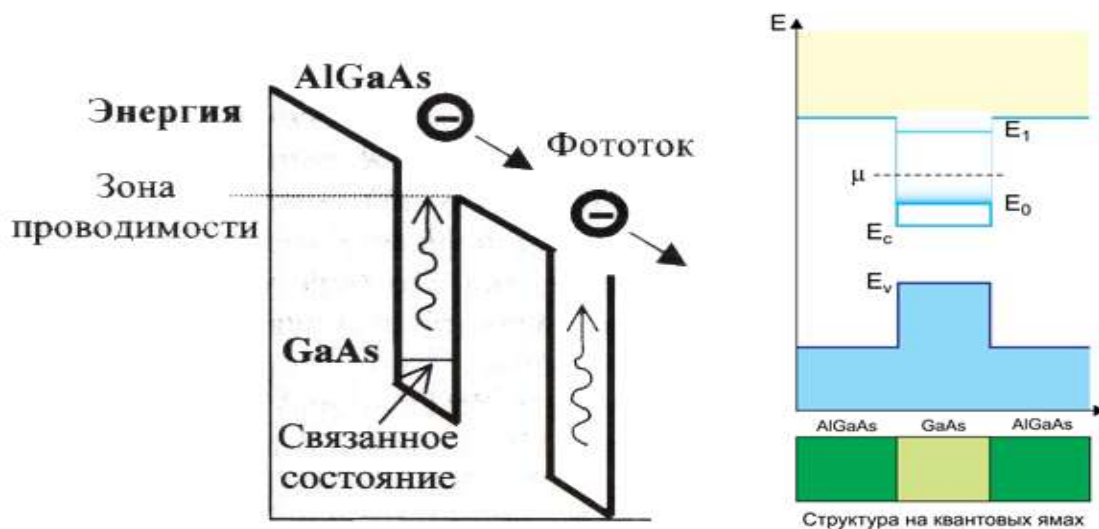


Рисунок 4.32 – Диаграмма работы ИК QWIP-приёмника  $GaAs-AlGaAs$  во внешнем электрическом поле (поглощение ИК фотонов переводит электроны из основного состояния в зону проводимости)

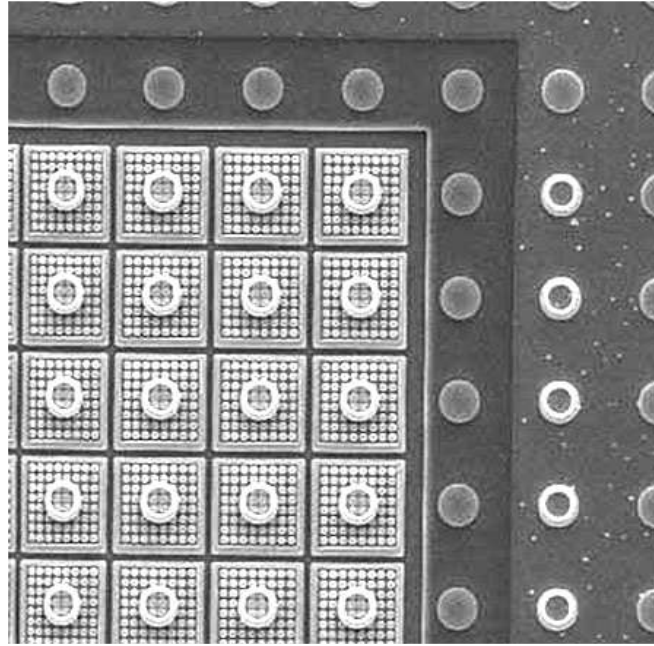


Рисунок 4.33 – Фрагмент матричного QWIP со стандартным шагом между элементами, равным 25 мкм [36]

Квип-приёмники, использующие *GaAs*, позволяют регистрировать ИК излучение с длиной волны более 6 мкм.

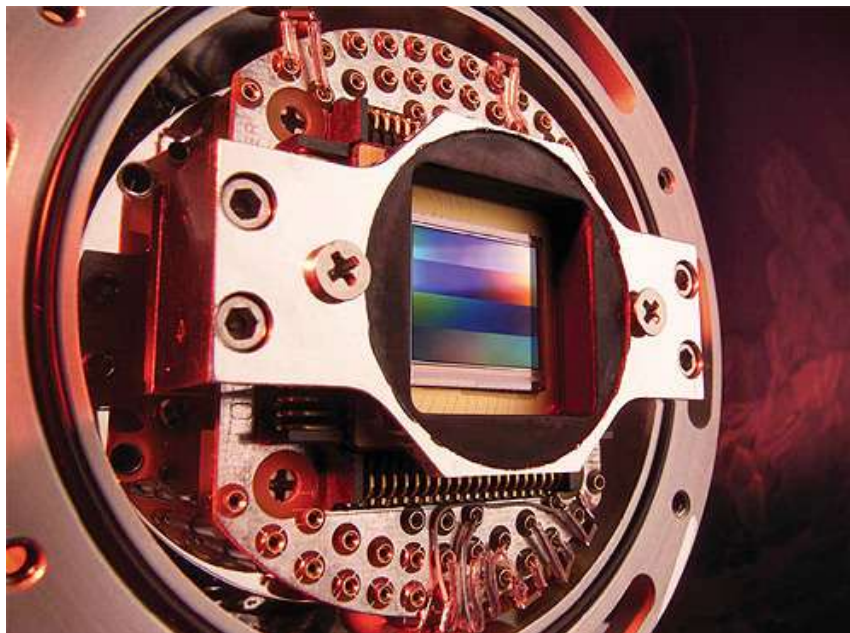


Рисунок 4.34 –Четырехцветный матричный QWIP (корпорация Indigo) формата 640×512 и 640×128 элементов

В тепловизорах высокого уровня становятся все более популярными матричные QWIP-фотоприемники.

#### **4.5.5 Матричные приёмники: микроболометрические матрицы, фотонные матрицы, матрицы на основе барьера Шоттки, матрицы на суперрешётках, матрицы на полупроводниках с собственной проводимостью, Z – планарные матрицы**

Чувствительные элементы не заполняют всю площадь матрицы, поэтому одним из важных параметров таких детекторов является коэффициент заполнения (fill factor). Чем выше коэффициент заполнения, тем качественнее изображение, особенно при мониторинге температур, близких к температуре окружающей среды, а также при анализе слабых температурных градиентов. В лучших матрицах коэффициент заполнения может достигать 90 % [37].

Различают две технологии изготовления матричных фотоприемников: монолитную (monolithic) и гибридную (hybrid).

Монолитные матрицы дешевле и проще в изготовлении, поскольку в них чувствительные площадки и зоны передачи электрического сигнала расположены в подложке из одного и того же материала, однако их коэффициент заполнения не превышает 55 % (типичный коэффициент заполнения для монолитных матриц с ПЗС-считыванием 30-40%). В монолитных матрицах труднее реализовать современные алгоритмы встроенной обработки сигнала, например, переменное время интегрирования.

Также к таким структурам относятся прежде всего матрицы на диодах Шоттки. Диоды Шоттки изготавливают из кремния с использованием металлов, которые вступают с ним в химическую реакцию с образованием силицидов. К таким металлам относятся, например, палладий и платина (чувствительна в диапазоне спектра 3-5 мкм). Подбором металла можно обеспечить чувствительность соответствующих МФП от 1 до 15 мкм. Для всех диодов Шоттки характерна очень низкая квантовая эффективность, которая уменьшается с ростом длины волны. Падение квантовой эффективности можно во многих случаях скомпенсировать увеличением времени накопления сигнала, которое для гибридных структур ограничено. Еще одним недостатком диодов Шоттки является необходимость их охлаждения до более низких температур (77-80 К). Однако диоды Шоттки имеют в настоящее время наименьшую неравномерность чувствительности среди многоэлементных МФП, составляющую всего 0,2%, и данное обстоятельство, наряду с невысокой стоимостью и хорошо отработанной технологией изготовления, предопределяет их высокий спрос, пик которого, впрочем, уже позади [38].

В гибридных матрицах зоны чувствительных площадок и зона считывания сигналов расположены в двух слоях, разделенных индиевыми контактами, через которые происходит мультиплексирование сигналов каждой площадки. Для создания зоны считывания сигналов используют материал, наиболее отработанный технологически, обычно кремний.

Такая отдельная структура дает возможность отдельной оптимизации детектирующих и считывающих структур [39]. Такие фотоприемники обладают максимальным коэффициентом заполнения и обеспечивают наиболее высокое качество изображения с температурным разрешением до 0,02°С.

Наивысшую чувствительность и быстродействие обеспечивают фотодиодные МФП на КРТ (*HgCdTe*), работающие в фотовольтаическом режиме при рабочих температурах 80-120 К в диапазонах спектра 3-5 и 8-12 мкм. Основное достоинство этого материала - возможность изменением состава смещать спектр fotocувствительности в требуемый рабочий спектральный диапазон от 1,5 до 12 мкм. Матрицы на КРТ способны работать и при температуре 180 К, обеспечиваемой термоэлектрическими системами охлаждения. Такие матрицы дешевы, надежны, легки, не требуют ухода, в них отсутствуют акустические шумы, - все это обуславливает их пригодность для использования в недорогих и, вместе с тем, достаточно чувствительных тепловизорах широкого применения.

Также весьма чувствительными и быстродействующими являются фотодиодные матрицы на *InSb* с рабочей температурой 60-120 К, обеспечивающие fotocувствительность в диапазоне спектра 1-5,5 мкм.

Для гибридных МФП характерна высокая квантовая эффективность (60-80 %), обуславливающая, в конечном счете, предельно высокие значения обнаружительной способности. Однако высококачественные гибридные МФП весьма дороги, особенно на диапазон 8-12 мкм [40].

С точки зрения принципа работы МФП существует два типа устройств: приборы с зарядовой связью - ПЗС (*charge-coupled-device* - CCD) и приборы на комплементарных металл-оксидных полупроводниках - КМОП (*complementary metal-oxide semiconductors* CMOS). В ПЗС-детекторах сигнал каждой чувствительной площадки создается электронами, которые последовательно собираются в детекторе вплоть до последней колонки, после чего считывается суммарный сигнал. При этом возможна как потеря части сигнала (*charge-coupled transfer loss phenomenon*), так и размытие изображения за счет перетока избыточных электронов с одной площадки на другую при визировании объектов с чересчур высокой температурой (*blooming*). Охлаждаемые ПЗС-приемники являются более энергоемкими, чем КМОП-приемники. Они широко используются в показывающих тепловизорах, где вышеуказанные недостатки не являются решающими. В измерительных тепловизорах требуются специальные меры учета потери сигнала и размытия изображения. КМОП-детекторы должны быть эффективно охлаждены (до -200 °С), что достигается использованием миниатюрных компрессоров Стирлинга; при этом обеспечиваются наилучшие измерительные возможности тепловизоров.

Поскольку большинство ИК детекторов представляют собой счетчики фотонов, важной характеристикой матричных приемников

является их квантовый выход, или квантовая эффективность (*quantum efficiency*), которая характеризует способность ПОИ собирать кванты электромагнитного излучения и преобразовывать их в электрический сигнал. Интересно отметить, что квантовая эффективность одного из наиболее распространенных материалов фотонных матриц - силицида платины *PtSi* - составляет менее 1%. В целом, детекторы с высокой квантовой эффективностью обеспечивают лучшее температурное разрешение и более высокое качество изображения.

Еще одной характеристикой матричных фотоприемников является время интегрирования сигнала (*integration time*). В зарубежных матрицах оно обычно составляет 16 мс, что соответствует одному полному кадру. Матрицы с переменным временем интегрирования позволяют собирать ИК фотоны в течение более короткого времени, что позволяет обеспечить регистрацию температур до 450 °С. Тепловизоры без переменного времени интегрирования требуют введения спектральных фильтров для регистрации температур в широком интервале от -20 до +2000 °С.

Матричные фотоприемники обладают неравномерной чувствительностью от одной площадки к другой. Коррекцию (*non-uniformity correction – NUC*) осуществляют различными способами: 1) считывая температуру крышки, размещаемой на объектив (простейший способ); 2) периодически размещая в оптическом пути внутри камеры объект с равномерной известной температурой, которая служит для корректировки сигналов в отдельных элементах матриц; 3) осуществляя непрерывную коррекцию с помощью встроенного микропроцессора (наиболее метрологичный способ). Способы коррекции является предметом "ноу-хау" (*know how*) фирм-производителей (из последних разработок можно отметить алгоритмы CNUC и Hypercalc, использованные в тепловизоре SC 7000 компании FLIR Systems-CEDIP).

Другой проблемой тепловизоров, трудно решаемой в случае ФРА-детекторов, является необходимость компенсировать изменения температуры окружающей среды. Чаще всего это осуществляют, размещая несколько датчиков температуры в критических точках оптической головки тепловизоров.

#### **4.5.6 Неохлаждаемые микроболметрические матрицы**

Технология изготовления болометрических ФРА-матриц, предложенная относительно недавно, получила быстрое признание, поскольку такие матрицы в основном не требуют охлаждения и способны работать при температуре окружающей среды. Для ТпВ с таким типом матрицы не требуется оптический модулятор и связь детектора с мультиплексором осуществляется на постоянном токе, поэтому возможно

получение тепловых изображений как неподвижных, так и движущихся объектов.

Основные недостатки микроболометрических матриц: более низкая по сравнению с фотонными матрицами чувствительность и низкая метрологическая стабильность.

Схема неохлаждаемой болометрической матрицы изображена на рис. 4.35. Каждый чувствительный элемент реализует принцип резистивного, пироэлектрического или ферроэлектрического детектора. В резистивных элементах поглощенное ИК излучение изменяет их электрическое сопротивление, что регистрируется электронной схемой считывания сигнала. В пироэлектрических элементах, при температурах ниже точки Кюри, изменение их температуры приводит к модуляции поверхностного электрического заряда, т.е. к появлению электрического тока.

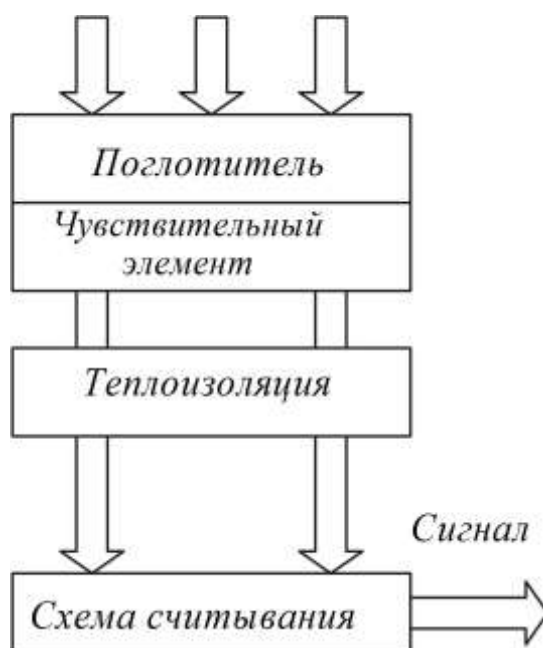


Рисунок 4.35 – Структура болометрической матрицы

Пироэлектрический эффект может быть усилен наложением электрического поля, что приводит к ферроэлектрическим феноменам. В современных матрицах имеется слой, поглощающий излучение, который выполнен в виде четвертьволновой оптической полости толщиной около 1 мкм. Отдельные чувствительные площадки теплоизолированы друг от друга с целью обеспечить максимальное пространственное и температурное разрешение. Как и в фотонных матрицах, используется два типа архитектуры элементов: гибридный и монолитный. В гибридных матрицах детектор и устройство считывания сигнала, выполненные на основе кремниевой структуры, изготовлены отдельно друг от друга и затем собраны вместе. В монолитных матрицах детектор размещают над схемой

считывания непосредственно в процессе изготовления, что обеспечивает лучшие детектирующие параметры.

Типичная коммерческая болометрическая матрица состоит из 320 x 240 элементов и обеспечивает температурное разрешение на уровне 60... 100 мК (в лабораторных системах достигнуто разрешение 10 мК).

#### 4.5.7 Фотонные матрицы

Наиболее распространенные типы фотонных матриц выполнены на основе барьера Шоттки (Shottky barrier), суперрешеток (suprlattice), собственной проводимости (intrinsic) и Z-планарной (Z-plane) технологии.

