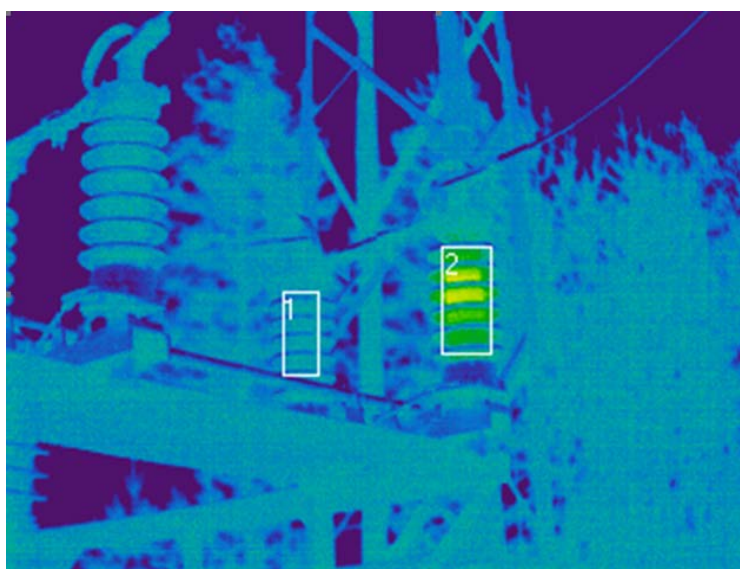


Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников

ИНФРАКРАСНАЯ ФОТОНИКА

Часть III

ОСОБЕННОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ



Санкт-Петербург

2019

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников

ИНФРАКРАСНАЯ ФОТОНИКА

Часть III

ОСОБЕННОСТИ ДИСТАНЦИОННОЙ РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗА ТЕПЛОВЫХ ПОЛЕЙ ПРИРОДНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И АНТРОПОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО
по направлению подготовки 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» в
качестве учебного пособия для реализации основных профессиональных
образовательных программ высшего образования магистратуры

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2019

УДК 621.384.3

Белоусов Ю.И., Постников Е.С. Инфракрасная фотоника. Часть III. Особенности дистанционной регистрации и анализа тепловых полей природных образований и антропогенных объектов. Учеб. пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 140 с.

Рецензент: Сандуленко Александр Витальевич, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник АО «НПО ГОИ им. С.И. Вавилова»

«Пособие» ориентировано на «пользователей» тепловизионных приборов (ТВП) и призвано ознакомить его с накопленным к настоящему времени набором сведений относительно закономерностей формирования и наблюдения тепловых полей различных объектов в реальных условиях. Приводится анализ особенностей, влияющих на достоверность интерпретации тепловизионных изображений при решении широкого круга практических задач.

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 12.04.03 “Фотоника и оптоинформатика” при изучении дисциплины «Инфракрасная фотоника», протокол №4 от «12» «ноября» 2019 г.



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, 2019

© Ю.И. Белоусов, Е.С. Постников, 2019

Оглавление

Введение	6
1 ИК излучение небосвода	8
1.1 Угловое распределение яркости нисходящего ИК излучения небосвода	8
1.2 Статистические характеристики излучения небосвода	14
1.2.1 Закон распределения флуктуаций яркости небосвода	15
1.3 Пространственные и временные энергетические спектры флуктуаций ИК излучения небосвода	17
2 ИК излучение Земной поверхности и объектов естественного ландшафта	21
3 Инфракрасное излучение взволнованной поверхности моря	32
3.1 Физическая картина формирования ИК излучения ВПМ и объектов на её фоне.	33
3.2 Методика расчётных оценок характеристик ИК излучения ВПМ	40
3.2.1 Среднее значения ИК излучения ВПМ (первый момент случайного процесса флуктуаций яркости)	40
3.2.2 Дисперсия флуктуаций ИК излучения ВПМ (второй момент случайного процесса флуктуаций яркости)	44
3.2.3 Перепад энергетической яркости при переходе линии морского горизонта	46
3.2.4 Среднее значение яркости ИК излучения в районе солнечной дорожки	49
3.2.5 Рассеянное вспененной морской поверхностью ИК излучение Солнца	54
3.2.6 Отражённое от взволнованной морской поверхности ИК излучение облаков	59
3.2.7 Отражение от ВПМ ИК излучения объектов конечных размеров	61
3.2.8 Контраст ИК излучения температурных аномалий на ВПМ	62
3.2.9 Блики на склонах отдельных волн	64
3.2.10 Контрастное излучение мало нагретых искусственных объектов и естественных образований на поверхности моря	66
3.2.11 Контраст энергетической яркости навигационных знаков, камней и берегового уреза	68
3.2.12 Контраст энергетической яркости собственного теплового излучения вспененного гребня волны	69
3.2.13 Характерные значения контрастной энергетической яркости фоновых помех на ВПМ в «окне прозрачности» атмосферы 7,6 - 13,6 мкм	74
3.2.14 Влияние геометрии наблюдения и атмосферной трассы на воспринимаемое аппаратурой ИК излучение.	75

4	Практические применения тепловизионных приборов и особенности интерпретации данных дистанционного зондирования в различных задачах.	80
4.1	Применение тепловидения для военных целей	80
4.2	Использование ТВП в охранных системах	92
4.3	Применение ТВП для дистанционной диагностики электрооборудования	102
4.4	ТВП для обнаружения утечек газов	116
4.5	Тепловизионные обследования зданий и сооружений	119
4.6	Применение тепловизионных приборов для контроля движения транспорта на железной дороге	126
4.7	Применение тепловизионных приборов для медицинских обследований	132
	Заключение	136
	Список контрольных вопросов	138
	Литература	139

Сокращения и условные обозначения

АЧТ	–	абсолютно чёрное тело
ИК	–	инфракрасный
ТВП	–	тепловизионный прибор
МДВ	–	метеорологическая дальность видимости
MWIR	–	middle wave infrared –средневолновый ИК диапазон (3-5 мкм)
LWIR	–	long wave infrared – длинноволновый ИК диапазон (8-14 мкм)
УФ	–	ультрафиолетовое (излучение)
СКЗ	–	среднеквадратическое значение
ОЭП	–	оптико-электронные приборы

Введение

Особенность ИК приборов, применяемых для дистанционного зондирования тепловых полей, состоит в том, что их чувствительность зависит от интенсивности ИК излучения того фона, на котором наблюдается объект [1,2]. Эта зависимость неоднозначна и определяется целым рядом факторов, связанных и с характеристиками ИК прибора, и с характеристиками условий наблюдения. В общем случае изменение фоновой ситуации обуславливает как изменение количественных значений параметров тех отличительных признаков, по которым принимаются решения, так и их набор и приоритетность. В дополнение к изменению величины отношения сигнала к шуму (ОСШ), соотношения спектральных составляющих, изменяются количество и состав устойчивых отличительных признаков, наличие априорной информации при интерпретации данных, количество элементов изображения цели, достаточных для её выделения в присутствии помех, и т.п., требующие изменения алгоритма и критериев принятия решений. Современный уровень тепловизионных (ТВП) и тепловизионных приборов характеризуется тем, что на практике реализованы максимально высокие параметры основных функциональных узлов этих приборов [3]. Предельные дальности наблюдения объектов с помощью ТВП ограничиваются в большей степени влиянием внешних фоновых помех, чем недостатком их чувствительности или внутренними шумами [4]. Например, если поднять только пороговую чувствительность современного ТВП на порядок, то дальность распознавания объекта не увеличится даже в два раза, потому что фоновые помехи уже сейчас во многих случаях ограничивают реальную дальность действия ИК приборов, так как обладают многими схожими с целью признаками. Чтобы довести реальную чувствительность ТВП в сложной фоноцелевой обстановке до уровня их чувствительности в лабораторных условиях, необходим поиск технических путей борьбы с фоновыми помехами. Оснащение оператора ТВП сведениями о характеристиках помех призвано облегчить выявление содержательной (смысловой) информации из предъявляемого ему тепловизионного изображения.