##### Матрицы на основе барьера Шоттки

Данный тип детектора был предложен Ф. Шепардом и А. Янгом в 1973 г [42]. В настоящее время многими компаниями разработаны матрицы размером до 512×512, большей частью использующие силицид платины *PtSi*. Этот материал работает в диапазоне 3...5 мкм, весьма стабилен во времени и устойчив к повышенным температурам. Несмотря на низкую квантовую эффективность (~1 %), *PtSi* фотоприёмники обеспечивают температурное разрешение до 0,05 °С. Силицид галлия *GaSi* позволяет расширить спектральный диапазон до 8... 16 мкм.

##### Матрицы на суперрешетках

В этих фотоприёмниках, к которым также относят QWIP-детекторы, перемежающиеся слои различных полупроводников различной толщины позволяют изменять область спектральной чувствительности. Наиболее перспективная технология использует материал *GaAs – GaAlAs*, разработанный в 1987 г. Длинноволновая граница суперрешеток может изменяться от 6 до 11 мкм при обнаружительной способности в диапазоне от  $10^{10}$  до  $10^{11}$  см·Гц<sup>1/2</sup>Вт<sup>-1</sup> (уровень охлаждения от 50 до 70 К), Обладая квантовой эффективностью от 5 до 10 % на длине волны 9,5 мкм, эти фотоприёмники обеспечивают весьма высокое температурное разрешение (0,015 °С).

Матричные QWIP детекторы большого формата позволили создать высокочувствительные тепловизоры, работающие в длинноволновом диапазоне.

##### Матрицы на полупроводниках с собственной проводимостью

В этих матрицах используют обычные фотопроводящие и фотоэлектрические (фотовольтаические) детекторы. Как и в случае суперрешеток, наиболее перспективна гибридная технология, которая предусматривает внедрение (приклеивание) чувствительного элемента на кремниевую подложку чипа считывания электрического сигнала. Распространены матрицы из *HgCdTe* (размером до 256×256) и *InSb* (размером до 640×512). Квантовая эффективность приемников из *InSb* достигает 80...90 %, однако она не всегда реализуется вследствие

переполнения квантовых ловушек электронами Другой проблемой этих ПОИ оказалась их относительно невысокая стабильность во времени и при циклах охлаждения.

#### Z – планарные матрицы

Данная технология была предложена с целью дополнить функцию обнаружения электромагнитного излучения рядом функций предварительной обработки сигнала. Кремниевые чипы размещают на тонкой керамической плате (толщиной 100 мкм), на боковой поверхности которой устанавливается ИК детектор. Такие платы собирают вместе, формируя матрицу. В Z-планарных детекторах можно осуществлять свертку сигнала, дифференцирование и аналого-цифровое преобразование.

Современные матричные ПОИ характеризуются следующими параметрами:

- *HgCdTe*: до 480×640 (размер элемента матрицы от 20 мкм до 1 мм); рабочая температура  $T_{op} = 80$  К;
- *PtSi*: до 1024×1024; рабочая температура  $T_{op} = 80$  К;
- *InSb*: до 1024×1024;  $T_{op} = 80$  К;
- неохлаждаемые матрицы: до 640×480.

Коммерческие матричные QWIP - фотоприемники формата 320×256 и 640×486 работают при температуре 70 К и обеспечивают температурное разрешение до 20 мК в диапазоне длин волн 8... 12 мкм. Поставщиками охлаждаемых QWIP-матриц являются фирмы QWIP Technologies, Santa Barbara Focalplane и BAE Systems, США, Aereo, Швеция, а также французская фирма Uliss (дочерняя компания фирмы Sofradir). В качестве примера в табл. 4.3 приведены параметры FPA матриц фирмы Santa Barbara Focalplane.

Таблица 4.3 – Матричные фотоприемники производства фирмы Santa Barbara Focalplane (США) [1]

Модель	Формат	Материал	Спектральный диапазон, мкм	Размер пикселя, мкм	Максимальная частота смены изображений,
SBF184 (snapshot)	1024x 1024	InSb	1,0...5,3	19,5	142
SBF184Q (snapshot)	1024x1024	LWIR, QWIP	7,8... 9,4	19,5	142
SBF180/194 (snapshot)	320 x 256		1.0,..5,3	30	457
SBF135	256x 256	InSb	3.0 ... 5,3	30	142
SBF161 (snapshot)	128x128	LWIR HgCdTe	2.. .10	40	2012

Что касается неохлаждаемых болометрических матриц, то в первых тепловизорах использовались приемники фирмы Boeing, выпускавшиеся по технологии Honeywell. Впоследствии, фирма Boeing продала технологию



охлаждаемых и неохлаждаемых матриц фирме DRS США. Неохлаждаемые микроболометрические матрицы на основе аморфного кремния выпускаются также фирмами Uliss и Acgeo. Японской фирмой NEC освоен выпуск неохлаждаемых VOx матриц форматом 640×480 с температурным разрешением 70 мК. В Германии основным поставщиком детекторов военного и двойного назначения является фирма AIM, которая специализируется на охлаждаемых матрицах, в частности, на базе PtSi. Известным немецким разработчиком охлаждаемых QWIP -матриц является Фраунгоферовский институт прикладной физики. В Израиле матрицы на основе антимонида индия поставляет фирма SCD Semiconductor Devices.

Российские разработки в области охлаждаемых, а особенно неохлаждаемых, матричных ИК детекторов остаются фрагментарными и не соответствуют современным требованиям. Примером отечественных разработок являются охлаждаемые ПИ и соответственно матричные тепловизоры ГУП "НПП "Электрон-Оптроник" и ЗАО "НПП "Силар" (г. Санкт-Петербург), а также Института физики полупроводников (г. Новосибирск). Работы в области неохлаждаемых матриц проводятся в ФГУП "Орион".

В таблице 4.4 представлены сравнительные достоинства основных типов фотонных и тепловых МФП, используемых в матричных ТпВ, по 3-балльной шкале (третий балл - высший) [40], на рисунке 4.36 показана различная чувствительность приёмников от длины волны.

Таблица 4.4 – Сравнительные достоинства МФП разных типов

Показатель	Фотонные МФП				Тепловые МФП		
	КРТ	InSb	PtSi	GaAs	м/б	т/э	п/э
Входной сигнал	Лучистый поток				Температура	Градиент температуры	Изменение температуры
Выходной сигнал	Фото-ЭДС				Изменение сопротивления	Термо-ЭДС	Заряд
Рабочая температура	2	1	1	1	3	3	3
Необходимость термостабилизации	+	+	+	+	+	-	+
Обнаружительная способность	3	3	2	3	2	1	1
Размер элементов	2	3	3	2	2	1	2
Однородность элементов	1	1	3	2	1	1	1
Число элементов	2	3	3	3	2	2	2
Коэффициент заполнения	2	2	1	2	3	2	3
Квантовая эффективность	3	3	1	2	-	-	-
Быстродействие	3	3	2	3	1	1	1

Необходимость модуляции излучения	-	-	-	-	-	-	+
Необходимость коррекции неоднородности	+	+	+	+	+	+	-
Многоспектральность, вариабельность спектрального диапазона чувствительности	+	-	-	+	+	+	+
Возможность интегрирования с мультиплексором	-	-	-	+	+	+	+
Стоимость, технологичность	1	1	2	2	3	3	3
Темп совершенствования, общая перспективность	3	2	1	3	3	2	3

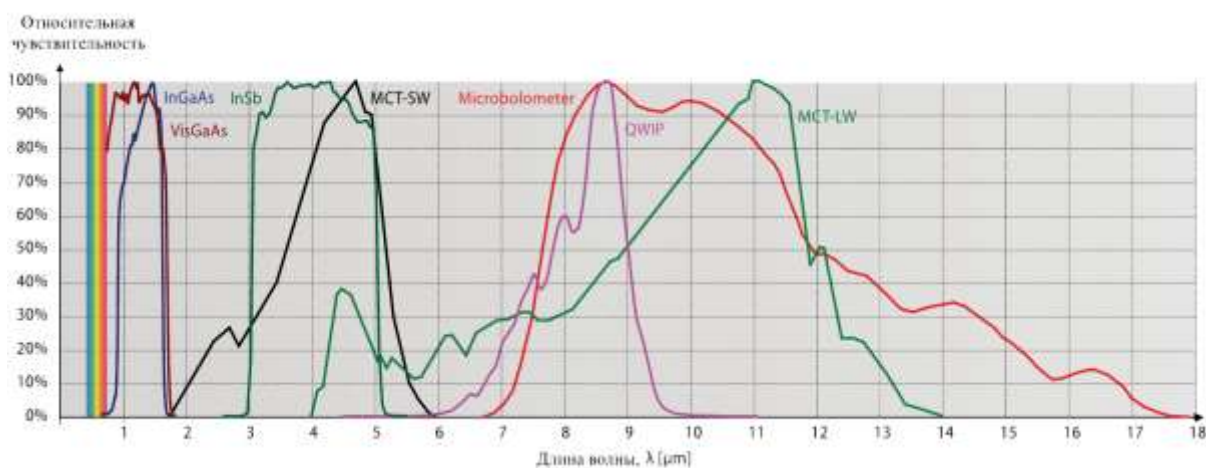


Рисунок 4.36 – Спектральные характеристики приёмников ИК излучения различного типа [43]

#### 4.6 Общая оценка и расчёты

С учётом излучения Солнца и температурного режима естественных источников излучения на Земле в общем потоке радиации, воспринимаемой ОЭС в диапазоне длин волн 3-3,5 мкм, доминирует отражённое излучение - это так называемая подсветочная область спектра. В области длин волн, больших 7 мкм, преобладает собственное излучение объектов и фонов. Участок длин волн 3-5 мкм – как бы переходный [43].

Обнаружение объекта производится по его демаскирующим признакам, которые делятся на три группы: видовые, признаки деятельности и признаки расположения. К видовым демаскирующим

признакам относятся физические свойства объекта (способность отражать излучение оптического и радиолокационного диапазонов волн, излучать энергию в тепловом диапазоне) и геометрические свойства (форма и размер объекта и его отдельных деталей). Данные о фоноцелевой обстановке (ФЦО) необходимы для решения следующих задач:

- создания моделей типовых объектов и алгоритмов обнаружения, распознавания и сопровождения с разделением их по приоритетности;
- управления основными оптическими параметрами объекта для их оптимизации при создании малозаметных целей, например, по технологии, определяемой в зарубежной практике как “Стелс-технология”;
- имитации и моделирования различных режимов работы ОЭС на стадии отработки конструкции и, в том числе, в плане решения задачи снижения стоимости прибора;
- разработки системы идентификации объектов сложной конструкции в автоматическом режиме за счёт фильтрации фона и корреляции путём сравнения характерных параметров принимаемого изображения и эталона цели.

При разработке этих систем нового поколения следует ориентироваться на промышленно достигнутые результаты по построению матричных приёмников излучения и модульных блоков электронной обработки сигналов.

Тепловизионные системы (поисковые) характеризуются совокупностью основных показателей, определяющих их эффективность [44]:

- вероятность обнаружения, различения и распознавания объекта на заданной дальности;
- минимальная обнаруживаемая разность температур;
- минимальная разрешаемая разность температур;
- угловое (линейное) разрешение;
- ширина полосы захвата местности (угол обзора);
- число воспроизводимых градаций температур.

Несмотря на относительную полноту и универсальность применения, основные показатели эффективности не пригодны для описания собственно аппаратуры, ибо они зависят не только от нее самой, но также и от условий ее использования, параметров объекта и фона. Поэтому для оценки собственно тепловизионной аппаратуры целесообразно использовать систему ее основных (обобщенных) параметров:

- порог чувствительности (NETD);
- обнаружительная способность;
- угол обзора и угловой элемент разрешения;
- спектральный рабочий диапазон;
- диапазон регистрируемых разностей температур;
- диапазон плотностей изображения;

- быстродействие;
- дальность обнаружения/распознавания объекта.

Для поисковых тепловизионных систем (ТПС) дальность обнаружения/распознавания объекта является обобщающей характеристикой, которая в совокупности с весогабаритными параметрами аппаратуры, определяет обоснованный выбор поискового средства для решения конкретной поисковой задачи.

Дальность наблюдения зависит от пространственного и температурного разрешения ТПС и может быть математически определена из выражения, описывающего процесс восприятия и интерпретации изображения зрительным анализатором.

Общую оценку теоретически достижимых и достигнутых (по данным на 2003 г. [27]) характеристик наиболее значимых приёмников ИК излучения при выбранных температурах охлаждения элементов можно составить из анализа рис. 4.37.

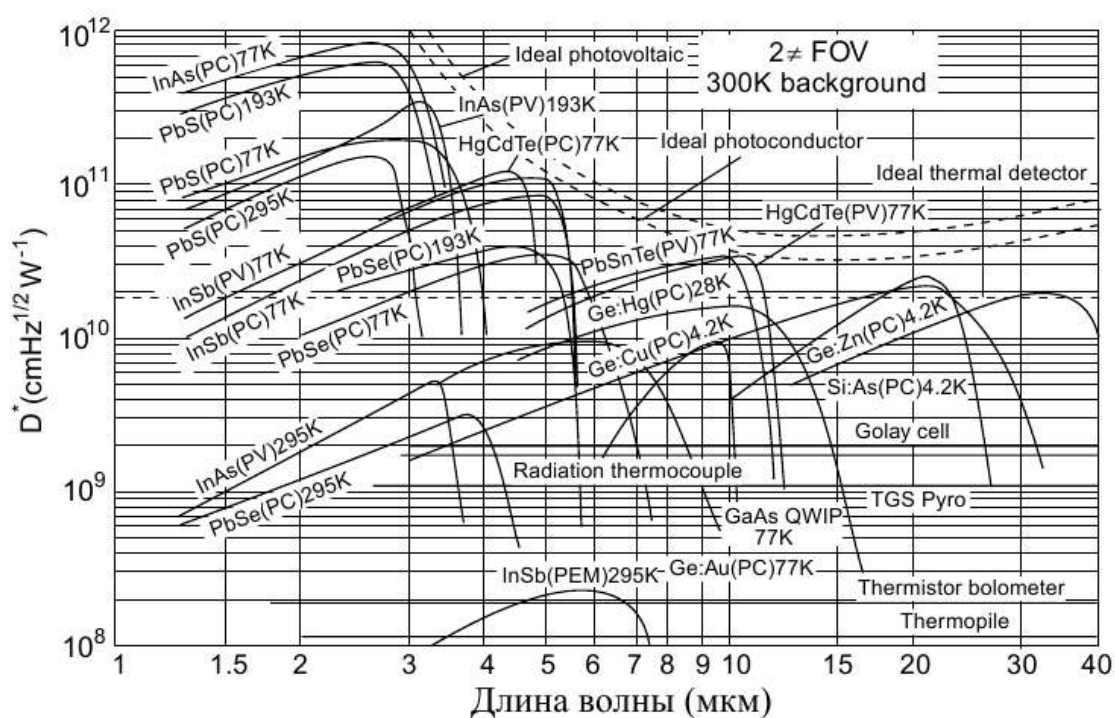


Рисунок 4.37 – Сравнение обнаружительной способности  $D^*$  различных коммерчески доступных инфракрасных детекторов и их спектральной чувствительности при указанной температуре. Рабочая частота – 1000 Гц для всех детекторов, кроме термобатареи (10 Гц), термопары (10 Гц), термистора (болометра) (10 Гц), ячейки Галлея (10 Гц) и пироэлектрика (10 Гц). Пунктирными линиями показаны теоретические кривые, ограничивающие предельные значения  $D^*$  для идеальных фотопроводящих, фотоэлектрических детекторов и тепловых детекторов. РС – фотопроводящие детекторы; PV – фотоэлектрические датчики; PEM – фотоэлектромагнитные детекторы

Однако, как показано в [28], при оценке тепловизионных приборов не целесообразно проводить сравнение приёмников по предельно достижимой обнаружительной способности  $D^*$ . По этой причине выбор критериев сравнения и оценки приёмников ТпВ в [29] проводится по интегральным параметрам коэффициента эффективности, определяемого в зависимости от необходимого количества приёмников с исследуемым типом материала FPA (методика И.М. Фроимсона, см. 4.6.1).