Размах амплитуд энергетических яркостей (или радиационных температур) излучения фоновых образований может в десятки раз превышать пороговую чувствительность современных ТВП. Для ИК прибора с $\Delta T_{\text{пор}} \sim 0,05\text{K}$, что составляет $\Delta L_{\text{пор}} = 1,26 \text{ мкВт/см}^2\text{ср}$ в диапазоне 8 – 12 мкм, перепад средней составляющей сигнала при переходе линии морского горизонта [5] достигает $\Delta L_{\text{гор}} = 680 \text{ мкВт/см}^2\text{ср}$, то есть более 500 значений пороговой чувствительности ТВП и, очевидно, значительно больше линейного диапазона полутонового тепловизионного изображения на экране дисплея ТВП. Контраст энергетической яркости собственного излучения морских «барашков» и блики на склонах волн могут также достигать значений 350 мкВт/см²ср и 460 мкВт/см²ср [5] соответственно, образуя характерный «пёстрый» фон и затрудняя обнаружение и сопровождение малоразмерных надводных объектов. Адаптация передаточной характеристики ТВП к условиям наблюдения

приводит либо к «загрублению» его чувствительности, либо к представлению оператору лишь части наблюдаемого сюжета с максимальной чувствительностью (в полутоновом изображении), оставляя все другие его фрагменты вне восприятия оператором (в области «белее белого» и «чернее чёрного»). Кроме того, пространственные неоднородности излучения подстилающей поверхности как структурная фоновая помеха существенным образом влияют на эффективность решения задач обнаружения и распознавания объектов по их тепловизионному изображению. Для учёта этого влияния традиционно привлекаются статистические характеристики пространственно-временного случайного процесса, каким представляется излучение природных образований.

Одни и те же природные образования могут выступать либо как источник фоновых помех, либо как дополнительный признак, облегчающий, например, ориентацию оператора в пространстве по линии горизонта или по изображениям облаков или гор на фоне небосвода. Для выработки рациональных алгоритмов подавления фоновых помех и приёмов использования излучения естественных образований для повышения информативности тепловизионного изображения необходимо знать зависимость их характеристик от условий наблюдения.

Из самых общих соображений можно условно выделить три группы природных образований, на фоне которых наблюдаются интересующие нас объекты и которые являются источниками естественных помех: небосвод, земная поверхность и поверхность моря (океана).

Методическое пособие может быть использовано обучающимися в качестве основного источника для самостоятельной подготовки по темам лекционного курса. А также может являться теоретической базой для освоения лабораторных работ по дисциплине, проведения практических расчетов и подготовки курсовой работы.

1 ИК излучение небосвода

Собственное излучение небосвода выступает как фоновое излучение при наблюдении фрагментов промышленных конструкций, изоляторов линий электропередач, верхних частей зданий и сооружений, воздушных целей и других объектов, которые при определённых ракурсах визирования также наблюдаются на фоне неба. При оценках их тепловых контрастов излучение неба должно учитываться как излучение подстилающей поверхности. Кроме того, и это не менее важно, отраженное излучение небосвода является составной частью при формировании ИК излучения как других фоновых образований, так и наблюдаемых объектов. Поэтому его влияние на регистрируемое с помощью ИК приборов оптическое поле весьма существенно и неоднозначно.

Реальные ситуации характеризуются случайным распределением облачности по небосводу. Объём исследований, посвящённых описанию нисходящего излучения небосвода, чрезвычайно обширен, однако до настоящего времени нет обобщённой и общепринятой модели описания характеристик оптического поля небосвода. При отсутствии объективно измеряемых параметров преобладает субъективный подход к определению условий наблюдения, что приводит к разногласиям при интерпретациях полученной информации и к недостоверности прогнозов.

Общий подход к описанию оптического поля небосвода состоит в выделении трёх основных метеорологических ситуаций, различающихся степенью облачности: сплошная низкая облачность (СО), безоблачный ясный небосвод (ЯН), и все промежуточные случаи частичной переменной облачности (ПО).

Для оценки амплитуд полезных сигналов при наблюдении объектов на фоне небосвода и для количественных расчётов отражённой составляющей в тепловом поле целей и помех используются данные по угловому распределению среднего значения нисходящего излучения небосвода в различных метеоусловиях. Для выработки алгоритмов выделения целей и для оценки эффективности использования ИК прибора в присутствии фоновых помех используются сведения о статистических характеристиках оптического поля небосвода.

1.1 Угловое распределение яркости нисходящего ИК излучения небосвода

Общим для всех исследований являются выводы о том, что ИК излучение неба непосредственно над горизонтом можно с высокой степенью приближения принять равным излучению АЧТ с температурой воздуха $L^{\circ}(T_B)$. Проблема дальнейшего уточнения связана с неоднородностью температуры воздуха T_B на столь протяжённой пригоризонтной трассе. По некоторым данным такая неоднородность температуры воздуха может достигать до $\Delta T_B \sim 2^{\circ}\text{C}$.

Излучение неба при сплошной низкой облачности, если его рассматривать как граничный случай в совокупности метеоситуаций СО - ПО -

ЯН, можно принимать, в самом первом приближении, изотропным, постоянным по углу места и близким к излучению АЧТ с температурой нижней кромки облаков, которая может быть равна или меньше температуры воздуха T_v у поверхности на единицы градусов и связана с ней неоднозначно.

Для тех метеоситуаций, когда нельзя ограничиться первым приближением, «физический смысл и практическое значение имеют понятия высота границы облака и температура на границе облака» [6] для конкретного облака в целом, означающие некоторые осреднённые значения этих величин. Точность приводимой температуры воздуха на границе конкретного облака не может быть очень высока, даже если измерения проводятся самолётными методами, когда температура в каждой точке фиксируется со сравнительно высокой точностью 0,1 - 0,2°C. Данные о температуре на границе облаков вряд ли оправдано приводить с точностью до десятых долей градуса. Температура на нижней границе облаков нижнего яруса $T_{нг}$ тесно коррелирует с температурой у поверхности Земли и имеет отчётливо выраженный годовой ход. В то же время суточный ход в среднем выражен слабо. Так, обычно, утренние значения $T_{нг}$ отличаются от дневных значений $T_{нг}$ не более, чем на 1–2°C, в то время, как годовой ход среднего значения $T_{нг}$ достигает 15°C и выше. Высота нижней границы и $T_{нг}$ меняются в зависимости от того, сколько насчитывается облачных слоёв: в среднем, облака нижнего яруса в случае однослойной облачности располагаются несколько выше, чем в случае многослойной. При наличии облаков температура у поверхности Земли зимой примерно на 2–4°C выше средней для этого периода температуры у поверхности, а летом – ниже. Разность температур у поверхности Земли и на нижней границе облака сравнительно невелика зимой (2°C–4°C) и может превышать 10°C в другие сезоны. Разность температур на нижней и верхней границе облаков определяется прежде всего их толщиной и в мощных облаках заключена в пределах 4–7°C. Она изменяется в среднем на 1–3°C от месяца к месяцу. Эти данные важны в тех ситуациях, когда при наблюдении визируется не только нижняя часть облаков, но и их боковые области, что характерно, например, при наблюдении небосвода в пригоризонтных областях. Средняя температура на границах облаков в общем несколько отличается от средней температуры воздуха на той же высоте: на 2–4°C летом и на 0–2°C - зимой. Эти данные применимы для исследования тонких особенностей ИК излучения воздушных объектов, температура которых зависит от температуры окружающей среды.

Излучение безоблачного ясного небосвода (ЯН) анизотропно по азимуту и плавно уменьшается при изменении угла места линии визирования от горизонта к зениту. Выражения для аппроксимации $L_n(\varphi_n, \psi_n)$ так или иначе связываются с излучением неба над горизонтом $L_n(\varphi_n = \pi/2, \psi_n)$ и неба в зените $L_n(\varphi_n = 0, \psi_n)$ и могут быть представлены в виде [10]:

$$L_n(\varphi_n, \psi_n) = L^0(T_v) - [L^0(T_v) - L_n(\varphi_n = 0, \psi_n)] f(\varphi_n, \psi_n),$$

где $f(\varphi_n, \psi_n)$ - аппроксимирующая функция.

На рис. 1.1 в левой части приведён профиль распределения излучения ЯН по углу места (по вертикали). Эксперименты подтверждают плавный характер уменьшения радиационной температур от линии горизонта к зениту.

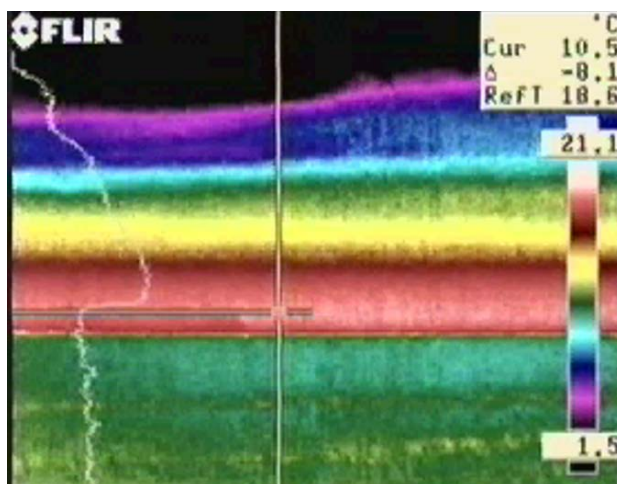


Рисунок 1.1 – Тепловизионное изображение пригоризонтной области моря, полученное ТВИ FLIR 640 в осенних условиях

В видимом и ИК диапазонах дымки над горизонтом проявляются по-разному. Вклад аэрозольной дымки в собственное излучение небосвода пропорционален концентрации частиц и эквивалентной длине оптического пути, т.е. распределение яркости по углу места связано с «высотой однородной атмосферы H_p ». Для численных оценок удобно воспользоваться несколько модифицированным выражением функции Чэпмена $Ch(\varphi_H)$ и значениями коэффициента аэрозольного ослабления атмосферы β для различных метеорологических дальностей видимости (МДВ). Эмпирическую связь между значениями коэффициента аэрозольного ослабления атмосферы β для различных метеорологических дальностей видимости в видимом диапазоне и в ИК "окнах прозрачности" атмосферы можно получить экспериментально, либо расчётным путем с использованием спектральных величин. В качестве конечной формулы для инженерных расчётов углового профиля нисходящего излучения ясного небосвода можно использовать выражение [5]:

$$L_H(\varphi_H, \psi_H) = L^o(T_B) - [L^o(T_B) - L_H(\varphi_H = 0, \psi_H)] f(\varphi_H, \psi_H) = L^o(T_B) - \Delta L_{B3} (\cos \varphi_H)^{0.05 + 0.025e + 0.05 \sqrt{e}} \exp\{-k Ch(\varphi_H)\},$$

$$\Delta L_{B3} = [L^o(T_B) - L_H(\varphi_H = 0)],$$

где e – упругость водяного пара в мб, значения $Ch(\varphi_H)$ приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Численные значения $Ch(\varphi_H)$

φ_H	89,5	89	88	87	86	84	82	80	75	70	65	60
Ch	31,2	24,8	17,7	13,3	10,4	6,87	4,87	3,59	1,81	0,9	0,45	0

Значения коэффициента аэрозольного поглощения излучения k приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Коэффициент аэрозольного поглощения

МДВ,	3 - 5 мкм	3 - 5 мкм	8 - 14 мкм	8 - 14 мкм
км	аэрозоль морской	аэрозоль континент	аэрозоль морской	аэрозоль континент
5	0,443	0,083	0,168	0,081
6	0,358	0,072	0,146	0,070
8	0,307	0,057	0,116	0,056
10	0,258	0,048	0,098	0,047
13	0,213	0,040	0,081	0,039
15	0,190	0,036	0,072	0,035
20	0,157	0,029	0,059	0,029

В пределах спектральных «окон прозрачности» атмосферы функции $f(\varphi_n)$ отличаются за счёт селективного характера излучения аэрозолей, причём отличие для морских аэрозолей заметнее, чем для континентальных. Общая тенденция заключается в относительном уменьшении излучения неба над горизонтом с увеличением длины волны электромагнитного излучения. В одних и тех же условиях излучение небосвода в диапазоне 8–14 мкм уже при 89° меньше $L^\circ(T_b)$ на столько же, на сколько в диапазоне 3–5 мкм при 84° . Различие значений коэффициента аэрозольного поглощения в "окнах прозрачности" атмосферы является физической предпосылкой наличия в совокупности спектральных характеристик оптических полей целей и фонов устойчивых отличительных признаков при их наблюдении на фоне неба и моря.

Тип аэрозоля не относится к количественно измеряемым параметрам условий наблюдения, поэтому разделение на "морской и континентальный" носит достаточно условный характер [4]. Это различие наиболее существенно для диапазона 3–5 мкм, где, например, значение $f(\varphi_n = 82^\circ)$ может отличаться в 3 раза в зависимости от происхождения дымки. Динамика суточных и сезонных выносов аэрозолей с берега в море и с моря на берег может существенным образом сказаться на повторяемости результатов измерений при натурных исследованиях. Особенно нестабильны при натурных исследованиях ситуации, связанные с вечерними и утренними наблюдениями, когда происходит зарождение или деградация дымок над морской поверхностью, причём из-за темноты визуально дымки не фиксируются.