В последние годы за рубежом активно ведутся разработки как активных, так и пассивных систем обнаружения и получения изображения в длинноволновом диапазоне на основе антенных микроболометров (АМБ). В этой области спектра они превосходят по характеристикам диоды Шоттки.

В период 1990-98 гг. в ГОИ им. С.И. Вавилова совместно с ФТИ им. Иоффе РАН и СПбГЭТУ «ЛЭТИ» были разработаны чувствительные элементы антенных высокотемпературных сверхпроводниковых микроболометров с  $NEP \approx 1,5 \cdot 10^{-12}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup> при постоянной времени около 150 нс, что находилось на уровне зарубежных образцов.

Эти задачи были поставлены в США с 1990 года в исследовательской программе Adaptive Focal Plane Array (AFPA) program at DARPA since 1990.

Для астрономических наблюдений разрабатываются более чувствительные приемные системы на основе АМБ, охлаждаемые жидким гелием (4,2 К) для космических приборов. Сообщалось о  $NEP = 1,4 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>. Плёночное исполнение позволяет изготавливать линейки и двухмерные матрицы.

В силу сказанного комплексирование аппаратур, работающих в разных диапазонах, является одной из основных тенденций при разработке различных обнаруживающих и распознающих систем гражданского и военного назначения.

Отмечается, что в последние годы:

- разработан унифицированный ряд многооконных модулей, предназначенных для использования в оптико-электронных системах (ОЭС) различного назначения;

- созданы макетные образцы модулей матричных двухоконных фотоприёмных устройств (ФПУ) на 3–5 и 8–12 мкм на основе структур с квантовыми ямами (КЯ) и матричных микроболометрических приёмников излучения.

В наибольшей степени требованиям на разработку многооконных систем удовлетворяют фотоприёмники на основе квантово-размерных эффектов (КРЭ), физические структуры которых могут быть получены методами молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), позволяющей формировать на подложке монокристаллические полупроводниковые слои с необходимыми свойствами вплоть до моноатомной толщины. В качестве технологического обеспечения для указанных работ могут быть использованы, например, результаты разработки гетеро-эпитаксиальных

структур GaAs/AlGaAs и GaAs/CdHgTe методом МЛЭ. Такие структуры были названы матричными ИК приёмниками на квантово-размерных колодцах – матричными QWIP.

В матричном QWIP каждый слой представляет собой так называемый квантовый колодец, способный удерживать в плену электроны до тех пор, пока они не будут освобождены фотоном строго определённой частоты. Тогда этот электрон улавливается и направляется во внешнюю цепь считывающим слоем, формирующим изображение.

Именно технология, позволившая создать последовательно более 100 квантовых колодцев, обеспечила матричному QWIP широкий диапазон восприятия внутри инфракрасной области спектра, а в последующем и в области субмиллиметрового диапазона.

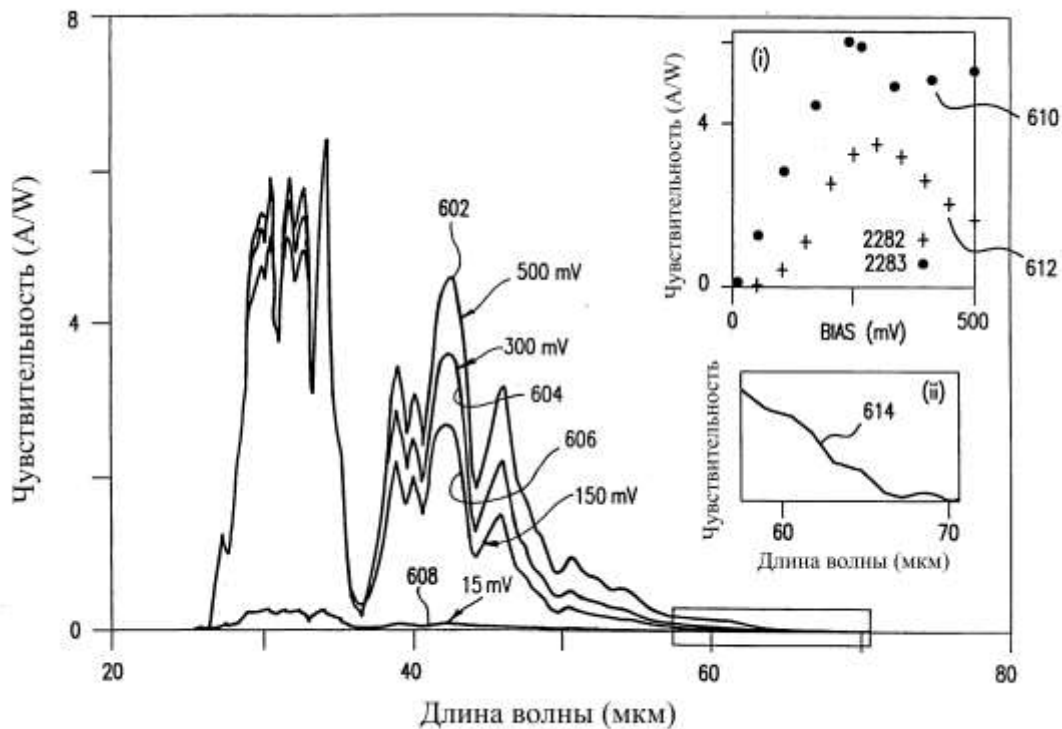
В 90-е годы XX века появились ТпВ на матричных QWIP с высокой технологичностью, воспроизводимостью, однородностью параметров по элементам. Типичный размер матриц: 256×256, 320×240, 320×256, 640×512 и 1024×1024 элемента. Чувствительность QWIP матриц довольно высока: у лучших приборов Noise equivalent temperature difference (NETD) даже ниже 10 мК, типовых – 20 мК, средних – 35 мК. В будущем есть возможность перейти от гибридных структур фокальных матриц к монолитным.

Промышленно-реализованные матричные QWIP иллюстрируются материалами спецификации фирмы FLIR (США) опубликованными ее подразделением INDIGO.

Таблица 4.5 – Материалы спецификации на QWIP матрицу ISC9803

Параметр	Величина	Единица измерения
Размер матрицы (стандарт)	5	дюйм
Число столбцов	640	Активных элементов изображения
Число строк	512	Активных элементов изображения
Размер одного элемента	25	мкм
Размер матрицы	17,7x16,8	мм

Первоначально такие матрицы были названы оптоэлектронными приборами с QD (наноструктуры с так называемыми квантовыми точками – quantum dots) и получивших впоследствии название матричных QWIP. Расширение чувствительности осуществлялось постепенно



4.38 – Области чувствительности двухспектрального матричного QWIP по патенту USP 20050258415, 24 ноября, 2005 [53]

Принципы расширения чувствительности матричных QWIP были описаны в статьях российских исследователей и в исследовании зарубежных специалистов и заключаются в том, что варьированием размеров двух квантовых колодцев, расположенных на нанометровых расстояниях друг от друга, и управлением электрических смещений в каждом из колодцев, можно добиться взаимодействия удерживаемых электронов с фотонами разных областей спектра. На рисунке 4.38 показано области чувствительности двухспектрального матричного QWIP по патенту USP 20050258415.

#### 4.6.1 Физический подход к расчёту параметров тепловизионных систем

Представим схему тепловизора следующим образом [45], см. рисунок 4.39.

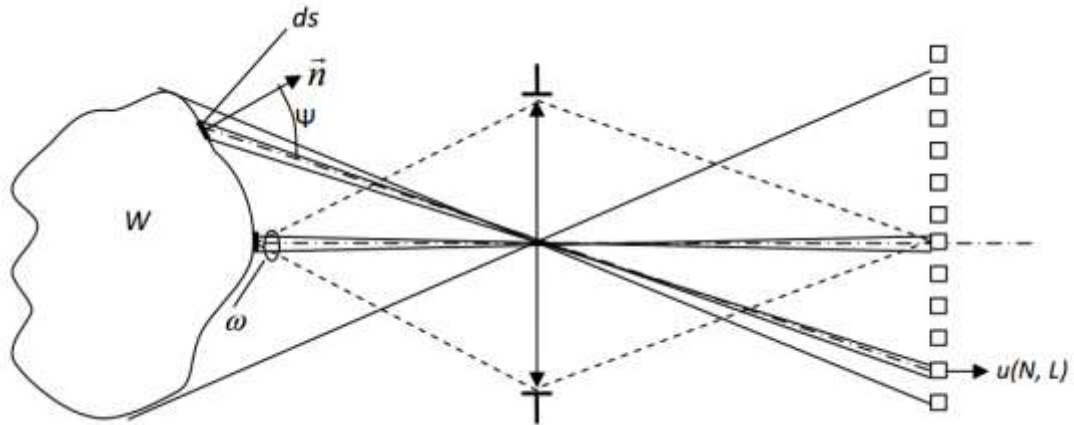


Рисунок 4.39 – Схема работы тепловизоров

$W$  – светимость теплового излучения наблюдаемого объекта;  $\omega$  – передний апертурный угол оптической системы тепловизора;  $ds$  – элемент поверхности наблюдаемого объекта, нормаль  $n$  к которому составляет угол  $\Psi$  с направлением наблюдения;  $U(N, L)$  – величина видеосигнала приемника излучения;  $N$  – номер строки элемента изображения;  $L$  – номер элемента в строке тепловизионного кадра.

Величина видеосигнала  $U(N, L)$  определяется по следующей формуле:

$$U(N, L) = \frac{1}{\pi} \cdot \omega \cdot ds \cdot \cos \Psi \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\lambda} \cdot \tau_a(\lambda) \cdot \tau_o(\lambda) \cdot W(\lambda, T, x, y) d\lambda, \quad (4.1)$$

$$W(\lambda, T, x, y) = \frac{1}{S} \cdot \iint_{(x,y)} W(\lambda, T, x, y) \cdot H(x - x, y - y) dx dy, \quad (4.2)$$

где

$$W(\lambda, T, x, y) = \epsilon(\lambda, T, x, y) \cdot W^0(\lambda, T) \cdot \epsilon(\Psi), \quad (4.3)$$

$$W^0(\lambda, T) = C_1 \cdot \lambda^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (4.4)$$

В формулах (4.1) - (4.3) функция рассеяния точки (ФРТ) оптической системы тепловизора –  $H(x - x, y - y)$ ; наблюдаемая поверхность объекта –  $S$ ; коэффициент излучения объекта –  $\epsilon$ ; светимость АЧТ –  $W^0$ .

На основании соотношений (4.1) - (4.3) можно выразить зависимость величины видеосигнала  $u_{\lambda}$  в тепловизорах от абсолютной температуры  $T$  и коэффициента излучения:

$$u_{\lambda} = K_{\lambda} \cdot \epsilon_{\lambda} \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1}, \quad (4.5)$$

где  $K_{\lambda}$  – коэффициент пропорциональности.

На основании соотношения (4.5) можно записать систему уравнений для выходных сигналов, которые имеют место в яркостных пирометрах и спектральных тепловизорах. Эта система уравнений формирует одну из



проблем оптической пирометрии, заключающейся в том, что невозможно измерить истинную температуру поверхности реальных объектов без априорной информации о коэффициенте излучения  $\varepsilon_\lambda$  их поверхности:

$$\begin{cases} U_{\lambda_1} = K_\lambda \varepsilon_{\lambda_1} C_1 \lambda_1^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda_1 T} - 1} \\ U_{\lambda_2} = K_\lambda \varepsilon_{\lambda_2} C_1 \lambda_2^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda_2 T} - 1} \\ U_{\lambda_n} = K_\lambda \varepsilon_{\lambda_n} C_1 \lambda_n^{-5} \frac{1}{e^{c_2/\lambda_n T} - 1} \end{cases} . \quad (4.6)$$

Применительно к радиационным пирометрам проблема дистанционного измерения температуры записывается в виде:

$$u = \varepsilon \sigma T^4 \frac{K}{\pi} . \quad (4.7)$$

Если (4.1) записать в виде (4.12)

$$U(N, L) = K(\varepsilon, T) \cdot ds \cdot \cos \Psi , \quad (4.8)$$

то, так как справедливо равенство  $ds \cdot \cos \Psi = const$ , имеем формулировку второй проблемы тепловидения

$$U(N, L) = K(\varepsilon, T) , \quad (4.9)$$

которая заключается в невозможности определения формы поверхности внутри их контура методами классического тепловидения.

#### 4.6.2 Расчёты коэффициента эффективности в зависимости от количества элементов приемников

Для оценки разных тепловизоров можно рассчитать коэффициент эффективности от количества элементов приёмников на материалах  $GeHg$ ,  $CdHgTe$ ,  $PbSe$ , матричных  $QWIP$  и матричных микроболометров.

В каждом классе приёмников существуют многочисленные группы, различающиеся типом материала, конфигурацией и общим числом элементов, рабочей температурой и т.д. Описанию типов приёмников посвящено значительное число работ [27, 28], сложилась общепринятая физически корректная система описания свойств и характеристик чувствительных элементов приёмников. Вместе с тем, в классификации собственно ИК приборов, особенно тепловизионных, такая устойчивая система до настоящего времени отсутствует. На основе статьи [28] Д.И. Тодоровым была разработана программа расчета для проведения анализа материалов ИК приемников, наиболее предпочтительных для решения задач технического задания.

Тогда, пользуясь формулами из статьи И.М. Фроимсона [28], можно найти коэффициент эффективности приемника излучения:

$$\Phi = \frac{\frac{\pi \cdot \Delta_h}{\Psi \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta_h}{\Psi}\right)} \cdot \sqrt{S}}{NETD \cdot \sqrt{\Delta_h \cdot \Delta_v} \cdot \sqrt{\tau_{\text{кадра}}}}, \quad (4.10)$$

где  $\Delta_h \cdot \Delta_v$  – мгновенные поля зрения по вертикали и горизонтали (рад.),  $NETD$  – эквивалентная шуму разность температур ( $K$ ),  $\tau_{\text{кадра}}$  – время формирования кадра (сек.),  $\sqrt{S}$  – телесный угол тепловизора визуализации теплового поля, рад<sup>-1</sup>,  $\Psi$  – пространственный период теплового поля, рад<sup>-1</sup>.

Допустим необходимо создать ТпВ со следующими параметрами: мгновенные поля зрения по вертикали и горизонтали  $\Delta_h = \Delta_v = 1 \cdot 10^{-4}$  рад;  $NETD = 0,1 K$ ; минимальный наблюдаемый пространственный период  $2 \cdot 10^{-4}$  рад; угловое поле зрения  $\omega = 3 \times 3 \text{ угл.град}^2$ ; угловая скорость панорамирования (ведётся только по горизонтали)  $\beta = 0.1 \text{ рад} / \text{с}$ ; время формирования кадра  $\tau_{\text{кадра}} = 30 \cdot 10^{-3}$  с;  $\left(\frac{D}{f}\right)^2 \cdot \mu_{\text{отт}} \approx 1$ ; рабочая область спектра – в окне прозрачности атмосферы 7–15 мкм. Тогда получим коэффициент эффективности приёмника:

$$\Phi = \frac{\pi \cdot \Delta_h}{\Psi \sin\left(\frac{\pi \cdot \Delta_h}{\Psi}\right)} \cdot \sqrt{S} / \left( NETD \cdot \sqrt{\Delta_h \cdot \Delta_v} \cdot \sqrt{\tau_{\text{кадра}}} \right) \approx 47485, K^{-1} \cdot c^{-1/2}.$$

Зная параметры приёмника, можно рассчитать число элементов его матрицы, необходимое для получения заданных параметров:

$$\sqrt{m \cdot n} = \Phi \cdot \frac{4 \cdot \sqrt{1 + \tau_i^2 \cdot \left(\frac{2\pi\beta}{\Psi}\right)^2}}{A \cdot \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \frac{d}{dT} \left( \frac{dR(\lambda, T)}{d\lambda} \right) \cdot D^*(\lambda) d\lambda}. \quad (4.11)$$

Если взять в качестве ПОИ взять матрицу из  $GeHg$  с размером элемента  $\sqrt{A} = 0,004$  см, постоянной времени  $\tau_i = 20 \cdot 10^{-6}$  с и диапазоном  $\lambda = 7 \div 15$  мкм при температуре наблюдаемых объектов  $300 K$ , то получим, что необходимое число пикселей равно  $18 \times 18$ . Для матричного QWIP с такой же площадью элемента,  $\tau_i = 10 \cdot 10^{-6}$  с и  $\lambda = 7 \div 11$  мкм понадобится  $61 \times 61$  пикселей. Для КРТ приёмников ( $\tau_i = 100 \cdot 10^{-6}$  с), в зависимости от размера чувствительного элемента, понадобится  $15 \times 15$  ( $\sqrt{S} = 0,004$ ,  $\lambda = 5 \div 15$  мкм), или  $18 \times 18$  ( $\sqrt{S} = 0,0035$ ,  $\lambda = 8 \div 10$  мкм), или  $21 \times 21$  ( $\sqrt{S} = 0,003$ ,  $\lambda = 8 \div 10$  мкм) пикселей. Обнаружительная способности приёмников на  $GeHg$ , QWIP и КРТ взяты из графиков на рисунках 4.37 и 4.40.