Уменьшение влажности воздуха делает угловой профиль $f(\varphi_n)$ несколько круче у горизонта. Так, в диапазоне 3–5 мкм при 55% влажности при $\varphi_n = 89^\circ$ $L_n(\varphi_n, \psi_n)$ меньше $L^\circ(T_b)$ на такую же величину, как при 95% влажности при $\varphi_n = 86^\circ$. На практике изменения влажности связаны с изменениями

температуры воздуха. При постоянной относительной влажности 95% с уменьшением T_v увеличиваются значения $f(\varphi_n)$ (из-за уменьшения абсолютного содержания водяного пара). Так, при $\varphi_n = 84^\circ$ значения $f(\varphi_n)$ для диапазона 8–14 мкм уменьшаются примерно в 3 раза при увеличении T_v от 273 К до 293 К. Однако общий ход углового распределения $L_n(\varphi_n, \psi_n)$ зависит от T_v более сложным образом в силу того, что с увеличением температуры воздуха увеличивается величина $\Delta L_{вз} = [L^\circ(T_v) - L_n(\varphi_n = 0)]$.

Влияние метеовидимости в наибольшей степени заметно вблизи горизонта, и при $\varphi_n = 84^\circ$ ухудшение МДВ от 20 км до 5 км уменьшает $f(\varphi_n)$ примерно в 7 раз в диапазоне 3–5 мкм и примерно в 3 раза в диапазоне 8–14 мкм. При более близких к зениту углах визирования МДВ влияет на $L_n(\varphi_n, \psi_n)$ меньше, но существенно - на величину воспринимаемого на уровне моря ИК - излучения неба из зенита. Очевидно, что с уменьшением МДВ повышается его яркостная температура и уменьшается величина $\Delta L_{вз} = [L^\circ(T_v) - L_n(\varphi_n = 0)]$.

Для расчётов диапазон возможных значений яркостной температуры излучения небосвода из зенита выбирается от 140 К до 260 К в зависимости от метеоусловий.

Излучение облачного небосвода в общем случае является многомерным пространственно-временным нестационарным случайным процессом. Найти обобщённые и достаточно удобные описания характеристик оптического поля неба при частичной облачности не удаётся. На практике достаточно использовать простейшую модель излучения неба при переменной (частичной) облачности, когда участки ясного небосвода чередуются с участками, описываемыми как при сплошной низкой облачности. Для дальнейших прикладных исследований наибольший интерес представляет величина, характеризующая вероятность $c(\varphi_n, \psi_n)$, с которой в направлении визирования φ_n, ψ_n наблюдается участок ясного небосвода, и величина $p = 1 - c(\varphi_n, \psi_n)$, характеризующая вероятность наблюдения облака под теми же углами (φ_n, ψ_n) . Выражение для $c(\varphi_n, \psi_n)$ может быть получено из библиографических источников, однако в большинстве из них рассматриваются модель плоскопараллельной атмосферы с однотипной облачностью и одинаковой высотой нижней границы облаков. Строгое выражение для осреднённой по рассматриваемой акватории или ландшафта вероятности визирования участка ЯН при координатах линии визирования (φ_n, ψ_n) достаточно громоздко и включает такие параметры, которые определяются с большими погрешностями. Поэтому целесообразно использовать упрощённые формулы, позволяющие вычислять значения потоков противоизлучения вблизи поверхности с погрешностями не хуже 3%. Эти формулы учитывают вертикальные размеры облаков и описывают зависимость вероятности $c(\varphi_n, \psi_n)$ от абсолютной облачности n_o [5], сведения о которой обобщены в справочниках для всех районов Мирового океана.

$$c(\varphi_n, \psi_n) = \{1 - n_o\}^J;$$

$$J = [1 + k \operatorname{tg} \varphi_n^2]^{0.5},$$

где k – отношение вертикальной мощности облаков к их диаметру ($k = 0,6 - 1,5$). Количество абсолютной облачности n_o , получаемое проектированием облаков на горизонтальную поверхность (например, по данным метеоспутниковой фотографии), связано с балльностью (количеством) относительной облачности n , определяемой непосредственно в районе наблюдения как «доля закрытости облаками воображаемой полусферы с центром в точке наблюдения»: $n = n_o + 0,8(1 - n_o)n_o^{1,8}$ или, по другим источникам: $n = n_o + 0,5(1 - n_o)n_o$.

Из приведённых выражений видно, что вероятность наблюдения участка ЯН в разрывы между облаками резко падает с приближением линии визирования к горизонту, и, например, при балльности облачности 1 балл ($n \geq 0,1$) начиная с углов $\varphi_n \geq 85^\circ$ вероятность наблюдения участка безоблачного небосвода уменьшается до $s(\varphi_n, \psi_n) \leq 0,6$. Это хорошо известное явление "кажущегося увеличения облачности к горизонту", упоминаемое в руководствах для метеослужб. На рис. 1.1 на тепловизионном изображении, полученном LWIR ТВП типа FLIR 680, видно, что разрывная облачность по мере приближения линии визирования к горизонту воспринимается как сплошная.

Излучение отдельных облаков отличается большой изменчивостью. В диапазоне 3–5 мкм в дневных условиях излучение отдельного облака зависит от положения Солнца и наблюдателя, вследствие чего яркость облака в дневных условиях уверенно можно оценить лишь в рамках граничных значений. Собственное излучение облаков определяется их оптическими характеристиками и эффективной температурой излучения, которые также обладают пространственной и временной изменчивостью. Наибольшее влияние на распределение нисходящего излучения небосвода оказывают кучевые облака, имеющие высоту нижней границы от 300 м до 3000 м [6]. Облака других типов расположены выше (от 5 000 м до 10 000 м) и в меньшей степени влияют на яркость небосвода, так как их излучательная способность существенно уменьшается с высотой. Она составляет от 0,41 до 0,64 для уровней по высоте с давлением 300 мб. Эффективная температура их излучения близка к 230 К, а протяжённый слой атмосферы сглаживает у поверхности земли их контрастное излучение. Размеры кучевых облаков лежат в пределах от 200 м до 3 000 м в зависимости от стадии существования, причём отношение вертикального размера к горизонтальному составляет от 0,6 до 1,5. Равномерное уменьшение температуры воздуха с высотой (- 0,65 градуса/100 метров) на границе облака претерпевает скачок в связи с процессами конденсации и испарения водяных капель. Допустимо считать при грубых оценках, что усреднённая по всей видимой проекции эффективная температура излучения кучевого облака на 1–10 градусов ниже температуры излучения воздуха у поверхности.

Оптические свойства облаков определяются размерами и концентрацией частиц и характеризуются диффузным характером их отражения и излучения

ИК радиации. Можно принять, что в диапазоне 3–14 мкм излучательная способность кучевого облака составляет от 0,7 до 0,9.

1.2 Статистические характеристики излучения небосвода

Оптическое поле светорассеивающей - поглощающей - излучающей среды, какой является атмосфера, нелинейно связано с параметрами, которые используются в настоящее время для её описания. Поэтому основным формальным аппаратом, связывающим статистические параметры атмосферы и характеристики её ИК излучения, является совокупность способов нелинейных преобразований случайных функций. Для связывания временной и пространственной структур оптических полей небосвода принято применять гипотезу "замороженности", согласно которой «пространственная картина случайного поля движется со скоростью ветра и не меняется во времени» [6]. Другое упрощение связано с попытками представить случайный процесс - оптическое поле небосвода - в виде нормального случайного процесса, чтобы иметь возможность выразить высшие моменты распределения через моменты первых двух порядков, в то время как характерная особенность нелинейных преобразований для реальных негауссовых распределений заключена в том, что моменты преобразованного процесса включают в себя более высокие моменты преобразуемого процесса. Оправданием применимости таких приёмов служит то, что "связь между параметрами радиации и облачности линейная или близкая к линейной. Также линейны преобразования параметров радиации и облачности, связанные с осреднением по времени или по пространству" [5,6]. Однако даже при таких упрощениях выявление взаимосвязей между различными параметрами облачности, так же, как и между различными параметрами оптического поля небосвода, в настоящее время является самостоятельной задачей.

При всей обширности литературы, посвящённой статистическим характеристикам оптического поля небосвода, при выборе конкретных данных для выработки алгоритмов обработки сигналов или для оценки эффективности использования ТВП, приходится выбирать из множества описаний конкретных ситуаций, наиболее подходящую для требуемой оценки, а не исходить из обобщённой модели, уточняя последовательно особенности фоноцелевой ситуации для нужного случая. Из-за этого выводы и рекомендации справедливы только в рамках выбранной фоноцелевой ситуации, а при изменении фоновых условий точность прогнозов значительно снижается.

Основным параметром ИК излучения небосвода принимается энергетическая яркость L [Вт/см²ср], а основным параметром облачности - балльность кучевой облачности n , как доля закрытости небосвода облаками нижнего яруса. В частности, из всей совокупности данных используются следующие характеристики интегральной энергетической яркости нисходящего излучения в спектральных участках 3,4–4,2 мкм; 4,4–5,1 мкм и 7,8–13,6 мкм при различных углах визирования и в различных условиях (облачности):

- законы распределения ИК - излучения облачного и ясного небосвода;

- пространственные и временные энергетические спектры флуктуаций излучения;
- угловые распределения дисперсии флуктуаций излучения;
- автокорреляционные и взаимно корреляционные функции флуктуаций ИК излучения.

1.2.1 Закон распределения флуктуаций яркости небосвода

Оптическое поле небосвода в наиболее полной мере может быть определено в вероятностном смысле с помощью многомерной плотности вероятности флуктуаций излучения. Практически оперируют набором одномерных законов распределения энергетической яркости, каждый из которых применим к определённым масштабам процесса и условиям наблюдения.

Ясный небосвод

Флуктуации яркости ЯН в большинстве ситуаций приближённо подчиняются нормальному закону. Амплитуда флуктуаций яркости обычно в несколько раз меньше среднего значения, поэтому даже небольшие изменения средней яркости вызывают неоднородность фона и маскировку статистических характеристик флуктуаций малого масштаба более мощными крупномасштабными вариациями излучения. Некоторое влияние на распределение флуктуаций яркости ЯН оказывает рассеянное на аэрозолях солнечное излучение, которое, однако, в области длин волн более 5 мкм составляет около 1% от собственного излучения атмосферной трассы. Характерный для видимого диапазона «нимб» вокруг Солнца, обусловленный, по большей части, рассеянием излучения на аэрозолях, в ИК области существенно уже. Он не оказывает заметного влияния на уширение области ясного небосвода, в пределах которой ТВП подвержены такой же ослепляющей засветке, как ТВП в подобных условиях, однако приводит к присутствию в тепловизионном изображении крупных фрагментов «чернее чёрного» (рис. 1.2), где наблюдение малоконтрастных объектов невозможно.

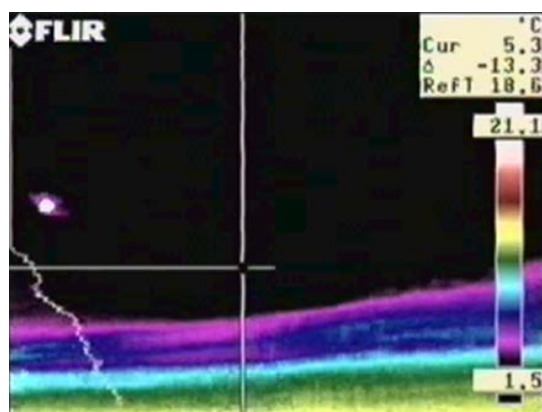


Рисунок 1.2 – ИК изображение Солнца и его «нимба» в диапазоне 8–12 мкм, полученное ТВП FLIR 680

Хотя солнечный ореол имеет относительно малые размеры, след от солнечной засветки оказывает маскирующее действие на обнаружение воздушных целей (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Тепловизионное изображение получено ТВП с микроболومترическим МФПУ АО «Циклон» и заимствовано из рекламных материалов предприятия

Переменная облачность

Экспериментальные наблюдения показывают, что в непосредственной близости к горизонту облачный небосвод часто обладает существенными флуктуациями ИК излучения, в то время, как подавляющая часть неба может быть отнесена к достаточно "спокойным" условиям ЯН. При этом, как показывают измерения, функции плотности вероятности флуктуаций имеют значительные отклонения от нормального закона, причём наблюдается разносторонняя асимметрия гистограмм в коротковолновой и длинноволновой областях участка 2-14 мкм. Существует целый ряд эвристических выражений для закона распределения яркости небосвода при наличии облаков, однако все они не имеют достаточного экспериментального подтверждения. Натурные данные с уверенностью можно привести лишь для узкого круга условий, в частности, в спектральной области 8-12 мкм для слоистой облачности характерен нормальный закон, а для высококучевых облаков и облаков вертикального развития - двух- и трёх-модальные распределения. В области 2-5 мкм функция распределения аппроксимируется логарифмически нормальным законом, а в видимой области она сильно отличается от нормального закона, и для кучевой области имеет бимодальную форму. При наличии солнечной подсветки распределение амплитуд флуктуаций яркостей небосвода в области 8-12 мкм отличается от распределения в области 2-5 мкм. Если в области собственного излучения закон близок к нормальному, то для области преобладания рассеянного солнечного излучения закон ближе к экспоненциальному. Если же собственное и рассеянное излучение соизмеримы по величине, то плотность вероятности можно аппроксимировать плотностью вероятности суммы двух процессов, имеющих нормальное и экспоненциальное

распределения. Распределения флуктуаций по длительности во всех диапазонах близки и аппроксимируются как экспоненциальным законом, так и другими.