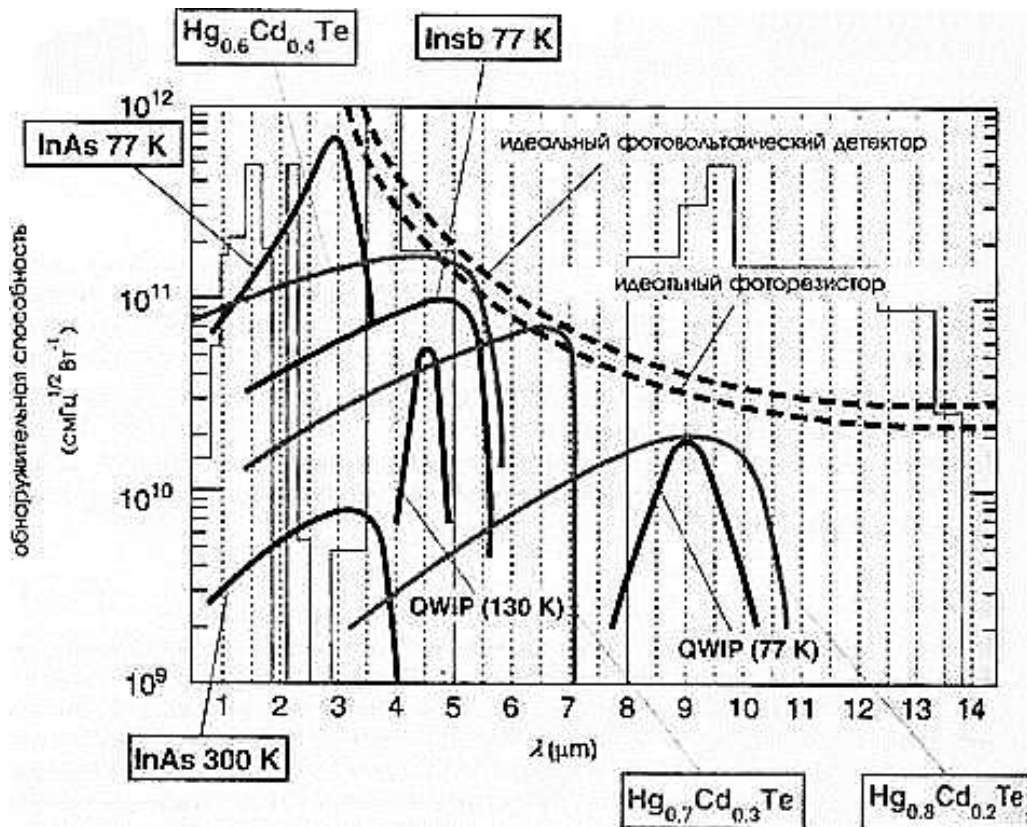


Рисунок 4.40 – Обнаружительные способности приёмников на GeHg, QWIP и КРТ

Графики зависимости количества пикселей от пространственной частоты при  $\Delta_h = \Delta_v = \frac{1}{2} \Psi = \frac{1}{2\theta}$  (в обратных радианах) с добавлением данных для приёмников из PbSe и микроболометрических приёмников, взятых из статьи И.М. Фроимсона [28], приведены на рисунке 4.41 (графики разбиты на три пары, в каждой сравниваются все указанные типы приёмников с одним из КРТ при малых частотах и все, кроме болометра – при больших частотах).

Графики зависимости количества пикселей от пространственной частоты для приёмника на основе твёрдого раствора кадмий-ртуть-теллур (КРТ) с площадью в 0,004 см<sup>2</sup> приведено на рисунке 4.41.

Таким образом, на разных промежутках пространственных частот наиболее экономичными в смысле числа элементов оказываются разные типы приёмников.

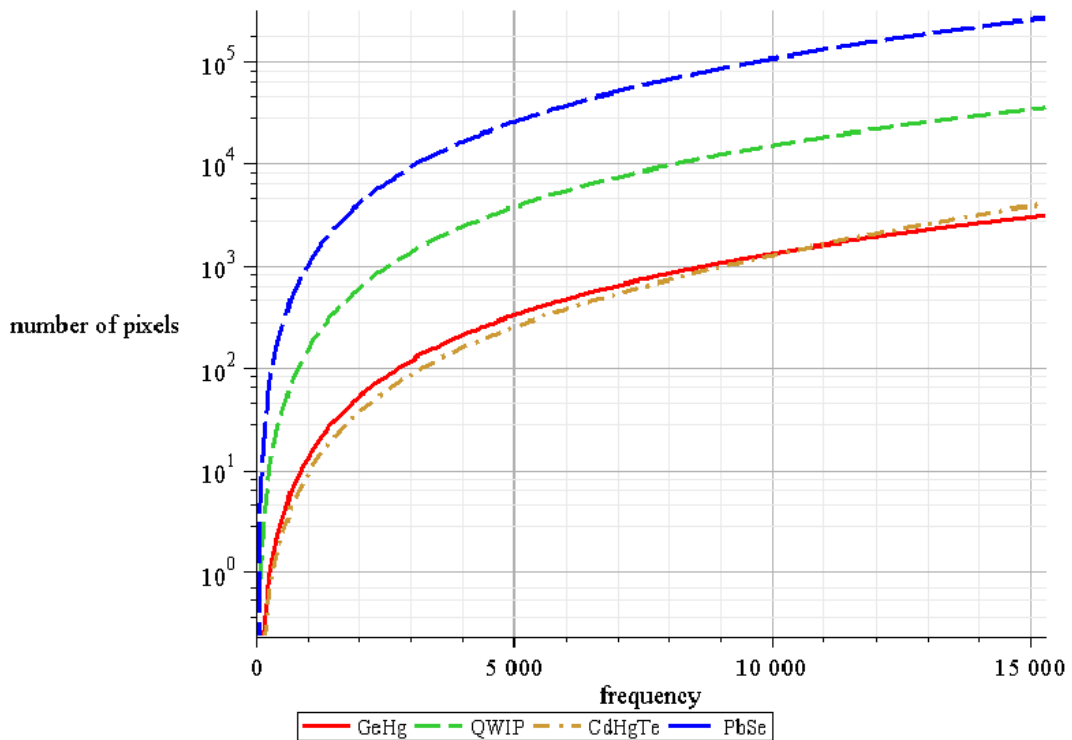


Рисунок 4.41 – Графики зависимости количества необходимых пикселей от пространственной частоты

Графики зависимости коэффициента эффективности от количества элементов для приёмника КРТ с площадью в  $0,004 \text{ см}^2$  приведено на рисунке 4.42.

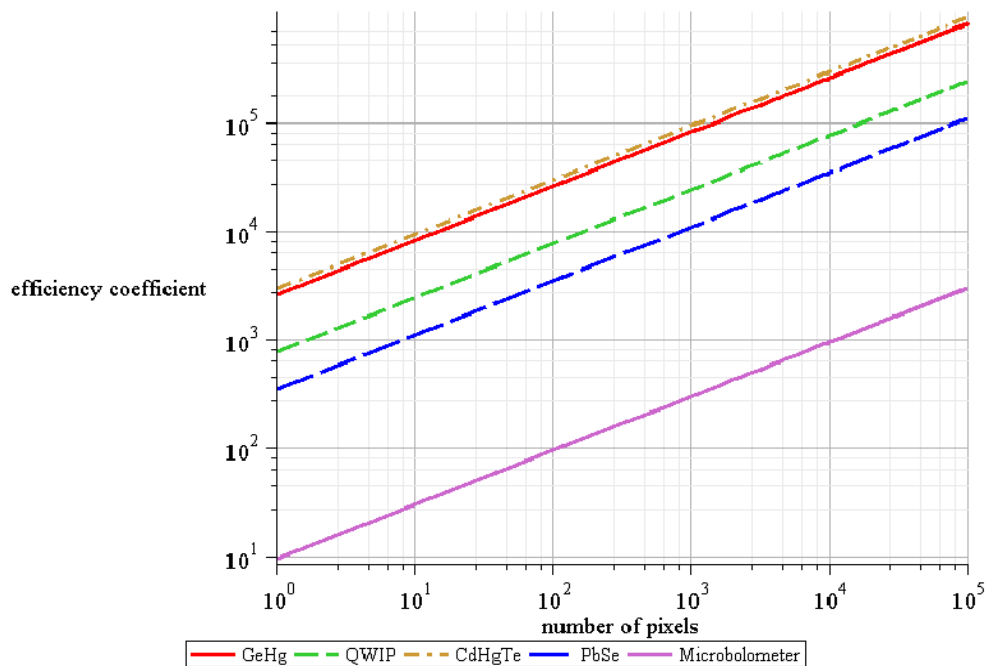


Рисунок 4.42 – Графики зависимости коэффициента эффективности от количества элементов

Подход к классификации приёмников излучения и ТпВ на их основе, предложенный автором статьи [28], является более объективным и практически полезным для выбора материалов приёмников ИК излучения, поскольку отражает реальные физические ограничения, присущие тому или иному типу приёмных устройств, а также позволяет оценить экономическую сторону решения технической задачи по созданию ТпВ требуемого уровня эффективности.

Анализируя полученные результаты расчёта, можно прийти к следующим выводам: среди охлаждаемых ИК приёмников излучения наиболее предпочтительными оказываются приёмники на основе *GeHg* и КРТ (*CdHgTe*). Однако для приёмников из *GeHg* требуется охлаждение до 27 К, в то время как приёмники на КРТ требуют охлаждения до 77 К.

#### 4.6.3 Расчёт чувствительности канала тепловизора

Расчет чувствительности тепловизионного канала выполняется по преобразованной формуле из монографии Мирошникова [21]:

$$\Delta T = \frac{\rho \Phi_{n.e.1} \sqrt{A_{np} \Delta f_{ш}}}{4,62510^{-12} T^3 d_{эф} \delta^2 \ln \Delta \lambda_{эф} \sqrt{n}}, \quad (4.12)$$

где  $\rho$  - отношение сигнал/шум;  $\Phi_{п.е.\lambda} = 1/D^*_{\lambda}$  - спектральный порог чувствительности приёмника излучения, Вт·см<sup>-1</sup>·Гц<sup>-1/2</sup>;  $D^*_{\lambda}$  - удельная обнаружительная способность приёмника излучения в максимуме его спектральной характеристики, определённая на электрической частоте, при которой спектр напряжения шума приведён к единице, см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>;  $A_{np}$  - площадь приемника излучения, у которого размеры по горизонтали и вертикали равны, см<sup>2</sup>;  $\Delta f_{ш}$  - эквивалентная шумовая полоса усилительного тракта, Гц;  $T$  - температура фона, К;  $d_{эф}$  - эффективный диаметр входного зрачка оптической системы, см;  $\delta$  - мгновенный угол поля зрения ТпВ, рад;  $n$  - количество приёмников, работающих в режиме задержки и накопления (ВЗН);  $\lambda_{эф}$  - эффективная относительная спектральная полоса пропускания приёмников;

$$\Delta \ln \lambda_{эф} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \phi(\lambda) S_{отн}(\lambda) \tau_{атм}(\lambda) \tau_{об}(\lambda) d\lambda / \lambda, \quad (4.13)$$

$\phi(\lambda)$  - относительная спектральная характеристика потока излучения объекта (например, водной поверхности);  $S_{отн}(\lambda)$  - относительная спектральная характеристика чувствительности приёмника излучения;

Для измерения  $\Delta T$  в лабораторных условиях используется четырехштриховая мира, образующая квадрат. Отношение длины штриха к его ширине (формат) - 7:1. Вводится также некоторый показатель  $\kappa_{сл}$  - уровень сложности решаемой задачи.

Если цель отлична по формату от мира (7:1), то для коррекции по формату вводится множитель  $\sqrt{\varepsilon/7}$ , где  $\varepsilon$  – отношение длины к ширине отдельно разрешаемых штрихов эквивалентной миры, которая замещает цель в пределах прямоугольного контура. Для решения задачи обнаружения показатель  $k_{сл}$  принимается равным 1, при опознавании  $k_{сл}=4$ .

Разность температур  $\Delta T$  между целью и фоном (кажущаяся разность температур) будет меньше из-за ослабления излучения в атмосфере  $\Delta T \cdot \tau_{атм}$ .

Регистрируемая ТпВ разность температур может быть аппроксимирована в виде  $\delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-\beta_{сист} k_{сл}}$ , где  $\beta_{сист}$  – коэффициент приборного ослабления;  $\nu$  – пространственная частота, период/мрад;  $\delta T_0$  – точка пересечения кривой спада облучения с осью  $y$  (характеризует чувствительность прибора в целом). При отношении сигнал/шум = 1 (50% вероятность решения задачи) дальность действия системы:

$$R = \frac{\ln \frac{\Delta T \sqrt{\varepsilon/7}}{\delta T_0}}{\beta_{атм} + \frac{k_{сл}}{S} \beta_{сист}}, \quad (4.14)$$

где  $S$  – размер цели, м;  $\beta_{атм}$  – коэффициент ослабления атмосферой;  $\nu = \frac{k_{сл}}{S} R$ .

Таким образом, для расчёта дальности действия используются следующие характеристики: характеристики ТпВ; показатель уровня сложности задачи с числом пар линий, укладываемых на минимальный размер объекта; параметры целей и атмосферные условия.

Уточнённая дальность действия с учётом вероятности обнаружения:

$$R_s = \frac{\ln \left[ \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta T \sqrt{\varepsilon/7}}{\delta T} \right]}{\beta_{атм} + \frac{k_{сл}}{S} \beta_{сист}}. \quad (4.15)$$

В соответствии с приведёнными соотношениями построена функция обнаружения ТпВ для нахождения дальности по тепловому контрасту квадратных объектов.

Результаты расчёта для МДВ = 20 км,  $\mu = 1$ ,  $\rho = 3,2$ ,  $A_1 = 0,1 \text{ м}^2$ ,  $A_2 = 1 \text{ м}^2$ ,  $A_3 = 10 \text{ м}^2$ ,  $A_4 = 100 \text{ м}^2$  приведены на рис. 4.43.

Как видно из приведённых графиков, возможность обнаружения объектов на дистанции, равной МДВ, по ИК каналу ТпВ для целей с

различными площадями достигается при различных превышениях температуры объектов  $\Delta T$  над окружающим фоном.

Так, при МДВ = 20 км:

- для целей  $A_4$  с площадью  $100 \text{ м}^2 \Delta T=1,78 \text{ К}$ ;
- для целей  $A_3$  с площадью  $10 \text{ м}^2 \Delta T=17,8 \text{ К}$ ;
- для целей  $A_2$  с площадью  $1 \text{ м}^2 \Delta T=178 \text{ К}$ .