1.3 Пространственные и временные энергетические спектры флуктуаций ИК излучения небосвода

Пространственные и временные энергетические спектры флуктуаций излучения небосвода наиболее часто упоминаются при описании оптических полей фона из-за того, что они непосредственно и в явном виде входят в основные формулы при расчётах эффективности использования ТВП. Кроме того, эта характеристика достаточно доступна для инструментального определения с оцениваемой погрешностью. Однако результаты измерений обладают двумя существенными недостатками, главный из которых связан с исходным осреднением (пространственным или временным) регистрируемого случайного процесса измерительным прибором, вследствие чего полученные данные нельзя применить для прогнозов в более высокочастотных областях энергетических спектров, то есть для ТВП с лучшим пространственным разрешением. Второй недостаток связан с тем, что наиболее точно оцениваются нормированные спектры, в то время как погрешность определения величин, участвующих в нормировке, может быть весьма большой. Поэтому оказалось, что большинство приведённых в литературе данных трудно применить для современных ТВП, поскольку эти приборы обладают меньшими мгновенными полями зрения (лучшим угловым пространственным разрешением), чем использовавшиеся при измерениях статистических характеристик излучения фонов.

Аппроксимация временных спектров энергетической яркости ИК излучения небосвода по результатам измерений произведена [5] с помощью выражения, где f [Гц]:

$$G(f) = a + b \cdot \exp(-\ln(f/c)^2 / (2 \cdot d^2)).$$

Значения параметров аппроксимации приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Коэффициенты аппроксимации

Диапазон	k	a	b	c	d
3,1–4,7 мкм	0,987	- 0,0014	0,2114	0,00761	0,82974
8 - 14 мкм	0,97	- 0,0023	0,2276	0,00906	0,70974

Следует отметить, что измеренные одновременно профили энергетической яркости облаков (реализации по времени) не совпадают в MWIR и LWIR «окнах прозрачности» атмосферы ни днём, ни ночью, хотя общие размеры, которые оценивались по амплитуде сигнала, приблизительно равны. Так же не совпадают измеренные в MWIR и LWIR радиационные температуры излучения облаков и ясного небосвода ночью [5]. Радиусы

автокорреляции излучения одного и того же облака различаются для участков 3,1–4,7 мкм и 7,5–14 мкм весьма заметно днём и близки между собой без воздействия солнечной подсветки ночью.

Анализ экспериментальных данных показал, что добиться схожести одновременно и вида энергетических спектров, и автокорреляционных функций у измеренной реализации и аппроксимирующей её «телеграфного сигнала» не удаётся. Взаимные корреляционные функции и взаимные энергетические спектры также не позволяют сделать обобщения. Поэтому аппроксимации с помощью последовательностей прямоугольных импульсов ИК излучения кучевых облаков как временного случайного процесса («телеграфного сигнала») могут быть справедливы только в качестве самого грубого приближения, пригодного лишь для качественных оценок.

Измеренные параметры пространственных энергетических спектров излучения пригоризонтного фона в диапазоне 7,5–14 мкм [5] приведены в таблице 1.4, где помимо собственно небосвода приведены результаты измерений в пригоризонтной области моря непосредственно под линией горизонта для анализа характера изменения статистических характеристик ИК излучения фона при изменении типа подстилающей поверхности.

Таблица 1.4 – Параметры пространственных энергетических спектров излучения пригоризонтного фона в диапазоне 7,5–14 мкм

Угол относительно горизонта, градус	Среднее значение энергетической яркости, Вт/см ² ср	Среднеквадратическое значение флуктуаций яркости (Вт/см ² ср) ²	Нормированная спектральная плотность на пространственных частотах, 1/градус		Радиус автокорреляции на уровне 0,001 в угловых минутах
			0,0976	2,207	
12	$3,69 \cdot 10^{-3}$	$9,35 \cdot 10^{-4}$	0,382	$4,2 \cdot 10^{-5}$	240
8	$3,71 \cdot 10^{-3}$	$8,29 \cdot 10^{-4}$	0,314	0,0018	340
6	$4,12 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-4}$	0,345	$8,2 \cdot 10^{-5}$	138
4	$4,16 \cdot 10^{-3}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	0,36	$1,1 \cdot 10^{-4}$	196
2, небо	$4,83 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	0,341	$1,8 \cdot 10^{-5}$	167
0, горизонт	$5,345 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	0,093	0,021	40
- 1, море	$5,17 \cdot 10^{-3}$	$1,52 \cdot 10^{-5}$	0,248	$1 \cdot 10^{-5}$	32
- 2	$5,13 \cdot 10^{-3}$	$6,01 \cdot 10^{-5}$	0,349	$1,2 \cdot 10^{-3}$	392
-3	$5,23 \cdot 10^{-3}$	$8,35 \cdot 10^{-5}$	0,387	$2,5 \cdot 10^{-4}$	374
-4	$5,13 \cdot 10^{-3}$	$2,44 \cdot 10^{-5}$	0,24	$4,9 \cdot 10^{-3}$	
-5	$5,41 \cdot 10^{-3}$	$7,88 \cdot 10^{-5}$	0,366	$1,66 \cdot 10^{-3}$	
-6	$5,22 \cdot 10^{-3}$	$3,54 \cdot 10^{-5}$	0,121	$2,01 \cdot 10^{-2}$	

При переходе линии горизонта изменяются не только средние значения яркости фона, но и другие статистические характеристики флуктуаций яркости: автокорреляционная функция и пространственный энергетический спектр. Характер распределения флуктуаций становится ближе к «белому шуму» с более широкополосным спектром и малым радиусом автокорреляции.

Аппроксимация пространственных спектров энергетической яркости ИК излучения морского пригоризонтного фона произведена [5] с помощью выражения:

$$G(\nu) = a + b \cdot \exp[-\ln(\nu/c)^2 / (2 \cdot d^2)],$$

где ν – [1/угловой градус]. Приведенная формула аппроксимации пространственных спектров энергетической яркости дает наименьшие отклонения от экспериментальных данных [5]. Параметры аппроксимационных формул приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Параметры аппроксимации

Угол места относительно горизонта, градусы	Дисперсия энергетической яркости, (Вт / см ² ср) ²	Среднее значение энергетической яркости, Вт/см ² ср	k	a	b	c	d
+ 12	$8,75 \cdot 10^{-7}$	$3,69 \cdot 10^{-3}$,939	0,0082	,327	,0987	,250
+ 8	$6,87 \cdot 10^{-7}$	$3,71 \cdot 10^{-3}$,956	0,011	,249	,0987	,490
+ 6	$5,41 \cdot 10^{-8}$	$4,12 \cdot 10^{-3}$,710	0,0098	,276	,151	,255
+ 4	$6,74 \cdot 10^{-8}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$,998	0,0087	,354	,0974	,465
+ 2(небо)	$4,14 \cdot 10^{-8}$	$4,827 \cdot 10^{-3}$,972	-0,006	,327	,099	,605
- 1(море)	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$5,17 \cdot 10^{-3}$,926	0,0143	,206	,094	,335
- 2	$3,61 \cdot 10^{-9}$	$5,17 \cdot 10^{-3}$,966	0,136	,437	,099	,430

Вместе с тем возможны [5] другие аппроксимации высокочастотной части энергетических пространственных спектров яркости ИК излучения пригоризонтной области небосвода и ВМП более простыми выражениями вида

$$G(\nu) = (a + b / \nu^p)^q$$

где ν – [(угловой градус)⁻¹]. В частности, для высокочастотной части пространственного спектра тех же реализаций параметры аппроксимационных выражений приведены в таблице 1.6.