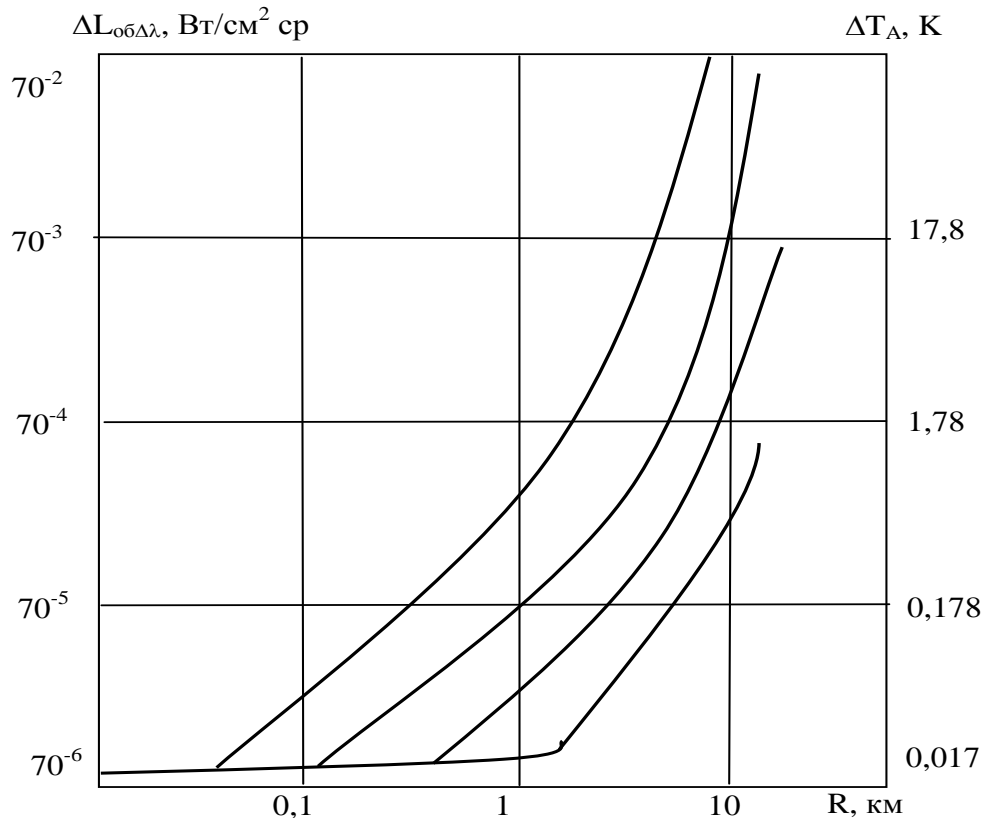


Рисунок 4.43 – Функция обнаружения ТпВ для нахождения дальности по тепловому контрасту квадратных объектов

#### Выбор полосы пропускания частот тракта тепловизора

При решении задачи выделения одиночного импульса (прямоугольного) на фоне белого шума можно осуществлять с помощью RC-фильтра или оптимального фильтра. Для системы, создающей изображение, желательно обеспечить быстрое нарастание сигнала. На основании результатов, приведенных в работе [21] можно задаться значением частоты среза  $f_c = 1/2\tau_{ex}$ , получим  $\tau = RC = 1/2f_c = \tau_{ex}/\pi$ , то есть на время действия импульса сигнал на выходе нарастает до значения установившегося сигнала:

$$U(\tau_{ex}) = (1 - e^{-\tau_{ex}/\tau}) \cdot U_0 = (1 - e^{-\pi}) \cdot U_0 = 0.96 \cdot U_0, \quad (4.16)$$

Шумовая полоса такого фильтра:

$$\Delta f_{ш} = \int_0^{\infty} K^2(f) df = \int_0^{\infty} \frac{df}{[1 + (2\pi\tau f)^2]} = 1/4\tau, \quad (4.17)$$

Так как частота среза  $f_c$  равна

$$f_c = \frac{1}{2\pi\tau} \rightarrow \tau = \frac{1}{2\pi f_c} \quad \text{и} \quad f_{ш} = \frac{1}{4} 2\pi f_c = \frac{\pi}{2} f_c,$$

то с учётом (4.16) имеем:

$$\Delta f_{ш} = \frac{\pi}{2} [1/2\tau_{вх}] = 1,57 \Delta f_{ш}^{опт}, \quad (4.18)$$

Выражение (4.17) показывает, что  $\Delta T_{нор}$  у тепловизора с РС фильтром с частотой среза  $f_c = 1/(2\tau_{вх})$  будет больше в 1,57 раз, чем у тепловизора с оптимальным фильтром.

#### 4.7 Методика расчета параметров тепловизоров и авиационной аппаратуры строчного типа

В источнике [47] приведена методика расчёта тепловизора.

Одним из основных критериев работы ТпВ и авиационной аппаратуры строчного типа (АТА) является вероятность обнаружения или распознавания, которая выражается следующей эмпирической формулой [47]:

$$P = 1 - \exp\left(-0.7(N/N_0 C)^2\right), \quad N = h/A \quad \text{или} \\ N = 1.2CN_0 \sqrt{-\ln(1-P)} \quad (4.19)$$

где  $h$  – минимальный габаритный (критический) размер объекта, м;  $A$  – разрешение на местности – полупериод разрешаемой эквивалентной тепловой миры, м;  $C$  – критерий Джонсона [2].

$$C = \begin{cases} 1 - \text{при обнаружение объекта,} \\ 1,4 - \text{при определение формы или ориентации объекта} \\ 4 - \text{при классификации (определении класса),} \\ 6,4 - \text{при идентификации (определении типа);} \end{cases} \quad (4.20)$$

$N_0$  – коэффициент, учитывающий степень тепловой неоднородности фона:

$$N_0 = \begin{cases} 1 - \text{слабая (снежное поле, море),} \\ 2 - \text{средняя (лес, луг, пашня),} \\ 4 - \text{сильная (пустыня, горы).} \end{cases} \quad (4.21)$$

При определении формы, классификации и идентификации объекта следует принимать  $N_0 = 2$  независимо от степени неоднородности фона.

Приведенные значения  $C$  отвечают наблюдателю средней квалификации; для наблюдения с низкой квалификацией их необходимо умножить на 1,5, с высокой - разделить на 1,5.



Величина в (4.20) находится из температурно-частотной характеристики (ТЧХ) ТпВ и АТА, которая в относительных единицах записывается в виде [2, 47]:

$$\frac{|\Delta T_R| \tau_a r \sqrt{lN/7h}}{\Delta T_0} = \frac{2.4\alpha(x)x}{K_{\Sigma}(x)} = E(x); x = \nu\delta, \frac{E(x)}{x} = E^*(x) \quad (4.22)$$

$$K(x) = \exp(-2\pi^2\rho^2x^2);$$

$$\alpha(x) = 1/(1+22x^2)^{1/4}; \delta = \begin{cases} \sqrt{T_e F} & \text{для ТпВ} \\ 1 & \text{для АТА} \end{cases}.$$

где  $x$  – относительная частота этой миры,  $\nu$  – угловая частота разрешаемой эквивалентной тепловой миры,  $\Delta T_R$  – разность радиационных температур объекта и фона,  $K$ ;  $\tau_a$  – коэффициент пропускания атмосферы на дистанции в спектральном диапазоне  $\Delta\lambda$ ;  $\delta$  – элементарное поле зрения ТВП и АТА, рад;  $l$  – длина объекта, м;  $F$  – частота кадров, Гц;  $T_e$  – постоянная времени глаза (0,2 с);  $K_{\Sigma}(x)$  – результирующая функция передачи модуляции (ФПМ) ТпВ или АТА;  $\rho$  – параметр гауссовской функции, аппроксимирующей ФПМ.  $\Delta T_0$  – разность температур, эквивалентная шуму (порог чувствительности), К;  $\alpha(x)$  – поправочная функция, учитывающая характер шума в полосе пропускания зрительного анализатора и его согласование с изображением объекта [47].

Для рационально разработанной аппаратуры  $\rho = 0,55$  [2], при этом функция  $E(x)$  принимает вид, изображенный на рис. 4.44.

Для расчета пропускания атмосферы на наклонной трассе в диапазоне спектра  $\Delta\lambda_1 = 3-5$  или  $\Delta\lambda_2 = 8-14$  мкм можно воспользоваться формулами [4]:

$$\begin{aligned} \tau_a &= \exp(-\beta D), \\ \beta &= \frac{1}{D} \int_0^H \beta(h) dh / \cos(\gamma), \\ \beta(h) &= \beta_p(h) + \beta_{\Pi}(h), \\ \beta_p(h) &= \beta_{p0} \exp(-h/1200), \\ \beta_{\Pi}(h) &= \beta_{\Pi 0} \exp(-h/2500), \end{aligned} \quad (4.23)$$

где  $\beta_p(h)$ ,  $\beta_{\Pi}(h)$  – вертикальные профили показателей аэрозольного рассеяния и поглощения на водяном паре соответственно,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\gamma = \arccos(H/D)$  – угол визирования объекта, отсчитываемый от надира;  $H$  – высота расположения ТпВ, м.

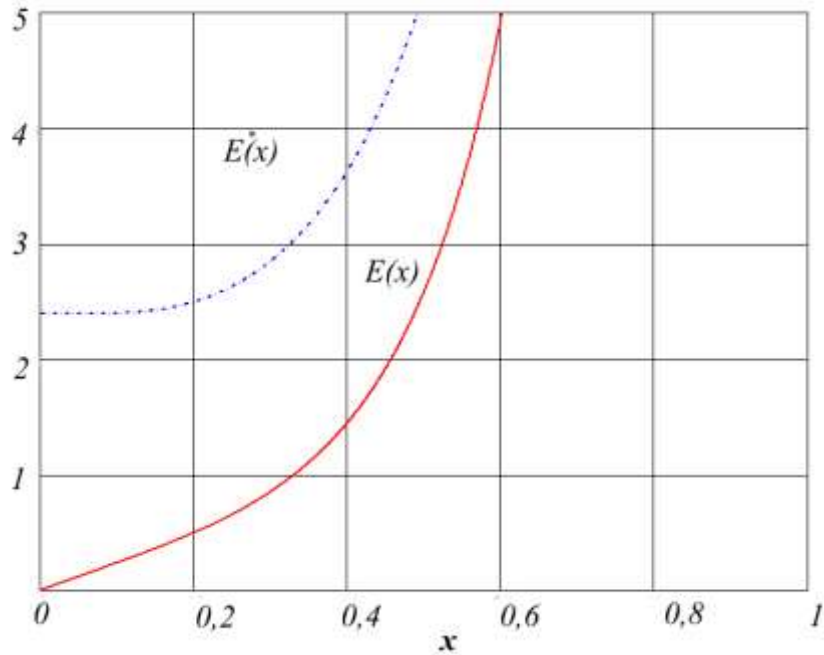


Рисунок 4.44 – График зависимостей  $E(x)$  и  $E^*(x)$

После преобразования можно получить выражение для эффективного показателя ослабления излучения  $\beta$ :

$$\beta = \beta_{p0} K_p + \beta_{n0} K_n ,$$

$$K_p = 1200 [1 - \exp(-H / 1200)] / H ,$$

$$K_n = 2500 [1 - \exp(-H / 2500)] / H$$

Очевидно, для горизонтальной трассы ( $\gamma=90^\circ$ )  $H=0$ ,  $K_p=K_n=1$ . Значения показателей рассеяния и поглощения на высоте  $H=0$  можно оценить по формулам [49]:

$$\beta_{p0} = \begin{cases} 10^{-3} (2,3 - 0,49 \ln S_m) / S_m & \text{для } \Delta\lambda_1 \\ 10^{-3} (1,7 - 0,35 \ln S_m) / S_m & \text{для } \Delta\lambda_2 \end{cases} \quad (4.24)$$

$$\beta_{n0} = \begin{cases} 10^{-3} (0,15 \ln(w / 217) + 1,2) / S_m & \text{для } \Delta\lambda_1 \\ 10^{-3} (0,05 + 0,015w) & \text{для } \Delta\lambda_2 \end{cases} , \quad (4.25)$$

где  $S_m$  – метеорологическая дальность видимости МДВ, км;  $w$  – абсолютная влажность воздуха, г/м<sup>3</sup>.

В свою очередь  $w = w_0 f / 100$ , где  $w_0$  – значение  $w$  в состоянии насыщения;  $f$  – относительная влажность воздуха, %.

Зависимость  $w_0 = f(t_b)$  от температуры воздуха можно посмотреть в таблице 3.1.

Значение  $\Delta T_R$  в (4.22) рассчитывается по приближённой формуле [47]:

$$\Delta T_R = \varepsilon \Delta T + \eta (\varepsilon_{o\delta} - \varepsilon) \quad (4.26)$$

где  $\varepsilon_{об}$ ,  $\varepsilon$  – коэффициенты излучения объекта и фона в  $\Delta\lambda$  соответственно;  $\Delta T$  – разность температур объектов и фона,  $K$ ;  $\eta$  – параметр, зависящий от степени облачности, ориентации и место положения объекта,  $K$ .

Значения параметра  $\eta$  при типовых метеоусловиях, характерном местоположении объекта и двух видах ориентации его поверхности, обращенной к ТпВ или АТА (вертикальная и горизонтальная), для диапазона 8÷14 мкм приведены в табл. 4.6 [47].

Таблица 4.6 – Значения  $\eta$  параметра, зависящий от степени облачности, ориентации и место положения объекта

Местоположение объекта	Параметр $\eta$ , К							
	безоблачно		легкая облачность		средняя облачность		сплошная облачность	
	Гориз.	Верт.	Гориз.	Верт.	Гориз.	Верт.	Гориз.	Верт.
Открытая	42	17	25	9	15	4	5	2
Лесная	18	4	15	4	10	3	4	2
Среди деревьев	7	2	5	2	4	2	3	1.5

Для диапазона 3÷5 мкм значения  $\eta$  раза в четыре меньше, чем указано в табл. 4.6.

Величина  $\Delta T_0$  в (4.22) связана с другими параметрами ТпВ и АТА следующей формулой [2]:

$$\Delta T_0 = \frac{400a\sqrt{\Delta f_{uu}}}{K_u \delta^2 \tau_0 D_0^2 D_m^* \left( \frac{\partial M_0}{\partial T} \right) (1 - K_s^2)}, \quad (4.27)$$

$$\Delta f_{uu} = \pi / 4\tau, \quad K_s = D_s / D_0$$

$$\tau = \begin{cases} \frac{R\delta^2}{2\beta_c} \frac{\eta_c \eta_k}{2\beta_c 2\beta_k F} & \text{для ТпВ} \\ \frac{R\delta^2}{2\beta_x \Gamma} & \text{для АТА} \end{cases},$$

где  $a$  – сторона чувствительного элемента фотоприемника, м;  $R$  – число элементов;  $D_m^*$  – удельная обнаружительная способность фотоприемника, см·Гц<sup>1/2</sup>/Вт;  $D_0$  – диаметр объектива, м;  $\tau$  – время считывания, с;  $\eta_c \eta_k$  – коэффициенты использования развертки (КПД сканирования) по строке и кадру;  $F$  – частота кадров ТпВ, Гц;  $D_s$  – диаметр центрального экрана зеркальной объектива, м.;  $\frac{\partial M_0}{\partial T}$  – производная от энергетической светимости

черного тела по температуре, Вт/(м<sup>2</sup> К);  $H$  – высота полёта носителя АТА, м;  $\Gamma$  – скорость носителя, м/с.

Величина  $\frac{\partial M_0}{\partial T}$  рассчитывается по формуле [49]:

$$\frac{\partial M_0}{\partial T} = (c_2 / T^2) \left[ \int_{\Delta\lambda} M_0(\lambda) d\lambda / \lambda \right], \quad (4.28)$$

где  $M_0(\lambda)$  – спектральная плотность энергетической светимости черного тела при температуре  $T$ , Вт/(м<sup>2</sup>мкм).

Можно преобразовать производную от энергетической светимости черного тела по температуре через единую изотермическую кривую (см. рис. 4.45):

$$\frac{\partial M_0}{\partial T} = 1,85 \cdot 10^{-7} T^3 \left[ \int_{\Delta\lambda} y(\lambda / \lambda_m) d\lambda / \lambda \right], \quad (4.29)$$

Таблица 4.7 – Значения  $\partial M_0 / \partial T$  для ряда температур  $T$

$\Delta\lambda$ , мкм	Параметр $\partial M_0 / \partial T$			
	$T=280$ К	$T=290$ К	$T=300$ К	$T=310$ К
3 – 5	0,11	0,154	0,21	0,28
8 – 14	2,15	2,38	2,62	2,86

Значения  $\partial M_0 / \partial T$  для ряда температур  $T$  приведены в таблице 4.7.

Расчёт коэффициента использования излучения можно рассчитать по методике изложенной в [50], коэффициент пропускания оптики изложено в других источниках.

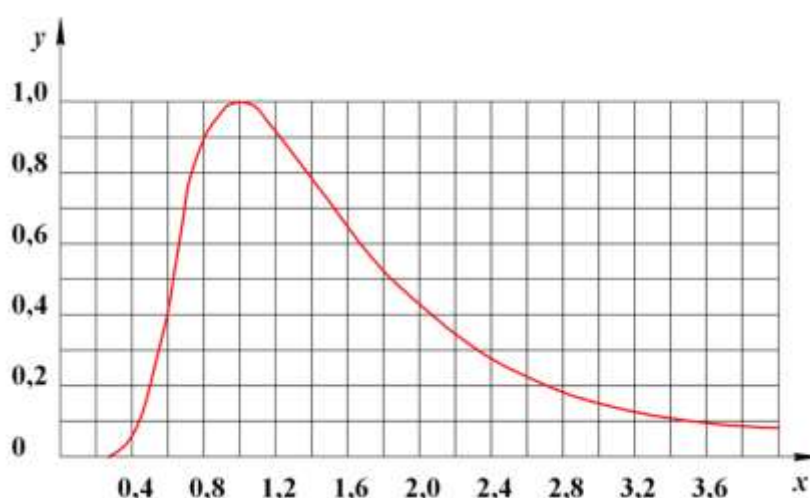


Рисунок 4.45 – Единая изотермическая кривая

Основная цель расчета ТпВ и АТА является получение основных технических параметров, обеспечивающий заданную вероятность

обнаружения или распознавания объекта, удовлетворяющий определенным техническим ограничениям.

Первоочередной задачей является выбор значений  $\Delta T_0$ ,  $\delta$  аппаратуры. Для ТпВ и АТА существует следующее обменное соотношение между этими параметрами, вытекающее из формулы (4.27):

$$\Delta T_0 \delta^3 = Q / D_0^2 = Q^* , \quad (4.30)$$

$$Q = \begin{cases} \frac{200a \sqrt{\pi F 2\beta_c \beta_k / R\eta_c \eta_k}}{K_u D_m^* \tau_0 (\partial M_0 / \partial T)(1 - K_g^2)} & \text{для ТпВ} \\ \frac{200a \sqrt{\pi 2\beta_c V / R\eta_c H}}{K_u D_m^* \tau_0 (\partial M_0 / \partial T)(1 - K_g^2)} & \text{для АТА} \end{cases} .$$

Если параметры, входящие в  $Q$ , заданы или выбраны, то  $Q = \text{const}$  и добиться минимального значения  $D_0$  (а значит, и минимального веса ТпВ или АТА) можно лишь подбором таких значений  $\Delta T_0$ ,  $\delta$ , чтобы  $Q^* = \text{max}$  при условии обеспечения требуемой вероятности  $P$ .

Выражая из (4.22)  $\Delta T_0$ ,  $\delta$  и подставляя их в инвариант (4.30), получаем:

$$Q^* = Bx^3 / E(x), \quad (4.31)$$

где  $B$  – множитель не зависящий от  $x$ .

Максимизируя  $Q^*$  в (4.31), находим значение  $x_0 = 0,5$ , для которого  $Q^* = \text{max}$  (и, следовательно,  $D_0 = \text{min}$ ). Тогда из (4.22) имеем выражения для:

$$\Delta T_0 = \frac{|\Delta T_R| \tau_a r \sqrt{IN / 7h}}{E(x)}, \quad (4.32)$$

$$\delta = \frac{2hx}{ND}, \quad x = x_0,$$

а из (4.30) – для искомого диаметра объектива  $D_0$ :

$$D_0 = \sqrt{Q / \Delta T_0 \delta^3}, \quad (4.33)$$

Найденное значение  $\delta$  определяет фокусное расстояние объектива:

$$f = a / \delta, \quad (4.34)$$

Следует отметить, что для успешной коррекции объектива обычно бывает необходимо соблюдение следующего ограничения:

$$D_0 / f \leq \chi; \chi = \begin{cases} 0,8 - 1,2 & \text{для } 3 - 5 \text{ мкм} \\ 0,6 - 1 & \text{для } 8 - 14 \text{ мкм} \end{cases}, \quad (4.35)$$

Другое ограничение принципиально связано с существованием дифракционного кружка рассеяния объектива:

$$\delta \geq 2,44 \cdot 10^{-6} \lambda / D_0 \alpha, \quad (4.36)$$

где  $\lambda$  – средняя длина волны в  $\Delta\lambda$ ,  $\alpha = 1,2 - 1,25$ .

Наконец, нередко имеют место ограничения на габариты аппаратуры, в частности, на величину  $f$  и число строк в кадре ВКУ  $n_k$ :

$$f \leq f_m, \quad n_k \leq n_m, \quad (4.37)$$

где  $f_m$  и  $n_m$  – максимальные допустимые значения фокусного расстояния, м., и числа строк развертки ВКУ соответственно.

Из (4.34) – (4.37) вытекает существование следующих соотношений:

$$B_1 \leq D_0 \delta \leq B_2; \quad \delta \geq \delta_m; \quad \frac{2\beta_k}{\delta} \leq n_m, \quad (4.38)$$

$$B_1 = 2,44 \cdot 10^{-6} \lambda / \alpha; \quad B_2 \geq \alpha \chi; \quad \delta_m \leq a / f_m$$

Тогда из (4.30) следует, что поскольку  $\delta = 2hx / ND$

$$\frac{QND}{2B_2^2 hx} \leq \Delta T_0 \leq \frac{QND}{2B_1^2 hx}, \quad (4.39)$$

Отсюда с учетом (4.22) находим соответствующие ограничения для  $x$ :

$$x_1 \leq x \leq x_2; \quad x \geq x_m; \quad x_m = \max(x_3; x_4), \quad (4.40)$$

$$x_i = E^{*-1} \left( |\Delta T_r| \tau_a r \sqrt{IN} / 7h 2B_i^2 h / QND \right); \quad i = 1, 2$$

$$x_3 = 2\beta_k ND / 2hn_m,$$

$$x_4 = ND\delta_m / 2h = ND_a / 2hf_m,$$

$$E^*(x) = E(x) / x.$$

Зависимость  $E^*(x)$  приведена на рисунке 4.44.

Таким образом, для минимизации диаметра  $D_0$  необходимо выбрать значение максимально близкое к  $x_0 = 0,5$  и удовлетворяющее ограничениям (4.40), и вычислить далее по (4.32) – (4.34) оптимальные значения параметров  $\Delta T_0, \delta, D_0, f$ . Если полученное значение окажется слишком большим, то следует выбрать другой фото приемник, обеспечивающий меньшее значение  $Q$  в (4.30).

Расчет коэффициентов использования развертки  $\eta_c, \eta_k$  по строке и кадру зависит от конкретной оптической схемы. Обычно можно считать  $\eta_c, \eta_k = 0,6 - 0,9$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. – 2-е изд., доп. – М.: Издательский дом «Спектр», 2013. – 544с.: ил. И цв. Вкл. 24 с.
2. Ллойд, Дж. Системы тепловидения. – М. : «Мир», 1978.
3. Джемисон Дж. Э. и др., Физика и техника инфракрасного излучения, «Советское радио», 1965
4. Хадсон Р., Инфракрасные системы, «Мир», 1972
5. Криксунов, Л. З.; Усольцев, И. Ф., Инфракрасные системы: «Советское радио», 1968.
6. Мешков В. В. Основы светотехники: Учеб. пособие для вузов. Ч. 1.— 2-е изд., перераб.— М.: Энергия, 1979.— 368 е., ил.
7. Равновесное тепловое излучение. Формула Планка. Использование пакета «MathCAD» : метод. пособие по выполнению лаб. работы по дисц. «Физика» / В. В. Аксенов [и др.]. – Минск : БГУИР, 2011. – 19 с. ISBN 978-985-488-737-1.
8. Skolnik, M. I., Introduction to Radar Systems, 2nd edition, McGraw-Hill Inc. 1980
9. Gerhard Kramm, Nicole Moëlders. Planck's blackbody radiation law : presentation in different domains and determination of the related dimensional constants. Journal of the Calcutta Mathematical Society (in press) arXiv:0901.1863v2 [physics.hist-ph] 12 Nov 2009
10. Sa'ar, Amir; Shappir, Joseph. Voltage tunable integrated infrared imager. – USP 20070063219. – March 22, 2007.
11. ГОСТ Р МЭК 60870-2-2-2001 Устройства и системы телемеханики. Часть 2. Условия эксплуатации. Раздел 2. Условия окружающей среды (климатические, механические и другие неэлектрические влияния)
12. Ишанин Г. Г. Распространение лучистой энергии. Конспект лекций. – Ленинград: 1977. – 84 с.
13. А. П. Крешков. Основы аналитической химии. Физико-химические (инструментальные) методы анализа, Изд. «Химия», 1970, стр. 472.
14. Материалы семинара по методам и средствам морской разведки, состоявшегося в Лондоне 23 - 25 февраля 1998г.
15. Lettington, Alan H.; Blankson, Isaiah M.; Attia, Magdy; Dunn, Dennis. Review of imaging architecture // Proceedings of SPIE. – 2002. – Vol. 4719. – p. 327.
16. Мельников, Г.С. Квантовые точки и квантовые колодцы – нанотехнологии [Электронный ресурс] . – Портал МГУ, Нанометр, 2009. – Режим доступа: [http://www.nanometer.ru/2009/02/18/kvantovanie\\_60223.html](http://www.nanometer.ru/2009/02/18/kvantovanie_60223.html)

17. Тарасов, В.В.; Якушенков, Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы. – Логос, 2007.
18. Покровский, Я.Е. Физика конденсированных сред // "Вестник РФФИ". – 1999. – №4.
19. Тарасов, В.В.; Торшина, И.П.; Фотиев, Ю.А.; Якушенков, Ю.Г. Сборник контрольных вопросов по дисциплинам «Оптические и оптико-электронные приборы и системы», «Источники и приемники оптического излучения», «Тепловизионные системы» (уч. пособие для вузов). – М. : МИИГАиК, 2004.
20. Almogy, Gilad; Xu, Yuanjian; Tong, Andrew; Shakouri, Ali; Yariv, Amnon. Monolithic integration of quantum well infrared photodetector and modulator. – American Institute of Physics. – 1996. – S0003-6951-96100415-5.
21. Мирошников, М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов : учебное пособие для вузов / М. М. Мирошников. – Л. : Машиностроение, 1977. – 600 с.
22. Певцев, Е., Чернокнижин, В. Матричные ИК-приемники для малогабаритных тепловизионных камер // Электронные компоненты. – 2001. – №1. – С. 32–36; № 2. – С. 30–34; № 3. – С. 12–20.
23. Волков, В. Г. Многоканальные приборы ночного видения наземного применения // Журнал «Специальная техника» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://st.ess.ru/publications/2\\_2001/volkov/volkov.htm](http://st.ess.ru/publications/2_2001/volkov/volkov.htm)
24. Тарасов, В.В., Якушенков, Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М. : Логос, 2004.
25. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства в видимом и инфракрасном диапазонах: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 2002. 120 с.: ил.
26. Справочник по приборам инфракрасной техники/ Л. З. Криксунов, В. А. Волков, В. К. Вялов и др.; Под ред. Л. З. Криксунова.— К.: Техника, 1980. — 232v с., ил.—Библиогр.: с. 226—229.
27. Rogalski, Antoni. Infrared detectors: status and trends. Review// Progress in Quantum Electronics. – 2003. – Vol. 27. – P. 59–210. – URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.473.1300&rep=rep1&type=pdf>
28. Фроимсон, И. М. Эффективность тепловизионных приборов. Метод классификации тепловизионных систем. Шкала эквивалентности приемников излучения
29. Тарасов, В.В.; Якушенков, Ю.Г. Конспект лекций «Многоэлементные приемники излучения». – М. : МИИГАиК, 2001.
30. Norton. P.R. Infrared image sensors // Optical Engineering. – 1991. – Vol. 30. – P. 1649–1663.



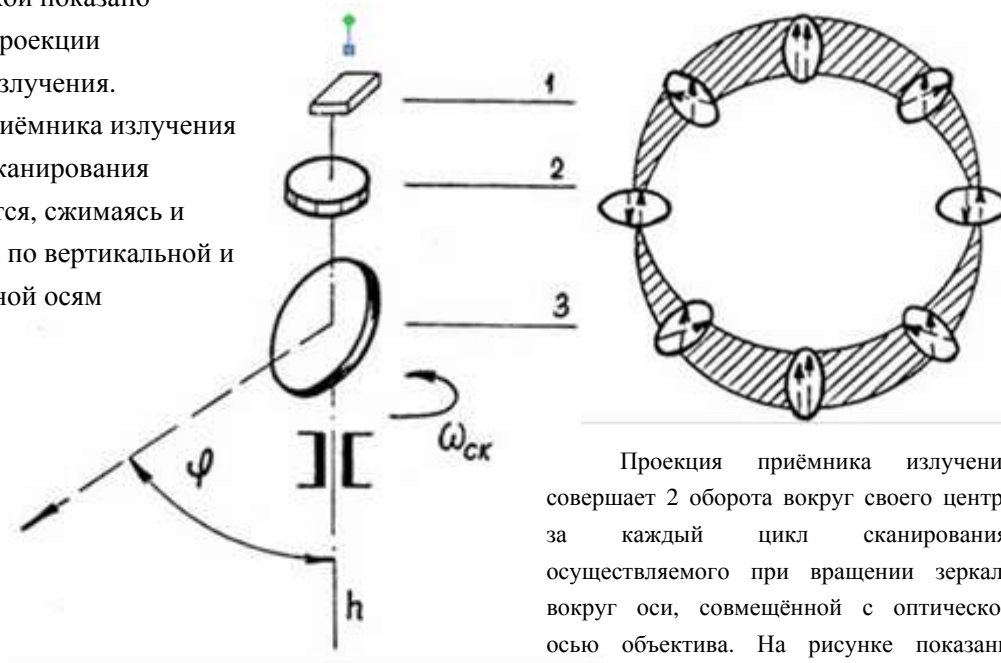
31. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook: Vol. 1 – 8/J.S. Accette, D.L. Shumker exec. ed Bellingham. Washington: SPIE Optical Engineering Press? 1993. 360 p.
32. Ciupa, R.; Rogalski, A. Performance limitations of photon and thermal infrared detectors // Opto-Electronics Review. – 1997. – N5. – P. 257–266.
33. Kozlowski, L.J. HgCdTe focal plane arrays for high performance infrared cameras // Proceedings of SPIE. – 1997. – Vol. 3179. – P. 200–211.
34. Якушенко, Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов : Учебник для вузов. – М. : Логос, 2004.
35. Gunapala S.D., Bandara S.V., Liu J. K. et al. Quantum well infrared photodetector research and development at Jet Propulsion laboratory// Infr. physics&Techol. 2001. V. 42. P.267-282
36. А. Коломыйцев (Security News), Д. Карнеева ("Пергам-Инжиниринг") На подступах к объекту. Секреты охранного тепловидения – I// Газета "Security News" – 2008. №2 (22) – С. 18 – 19
37. Baker I.M., Crimes G., Ard C. et al. Photovoltaic CdHgTe-Silicon Focal Planes III Proc. IV Intern. Conf. on Advanced Detectors and Systems. London: Institution of Electrical Engineers, 1990. P. 53 -58.
38. Изменения на рынке приемников ИК излучения // Оптика сегодня и завтра, 2000. - № 12.
39. Богомолов П.А., Сидоров В.И., Усольцев И.Ф. Приемные устройства ИК систем. - М.: Радио и связь, 1987.
40. Алеев Р.М., Иванов В.П., Овсянников В.А. Несканирующие тепловизионные приборы: Основы теории и расчета. - Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2004. - 228 с. ISBN 5-7464-0579-5
41. Sheppard F.D., Yang A.C. silicon Shottky retinas for infrared imaging// IEDM (Intern Electron Devices Meeting) Technical Digest/ N.Y.: Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1973. P.310-313.
42. The Ultimate Infrared Handbook for R&D Professionals. 2012 FLIR Systems, Inc
43. Кисель Л.Г. Лекционный курс по дисциплине «Квантовые системы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://reku.kai.ru/files/2011/04/%D0%9A%D0%B5%D1%81%D0%B5%D0%BB%D1%8C-%D0%9B.%D0%93.%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9-%D0%BA%D1%83%D1%80%D1%81-%D0%9A%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%A2%D0%9E%D0%92%D0%AB%D0%95-%D0%A1%D0%98%D0%A1%D0%A2%D0%95%D0%9C%D0%AB.pdf>
44. А.А.Ковалев, А.В.Ковалев Возможности тепловизионного метода неразрушающего контроля в решении антитеррористических задач. URL: <http://www.bnti.ru/showart.asp?aid=868&lvl=02>. (дата обращения: 17.12.2015)

- 45.Тымкул В.М., Л.В. Тымкул Оптико-электронные приборы и системы. Теория и методы энергетического расчета: учебное пособие – Новосибирск: СГГА. – 2005. – 215 с ISBN 5-87693-173-Х
- 46.В. А. Овсянников, В. В, Рожин, Ю. В, Рухлядев Габаритно-энергетический расчет ТВП и АТА строчного типа, методическое пособие к курсовому проектированию, Казань: КГТУ, 2001
- 47.Алеев Р. М., Овсянников В. А., Ченурский В. Н. Воздушная тепловизионная аппаратура для контроля нефтепродуктопроводов. М.: Недра, 1995. 160с.
- 48.Иванов В.П. К вопросу о разработке инженерной методики оценки прозрачности атмосферы: Оптика атмосферы, 1990. №11
- 49.Криксунов Л.З. Приборы ночного видения. Киев: Техника, 1975.
- 50.Источники и приемники излучения: Учебное пособие для студентов оптических специальностей вузов/Г. Ишанин, Э. Д. Панков, А. Л. Андреев, Г, В. Польщиков — СПб.: Политехника, 1991 - — 240 с ил, ISBN 5-7325-0164-9
- 51.Колючкин В. Я., Мосягин Г. М. Тепловизионные приборы и системы. Учебное пособие. М.:МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2000. с. с ил.