Дисперсия флуктуаций фонового излучения уменьшается с приближением к линии горизонта, а при переходе через линию раздела «небо – море» параметры аппроксимационных выражений изменяются более резко, чем при таких же изменениях угла наблюдения, но в области только небосвода или в области только моря. Дисперсия флуктуаций облачного неба возрастает с увеличением угла возвышения, а её наибольшие значения наблюдались [5] при балльности облачности 0,4–0,6 и углах возвышения более 50°. Радиус корреляции также возрастал с приближением к зениту, однако его величина на уровне 0,5 не превышала 2,5°. Усреднённые коэффициенты взаимной корреляции флуктуаций яркости в диапазонах 1,44–1,74 мкм и 8,4–12,5 мкм значимы при наличии солнечной подсветки, и при направлениях на Солнце и на

облако в (30° - 60°); (60° - 90°) и более 90° они составляют соответственно 0,53; 0,58 и 0,78.

Таблица 1.6 – Параметры аппроксимационных выражений

Угол места относительно горизонта, градусы	Дисперсия энергетической яркости, (Вт / см ² ср) ²	Среднее значение энергетической яркости, Вт / см ² ср	k	a	b	p	q
+ 12	$8,75 \cdot 10^{-7}$	$3,69 \cdot 10^{-3}$,992	0,041548	,00529	2	2
+ 8	$6,87 \cdot 10^{-7}$	$3,71 \cdot 10^{-3}$,981	0,00242	,00322	2	1
+ 4	$6,74 \cdot 10^{-8}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$,941	-0,0962	,04538	1	1
+ 2(небо)	$4,14 \cdot 10^{-8}$	$4,83 \cdot 10^{-3}$,922	-0,0767	,04414	1	1
- 1(море)	$2,3 \cdot 10^{-10}$	$5,17 \cdot 10^{-3}$,902	0,11084	,003293	2	2
- 2	$3,61 \cdot 10^{-9}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$,998	-0,0008	,057782	1	2
- 3	$6,98 \cdot 10^{-9}$	$5,23 \cdot 10^{-3}$,951	-0,2489	,0845	1	2
- 4	$5,83 \cdot 10^{-9}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$,964	-0,411	-0,454	1	1

Приведённый набор сведений по параметрам статистических характеристик фонового излучения при всей неполноте позволяет ориентироваться при расчётных оценках эффективности использования ТВП в условиях фоновых помех для различных фоноцелевых ситуаций. Кроме того, существует возможность оценки погрешностей в таких оценках, сделанных на основании эвристических моделей фоновых помех.

2 ИК излучение Земной поверхности и объектов естественного ландшафта

Оптическое поле земной поверхности и естественных ландшафтов в ИК диапазоне формируют три основных физических фактора:

- солнечная радиация;
- оптические характеристики подстилающих поверхностей и объектов на их фоне;
- теплообмен наблюдаемых объектов с окружающей средой, зависящий от наличия или отсутствия в них выделяющих тепло элементов и устройств.

В современной литературе оптические свойства природных ландшафтов и объектов на их фоне описываются на основе эмпирических натурных исследований. «Полные функциональные описания вариаций спектральных коэффициентов яркости (СКЯ) природных объектов от различных факторов принято называть каталогами СКЯ. Справочники или иные описания, не содержащие полной информации о зависимости СКЯ от факторов, влияющих на их изменчивость, и не обеспеченные статистически значимыми рядами исходных данных, целесообразно называть атласами СКЯ» [7]. При том, что для каждой конкретной ситуации можно создать достаточно корректную модель формирования контрастного ИК излучения естественных образований и антропогенных объектов, наблюдаемых с помощью ТВП, бесконечное сочетание задач и условий наблюдения заставляет оперировать стохастическими понятиями при описании оптических полей и характеристик содержательной информации, которые извлекаются из тепловизионных изображений. Все известные из литературы работы по исследованию оптических характеристик наземных ландшафтов составляют атласы и справочники, так как общепринятых обобщённых аналитических моделей формирования наземных ИК сюжетов на основе априорного задания количественных параметров условий наблюдения до настоящего времени не создано. Классификации оптических характеристик ландшафтов в справочниках и атласах удобны для формирования баз данных или для создания компьютерных имитационных моделей [8] как обозначения групп объектов, сходных по некоторому признаку, но не дают практических преимуществ с точки зрения понимания содержательной структуры тепловизионного изображения и интерпретации результатов оперативных тепловизионных измерений, повышающих достоверность прогнозов, осуществляемых на основе этих данных. Из современных отечественных монографий, в наибольшей степени обобщающих накопленные сведения об оптической характеристике ИК излучения земной поверхности и объектов естественного ландшафта применительно к задачам использования ТВП, следует назвать [4, 8]. Для ознакомления с некоторыми приёмами анализа тепловизионных изображений земных ландшафтов с целью выделения содержащейся в них содержательной информации, можно согласиться с [4] стр. 395, по установлению условной классификации, при которой «на практике

всё многообразие реальных фоновых ситуаций можно описать в виде комбинаций конечного числа «элементарных» фоновых ансамблей типа «степь», «поле», «вода» «лес» и т.д. ... При этом микроструктура высоты типовых фоновых ансамблей может быть описана моделями однородных случайных полей с заданными статистическими характеристиками. Реальная фоновая ситуация представляет смешанный фоновый ансамбль и моделируется комбинацией описания макро- и микроструктуры поля высот неоднородностей местности».

Тем не менее, целесообразно привести имеющиеся сведения о количественных характеристиках теплового поля характерных сюжетов, рассматривая их с позиций использования для выявления содержательной структуры тепловизионного изображения при решении конкретных задач. Из современных доступных библиографических источников следует указать на [8], содержащий обобщённые результаты исследований спектральной и интегральной энергетических яркостей ИК излучения элементов суши (раздел 2.4.6) и объектов на её поверхности (раздел 3). В качестве примера в таблице 2.1 приводятся заимствованные из [8] данные о контрастах радиационных температур объектов $\Delta T_{об}$, наблюдаемых на горизонтальных трассах визирования при температуре воздуха T_v в разное время суток.