## Приложение А

### 1. Однозеркальная схема кругового сканирования

Стрелкой показано положение проекции приёмника излучения. Проекция приёмника излучения в процессе сканирования деформируется, сжимаясь и растягиваясь по вертикальной и горизонтальной осям



Проекция приёмника излучения совершает 2 оборота вокруг своего центра за каждый цикл сканирования, осуществляемого при вращении зеркала вокруг оси, совмещённой с оптической осью объектива. На рисунке показаны дискретные положения эллипса проекции апертуры приёмного объектива на поверхность без учёта движения самолёта.

Рисунок А.1 – Однозеркальная схема кругового сканирования

Недостаток схемы: затруднено использование МПОИ, из-за искажения пятна сканирования, т.к. потребуются сложная обработка сигналов с учётом наложения строк. Высокая скорость сканирования (примерно 1500 об/мин), которая не позволяет изменить угол визирования, т.к. приводит к динамической разбалансировке сканирующего узла. Эта схема требует сравнительно большого люка в корпусе самолёта. Для устранения влияния набегающего потока воздуха приёмное устройство "утапливается" в корпусе самолёта. При этом вершина конуса визирных лучей поднимается, что и приводит к увеличению требуемых размеров люка.

Введение синхронной фильтрации сигналов в усилительном тракте, позволяет упростить конструкцию сканирующей системы.

### 2. Двухзеркальная схема кругового сканирования изображена

Требуемый размер люка меньше чем у однозеркальной системы, т.к. элементы оптической головки в этой схеме расположены выше вершины конуса визирных лучей. Плоскость сканирования не вращается, остаётся

при сканировании параллельным самому себе (пунктирная стрелка на рисунки), но при этом деформируется. Возможно, применять приёмник с небольшим количеством площадок. В этом случае, при допустимых искажениях сигналов при работе в угле обзора до  $120^\circ$ , возможно использование мозаичного приёмника с количеством элементов  $2 \times 6 = 12$ .

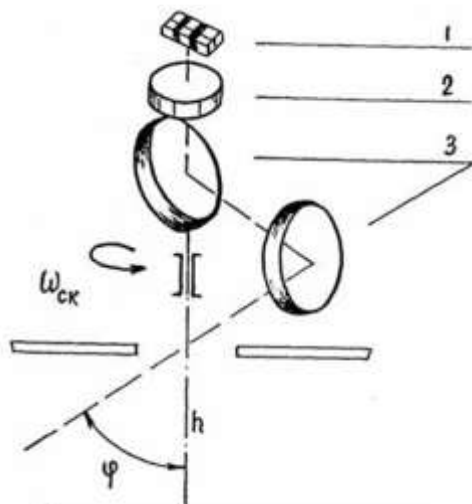
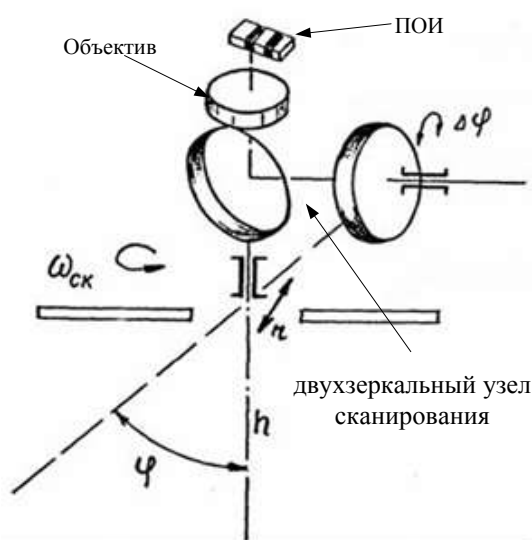


Рисунок А.2 – Двухзеркальная схема кругового сканирования изображена

Недостатком схемы является практическая невозможность изменения угла визирования, а также сравнительно большой вес и габариты устройства (при диаметре входного зрачка 100 мм и скорости сканирования 1500 об/мин вес головки достигает 60-80 кг).

### 3. Модифицированная двухзеркальная схема сканирования с изменяющим углом визирования в процессе сканирования

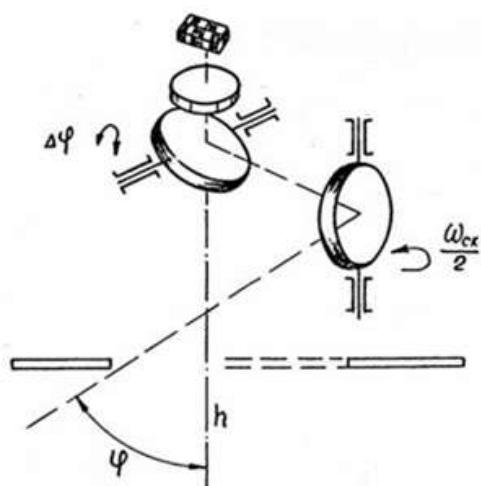


Узел сканирования, вращающийся вокруг оптической оси приёмного объектива. Второе зеркало имеет возможность качания вокруг экваториальной оси сканера. Плоскость второго зеркала может быть установлена под углом  $45^\circ$  к вертикали, при этом угол визирования будет равен 0 (режим "блока"). С поворотом второго зеркала на угол от этого положения, появляется наклон визирного луча на тот же угол к исследуемой поверхности. При этом визирный луч лежит в плоскости, нормальной по отношению к плоскости, по которой ведётся сканирование.

Рисунок А.3 – Двухзеркальная схема сканирования с изменяющим углом визирования в процессе сканирования

Недостатком схемы является сложное осуществление динамической балансировки вращающегося узла из-за наличия подвижного зеркала, а также необходимость передачи сигнала управления поворотом второго зеркала на вращающийся узел сканирования.

#### 4. Схема кругового сканирования с удвоением скорости визирного луча



Отличие от других схем, состоит во введении зеркального аналога призмы Дове между приёмным объективом и сканирующим двухзеркальным узлом. При вращении аналога призмы Дове в ту же сторону, что и сканирующего узла, но с половинной скоростью, изображение приёмника излучения на местности ориентировано радиально и неподвижно относительно осей эллипса проекции апертуры, т.е. сохраняет в процессе сканирования ориентацию по отношению к траектории сканирования.

Рисунок А.4 – Схема кругового сканирования с удвоением скорости визирного луча

Эта схема позволяет использовать многоэлементный приёмник излучения и реализовать метод последовательного сканирования с накоплением сигнала. Недостатки схемы заключаются в сложности изменения угла визирования и больших весе и габаритах устройства.

Достоинства схемы. Возможность оперативного изменения угла визирования, независимо от скорости сканирования. Скорость вращения сканирующего зеркала вдвое меньше, что упрощает конструкцию механического узла и снижает энергопотребление. Значительно проще обеспечить задачу динамической балансировки вращающегося узла ввиду его симметричности. Можно уменьшить скорость сканирования, применив вместо зеркала зеркальной призмы.

#### 4. Схема кругового сканирования с зеркальной призмой

Схема позволяет: уменьшить скорость вращения сканирующего узла, повысить КПД развёртки и получить выигрыш в чувствительности за счёт снижения требуемой полосы пропускания усилительного тракта.

Траектории сканирования могут быть самыми разнообразными (спиральная, розеточная, прямоугольная, циклоидальная и др.). Ниже приведены некоторые схемы сканирования тепловизоров.

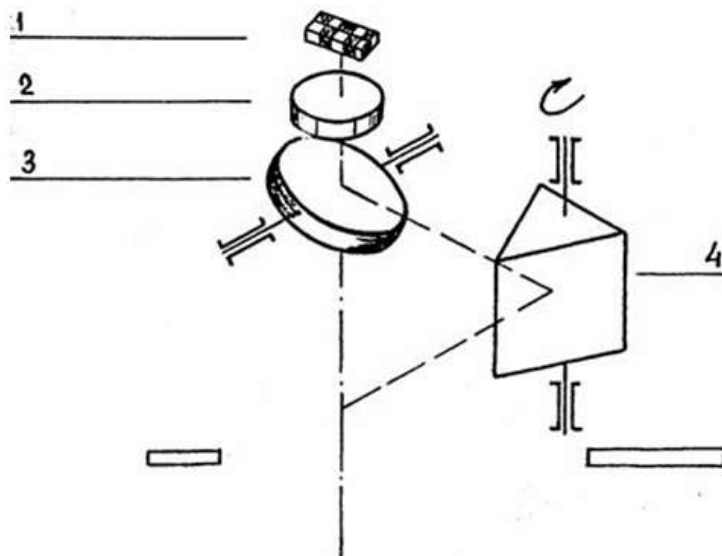
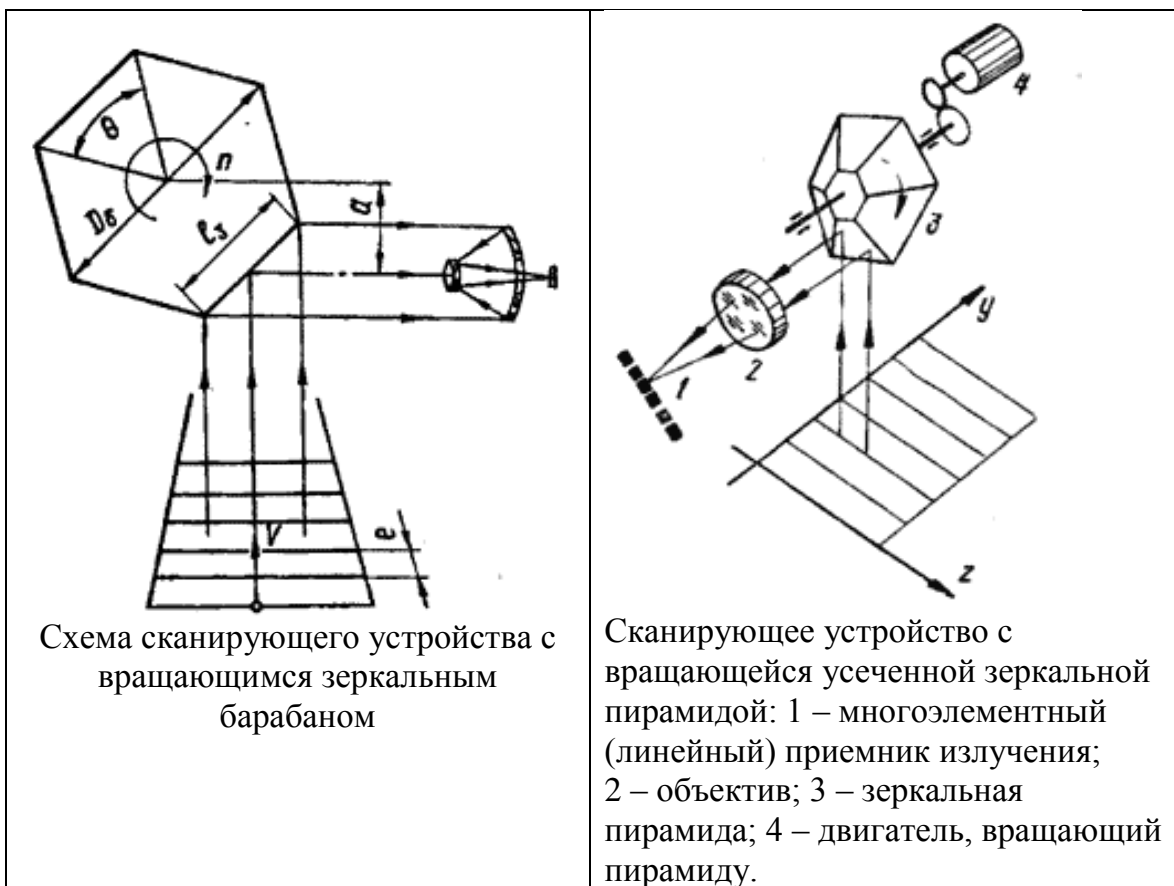
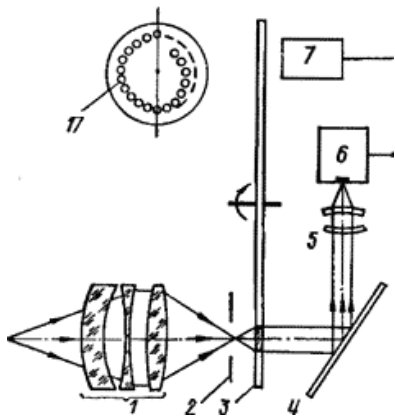


Рисунок А.5 – Схема кругового сканирования с зеркальной призмой

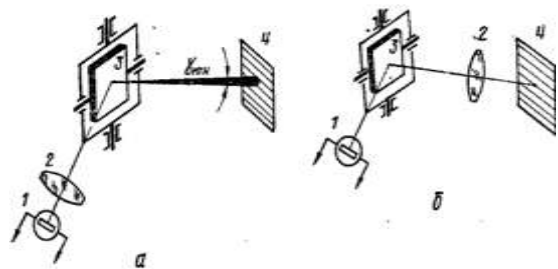




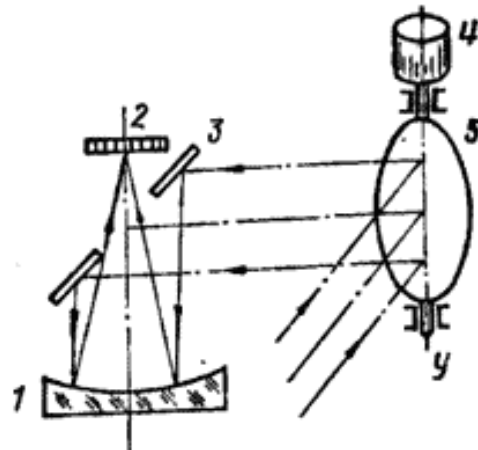
Первые ТпВ, в которых для развёртки изображения использовался диск Нипкова из 45 линз, расположенных по спирали Архимеда. Из них 40 использовались собственно для сканирования, а 5 — для уменьшения скачка видеосигнала во время обратного хода сканирования и возмущающих переходных процессов в тракте видеосигнала.

В первых образцах ТпВ использовался одноэлементный заливной приёмник излучения, и число строк удваивалось с 40 до 80 зеркалом 4, колеблющимся по кадру на шаг одной строки с частотой 25 Гц. Впоследствии был использован двухэлементный (0,7×0,7 мм) приёмник из InSb, качание зеркала исключено, и удвоение числа строк получалось поочередным опросом площадок и воспроизведением двух подкадров, образующих полные кадры, на ЭЛТ с частотой следования 12,5 Гц.

1 — объектив; 2 — полевая диафрагма; 3 — диск с 45 телескопическими линзами; 4 — зеркало; 5 — конденсор; 6 — приёмник излучения; 7 — оптронный датчик кадров для строчной синхронизации.



Сканирующие устройства с колеблющимся зеркалом, размещенным в параллельном (а) или в сходящемся (б) пучке лучей: 1 — приемник излучения; 2 — объектив; 3 — сканирующее зеркало; 4 — поле обзора.



Сканирующее устройство с многоэлементным приёмником излучения и расположением сканирующего зеркала в параллельном пучке лучей: 1 — объектив; 2 — приёмник излучения; 3 — отражательное зеркало; 4 — электромагнит; 5 — сканирующее плоское зеркало.

## Приложение Б

В настоящее время разработкой микроболометрических матриц (МБМ) и тепловизионных устройств на их основе занимаются ведущие фирмы США, Европы, Японии, Кореи, Австралии. МБМ непрерывно совершенствуются [1-4]. В таблице даны примеры зарубежных разработок МБМ и модулей на их основе по состоянию на апрель 2008 г.

Повышается уровень всех основных характеристик: температурного разрешения (“рекорд” прежнего периода —  $30 \div 50$  мК, а текущего —  $10-30$  мК); пространственного разрешения (минимальный шаг элемента снизился с  $46-47$  мкм до  $15-28$  мкм); формата (фирма Lockheed Martin сообщила о ведущейся разработке матрицы с числом элементов разложения  $640 \times 480$ ).

Таблица Б.1 – Зарубежные микроболометрические матрицы (модули)

Тип	Разработчик	Формат	Материал	Шаг, мкм	NETD(f/1), мК
AE-189	Raytheon (США)	320×240	VOx	50	<90
SB-151				50	<20
SB-212				25	<50
U4000	Boeing (США)	320×240	VOx	50	~30
В разработке	Lockheed Martin (США)	640×480	VOx(?)	28	~(60-100)
—		15×31		48	<100
В разработке		120×160		<100 (оценка)	
—	LETI LIR (Франция)	256×64	$\alpha$ -Si	47	<50
—	FOA (Швеция) — DSTO (Австралия)	320×240	$\alpha$ -Si:N	40	<100 (оценка)
—	Advanced Tech. R&DC (Япония)	320×240	Si (p-n-диоды)	40	200
В разработке	Daewoo (Корея)	256×256	Ti	50	<50
—	Honeywell (США)	240×336	VOx		
—	Lockheed Martin (США)	327×245	VOx(?)		
U3000	Boeing (США)	320×240	VOx	50	~30
—	LETI LIR (Франция)	256×64	$\alpha$ -Si	47	90
—	Japan Defense Agency (Япония)	256×256	VO2	50	150

Расширяется география разработчиков. При этом большинство производителей в США традиционно опираются на разработанную фирмой Honeywell технологию получения температурочувствительного слоя из оксидов ванадия. В Европе, Азии, Австралии используется более широкий



спектр материалов. В производственный процесс активно вовлекается аморфный кремний. Такая замена весьма показательна. ИК преобразователь в этом случае полностью базируется на кремниевой технологии — основной технологии современной микроэлектроники. Большой интерес представляет сообщение японских разработчиков из фирмы Advanced Tech. R&DC, хотя приводимые ими значения эквивалентной шуму разности температур NETD пока еще уступают лучшим достижениям. В данной разработке не только используется кремний в качестве температурочувствительного материала, но и формируются *p-n*-переходы. Это в принципе позволяет в несколько раз повысить чувствительность МБМ за счёт большей величины температурного коэффициента отклика микроболометрического элемента (до  $7 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ ).

Таблица Б.2 – Основные параметры фокальных ИК матриц для тепловизионных приборов российского производства

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра, мкм	Формат (число пикселей)	Размер пикселя, мкм	Рабочая температура,	Темп. чувствит. (NETD), мК
РФ, ГУП “НПО “Орион”	KPT	8-10,5	128×128	35×35	80	
РФ, ГУП “НПО “Орион”	KPT	8-10,5	384×288	35×35	80	
РФ, ЗАО “Матричные технологии”	PtSi	3-5	128×128 256×256 512×512	27×27 25×25 14×14	80	30
РФ,ГУП НПО “Орион”	InSb	3-5	128×128	50×50	80	
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbS	1,5-4	128×128	60×60	80	20
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSe	2-6	256×256	60×60	80	30
РФ, ЦНИИ “Электрон”	PbSnTe	6-14	256×256	60×60	25	5

Общая сравнительная таблица по матричным приёмникам отечественного и зарубежного производства приводится ниже.

Для ТПС со средними и большими дальностями обнаружения, предназначенных для военных целей и задач охраны особо важных объектов, как правило, применяются фотоприёмные системы с охлаждением рабочего тела приёмников излучения, а также отдельных элементов оптического тракта (диафрагмы, светофильтры, градуированные элементы) до соответствующих температур. Наибольшее распространение в последние годы получили системы, работающие по циклу Стирлинга.

Таблица Б.3 – Основные параметры матричных приёмников отечественного и зарубежного производства

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра, мкм	Формат (число пикселей)	Размер пикселя, мкм	Рабочая температура, К	Темпер. чувствит.
США, Raytheon	QWIP	8-12	256256	28×28	70	15
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	QWIP	8-10	640×512	24×24	70	25
США, Raytheon	QWIP	8-12	640×486	18×18	70	30
США, JPL's Infrared Focal Plane Array Technology Group, Indigo Systems Corporation, NASA	QWIP	8-10	640×512	24×24	-208 °С	40
США, Center for Space Microelectronics Technology, Jet Propulsion Laboratory, NASA	QWIP	10-15,4	1024×1024	23×23	35	55
США, Jet Propulsion Laboratory, Indigo Systems Corporation, NASA	QWIP	3,5-6, 8,5-10, 10-2, 13-15	640×512	23×23	48	40
Франция, LIR	KPT	3-5	640×480	23×23	77	14
Германия, AEG Infrared Module GmbH	KPT	8-10	256×256	40×40	77	20
США, Rockwell	KPT	8-12	256×256	40×40	77	
США, Hughes, SBRS	KPT	8,5-11	256×256	30×30	80	65
США, Hughes, SBRS	KPT	3-4,5	128×128	40×40	300	50
РФ, ГУП "НПО "Орион"	KPT	8-10,5	128×128	35×35	80	
РФ, ГУП "НПО "Орион"	KPT	8-10,5	384×288	35×35	80	
Германия, AEG Infrared-Module GmbH	PtSi	3-5	256×256	24×24	75	75
США, Hughes	PtSi	3-5	256×256	30×30	40	
США, Boeing Comp.	PtSi	1-5	324×240	30×30	75	60
США, Boeing Comp.	PtSi	1-5	486×640	24×24	75	70
РФ, ЗАО "Матричные технологии"	PtSi	3-5	128×128 256×256 512×512	27×27 25×25 14×14	80	30
США, Cincinnati Electronics Corp.	InSb	3-5	256×256	30×30	77	40
США, SBRC	InSb	3-5	256×256	30×30	50	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	256×256	30×30	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	480×640	20×20	80	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	512×512	27×27	35	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	1024×1024	27×27	30 – 50	
США, Hughes, SBRC	InSb	0,5-5,4	2048×2048	27×27	30 – 50	

Страна, фирма	Тип матрицы	Рабочая область спектра, мкм	Формат (число пикселей)	Размер пикселя, мкм	Рабочая температура, К	Темпер. чувствит.
США, FLIR Systems	InSb	3.4-5.1	640×512	15×15	Замкнутый цикл Стерлинга	< 25
РФ, ГУП НПО "Орион"	InSb	3-5	128×128	50×50	80	
Франция, LIR	Si:Ga	5-17	128×192	75×75	10	
Япония, Mitsubishi Electric Co.	Ge:Si/Si (барьер Шоттки)	8-12	512×512	34×34	43	80
РФ, ЦНИИ "Электрон"	PbS	1,5-4	128×128	60×60	80	20
РФ, ЦНИИ "Электрон"	PbSe	2-6	256×256	60×60	80	30
РФ, ЦНИИ "Электрон"	PbSnTe	6-14	256×256	60×60	25	5

### Используемые источники

1. Андрияшин, С. Я.; Кравченко, Н. В.; Кулыманов, А. В.; Либерова, Г. В.; Таубкин, И. И.; Трищенко, М. А.; Филачев, А. М.; Эскин, Ю. М. Состояние разработок микроболометрических матриц в Государственном научном центре РФ «НПО "Орион"» // Прикладная физика. – 2000. – №5. – С. 5-17.
2. Дмитриев, Е. Фотоприемники для работы в мультиспектральных оптоэлектронных системах. Проблемы создания // «Электроника»: Наука, технология, бизнес. – 2005. – №8.
3. Овсяк, В.Н. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. – Новосибирск: Наука, 2001. – 243 с.
4. ФГУП НПК "ГОИ им. С.И. Вавилова" URL: [http://soi.srv.pu.ru/r\\_1251/directions/dir1/dir1.htm](http://soi.srv.pu.ru/r_1251/directions/dir1/dir1.htm)

## Приложение В

Многоканальная тепловизионная система для сверхдальнего обнаружения фирмы FLIR.

ТПС ThermoVision 2000/3000MS – это мощная многоканальная система видеонаблюдения на скоростном и точном поворотном устройстве с тепловизионным каналом, видеоканалом и дополнительным лазерным дальномером.

Системы ThermoVision 2000/3000MS установлены на более чем 700 мобильных и стационарных постах по всему миру, выполняя важные многоцелевые задачи, совмещающие обеспечение военной безопасности объектов, наблюдение и тактическую разведку. Благодаря защищенному исполнению, кристально четкому изображению и широким коммуникационным возможностям, системы ThermoVision круглосуточно обеспечивают безопасность особо важных объектов и границ государств. На рисунке С.1 и в таблице ниже приведены характеристики многоканальной системы видеонаблюдения ThermoVision 2000/3000MS [1].



Рисунок С.1 – Основные параметры системы видеонаблюдения ThermoVision 2000/3000MS

Таблица С.1 – Характеристики многоканальной системы видеонаблюдения ThermoVision 2000/3000MS

Параметр	ThermoVision 2000	ThermoVision 3000MS
Число полей зрения	3	3
Широкое поле зрения	25°×19°	25°×19°
Среднее поле зрения	6°×4,5°	7,8°×5,8°
Узкое поле зрения	0,99°×0,74°	1,3°×0,96°
Широкое мгновенное поле зрения	1,37 мрад	0,9 мрад
Среднее мгновенное поле зрения	0,33 мрад	0,21 мрад
Узкое мгновенное поле	0,054 мрад	0,035 мрад

зрения		
ИК детектор	технология QWIP с FPA матрицей; 320×240 пикселей	технология QWIP с FPA матрицей; 640×480 пикселей
Температурная чувствительность	0,03 °С	0,03 °С
Спектральный диапазон	8,2-9,2 мкм	8,2-9,2 мкм
Электронное увеличение	2× и 4×	2× и 4×
Дальность обнаружения	более 17 км (танк)	более 20 км (танк)
Видеокамера дневного наблюдения	Тип	Sony, серия FCB-EX780
	Увеличение	25×; цифровое увеличение – 12×
	Последовательный выход	VISCA протокол (TTL / CMOS)
	Видеовыход	PAL/NTSC
	Чувствительность	3 люкса; с функцией ИК фильтра – 0,02 люкса
Лазерный дальномер	Тип	LP-16; на эрбиевом стекле;
	Диапазон действия	80-20500 м (типовой); класс А
	Защита глаз	
Эксплуатационные характеристики: класс защиты – IP65; диапазон температур -32°С ... +55°С; масса – 25 кг		

Titanium – новое поколение высокочувствительных охлаждаемых камер французской компании CEDIP Infrared Systems [2], дальнейшая эволюция популярной серии *Jade*, на рисунке ниже Внешний вид камер серии *Titanium*.



Рисунок С.2 – Внешний вид камер серии Titanium

Таблица С.2 – Основные параметры камер серии Titanium

Тип сенсора	InSb, МСТ или QWIP
Рабочий диапазон	3–5 мкм 8–12 мкм (дополнительно 1,5 - 5 мкм)
Разрешение	320 x 256 или 640 x 512, разрядность сигнала 14 бит
Размер камеры (LxWxH)	253x130x168 мм
Размер пиксела	30 мкм / 25 мкм / 20 мкм/ 15 мкм
Температурная чувствительность	< 18 мЛК
Система охлаждения	Интегрированный охладитель стирлинга
Частота кадров	380 Гц (до 20 КГц с уменьшением разрешения)
Время накопления	>3 мкс
Размер фоточувствительной площадки	От 42°x34° (12 мм) до 2.7°x2° (200 мм)
Интерфейсы передачи данных	USB2 / CAMLINK / GigE
Диапазон температур	От -20 °С до 3000 °С
Точность измерения температуры	±1 °С или ±1 %

#### Используемые источники

1. Сайт фирмы FLIR, URL: [http://www.flir.com/uploadedFiles/Eurasia/Security/PanTilt\\_Zoom/ThermoVision\\_2000,3000\\_MS/TVS2000-3000.pdf](http://www.flir.com/uploadedFiles/Eurasia/Security/PanTilt_Zoom/ThermoVision_2000,3000_MS/TVS2000-3000.pdf) (дата обращения 2013)
2. Сайт фирмы «Евролэйз photonics» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.eurolase.ru/titanium.pdf> (дата обращения 2013)

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ**

Кафедра создавалась в 1937-38 годах и существовала под следующими названиями:

- с 1938 по 1958 год – кафедра военных оптических приборов;
- с 1958 по 1967 год – кафедра специальных оптических приборов;
- с 1967 по 1992 год – кафедра оптико-электронных приборов;
- с 1992 года – кафедра оптико-электронных приборов и систем.

Кафедру возглавляли:

- с 1938 по 1942 год – профессор К.Е. Солодилов;
- с 1942 по 1945 год – профессор А.Н. Захарьевский (по совместительству);
- с 1945 по 1946 год – профессор М.А. Резунов;
- с 1947 по 1972 год – профессор С.Т. Цуккерман;
- с 1972 по 1992 год – заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор Л.Ф. Порфирьев;
- с 1992 по 2007 год – заслуженный деятель науки РФ, профессор Э.Д. Панков.
- с 2007 года по настоящее время – почетный работник высшего профессионального образования, профессор В.В. Коротаев.

С 1938 по 1970 кафедра входила в состав оптического факультета.

В 1970 году кафедра вошла в состав факультета оптико-электронного приборостроения, который в 1976 году был переименован в инженерно-физический факультет.

В 1998 г кафедра вошла в состав факультета оптико-информационных систем и технологий.

В 2015 году кафедра вошла в состав факультета лазерной и световой инженерии.

Кафедра оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС) осуществляет подготовку профессионалов в области создания оптико-электронных и видеоинформационных приборов и систем, а также в области разработки их программного обеспечения.

Результаты научных исследований кафедры докладываются на ведущих мировых научных форумах, публикуются в виде научных статей и монографий.

Приборы, разработанные на кафедре, поставляются на предприятия России и на предприятия других стран.

Этот уникальный опыт передается нашим студентам.

На кафедре работают 6 докторов наук, профессоров, однако большую часть коллектива составляют молодые люди в возрасте от 18 до 35 лет, в том числе 11 молодых кандидатов наук.

Коллектив кафедры оптико-электронных приборов и систем (ОЭПиС) – сформировавшаяся научная и научно-педагогическая школа, существующая с 1938 года.

За эти годы были подготовлены более тысячи специалистов, более ста докторов и кандидатов наук.

С 2007 г. заведующим кафедрой является почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, профессор В.В. Коротаев.

Только в период с 2007 по 2015 год на кафедре были защищены 28 диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук.

В 2012 году научно-педагогическая школа кафедры ОЭПиС «Оптико-электронное приборостроение» была внесена в реестр ведущих научных и научно-педагогических школ Санкт-Петербурга.

Подробная информация о кафедре ОЭПиС имеется на сайте кафедры: <http://oep.ifmo.ru/>



**Сергей Васильевич Михеев**

# **ОСНОВЫ ИНФРАКРАСНОЙ ТЕХНИКИ**

**Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Подписано к печати

Заказ №

Тираж

Отпечатано на ризографе

Михеев С.В.

Н.Ф. Гусарова

**Редакционно-издательский отдел**

**Университета ИТМО**

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49