Таблица 2.1 – Контрасты радиационных температур объектов $\Delta T_{об}$

Время	16 ⁰⁰	17 ³⁰	19 ³⁰	23 ⁰⁰	03 ³⁰	06 ³⁰	07 ³⁰	09 ⁰⁰	10 ³⁰	12 ⁰⁰
$T_v, ^\circ\text{C}$	+4	0	-6	-9	-12	-15	-9	-3	0	+3
Металлическая мачта линии электропередач на фоне пригоризонтного ландшафта на расстоянии 300–350 м	4,8 14,7	-4,2 +4,2	-6,3 +4,2	-4,2 +4,2	-4,2 +3,4	-2,5 +2,5	-4,2 +8,4	+6,3 8,4	+4,2 8,4	+4,2 8,4
Бетонная мачта линии электропередач на фоне пригоризонтного ландшафта и пригоризонтной части неба на расстоянии 300–350 м	21 23,5	12,6 16,8	6,3 16,8	3,4 8,4	1,7 6,3	2,5 5,9	2,5 12,6	8,4 18,9	12,6 21	14,7 25,2
Провода линии электропередач под напряжением на фоне неба, крон и стволов деревьев на расстоянии 70–150 м	4,2 10,6	2,1-5,7	2,1 4,2	2,1 3,4	1,7 3,4	1,7 3,4	0,9 4,2	3,4 4,2	4,2 7,6	3,4 7,6
Отдельно стоящие плотные группы деревьев и деревья лиственных пород на фоне пригоризонтного неба на расстоянии 200–300 м	8,4 23	6,3 20,5	12,6 14,6	10,5 12,6	8,4 12	2,1 12	8,4 13,2	18,9 14,7	19,2 21	25,4 22
Строение неотопляемое деревянное на фоне лиственного леса и пригоризонтного неба на расстоянии 300 м	8,4 31	6,3 16,8	4,2 16,9	4,2 12,6	4,3 12	4,3 16,8	4,2 32	4,2 42	8,4 42	8,4 43

Принято объединять накопленные сведения о характеристиках излучения земных ландшафтов в две группы: при наблюдении «сверху», то есть с воздушных и космических носителей ТВП, и при наблюдении с наземных носителей в горизонтальном направлении и в направлении на небосвод. Обычно эти условия наблюдения указываются при описании полученных данных.

Первым шагом при интерпретации тепловизионного изображения является формулировка задачи, стоящей перед оператором. Примерами таких формулировок могут быть: ориентация на местности, обнаружение замаскированного объекта или его распознавание, измерение радиационной температуры объекта и т.п. Для решения каждой из таких задач оператору необходимо тепловизионное изображение, содержащее набор признаков объекта, характерный именно для данной задачи.

Ориентация на местности в неявном виде присутствует во всех задачах и также в неявном виде используется оператором при интерпретации результатов наблюдений. Наиболее очевидным признаком цели является её наблюдение выше или ниже линии горизонта. При решении однотипных задач резко сужается круг возможных вариантов интерпретации содержания наблюдаемого сюжета в зависимости от того, наблюдается объект на фоне небосвода или на фоне поверхности земли.

Для большинства земных ландшафтов характерным является наличие на видимой границе раздела «небо/земля» растительности того или иного вида. При расположении ТВП на уровне поверхности Земли дальность до этого наиболее удалённого фрагмента ландшафта относительно невелика, в то время как длина атмосферной трассы сразу над этим фрагментом (подстилающая поверхность – небосвод) может составлять (в эквиваленте) более ста километров. Из-за этих геометрических особенностей формирования собственного ИК излучения пригоризонтной области ландшафта перепад яркости при переходе линии визирования от небосвода к земле определяется соотношением температур воздуха у самой поверхности земли, совпадающей с температурой излучения указанной растительности, и усреднённой температурой атмосферы по линии визирования небосвода над границей раздела.

Фоновые образования на небосводе имеют относительно большие размеры, существенно отличающиеся от размеров наблюдаемых антропогенных объектов, поэтому целеподобных отметок естественного происхождения (за исключением птиц) на фоне небосвода оператор, как правило, не наблюдает.

Проблемы с обнаружением и сопровождением воздушных объектов связаны с малыми значениями контрастных сигналов от них из-за большой протяжённости атмосферной трассы. Профиль видимого раздела «небо/земля» в тепловизионном изображении является наиболее важным ориентиром для оператора при оперативном анализе обстановки. Однако в реальных условиях над ним, так же, как и в морских условиях, часто наблюдается изображение

слоёв дымки разных уровней, маскирующих истинную границу видимого раздела «небо/земля».

При наблюдении на фоне земной поверхности условия для интерпретации тепловизионного изображения изменяются существенным образом из-за большого количества целеподобных отметок. Для многих применений ТВП решение об обнаружении цели совпадает с решением о её выделении из совокупности целеподобных отметок, то есть с её распознаванием.

Обнаружение объектов трактуется [9] как «установление факта наличия в поле зрения ТВП некоего излучателя, отличающегося по радиационной температуре от близлежащего равноизлучающего фона». При интерпретации тепловизионной картины применительно к задаче обнаружения объекта (как правило, человека или антропогенного объекта) главное значение имеет превышение контраста яркости его изображения над изображениями других деталей сюжета. Поэтому акцент в базах данных делается на значение теплового контраста, усреднённое по наблюдаемой площади объекта. Определённым ориентиром количественных значений может служить «стандартная оптическая модель НАТО» [4], стр. 357 (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Стандартная оптическая модель НАТО

№	Объект	Габариты, м	Тепловой контраст, К
1	Танк	2,3 · 2,3	2
2	Человек	0,75 · 0,75	2,5
3	Вертолёт	3 · 3	3
4	Корабль	90 · 9	10
5	Самолёт - истребитель	3,5 · 3,5	10

Тепловой контраст объектов в полевых условиях зависит от наличия на их поверхности росы и пыли, которые могут изменить температуру объектов в утренние часы на 1–5 К. Все оптические параметры зависят от состава покрытия, технологии его нанесения, угла визирования, степени загрязнения, запыления и увлажнения – от естественного разброса характеристик одного и того же по наименованию материала. Удобно характеризовать подстилающую поверхность ландшафта величиной её коэффициента излучения ϵ . Ориентируясь на перспективные оптико-электронные приборы, неизбежно многоспектральные, объединяющие каналы видимого и ближнего ИК диапазонов с MWIR и LWIR ТВП, в таблице 2.3 дополнительно приводятся сведения из фоно-целевых данных видимого диапазона [4].

В видимой области для описания оптических характеристик объектов традиционно применяется величина «альбедо» A_λ . Под альбедо поверхности понимают [7] «отношение восходящего потока излучений $\Phi_\lambda \uparrow$ к нисходящему

$\Phi_{\lambda\downarrow}$, то есть, $A_{\lambda} = \Phi_{\lambda\uparrow} / \Phi_{\lambda\downarrow}$. В случае ортотропных поверхностей (диффузно отражающие падающее на них излучение равномерно во всех направлениях со спектральным коэффициентом яркости (СКЯ) r_{λ} , в частности, пески, рыхлый снег) $\Phi_{\lambda\uparrow} = \pi B_{\lambda}$ и $A_{\lambda} = r_{\lambda}$ ».

Таблица 2.3 – Обобщённые коэффициенты излучения поверхностей ландшафтов

№	Подстилающая поверхность ландшафта	Коэффициент излучения ε		Альбеде, ρ_s (видимый диапазон)
		3 – 5 мкм	8 – 12 мкм	
	Асфальт	0,88	0,95	0,45
	Бетон	0,88	0,92	0,45
	Кирпич красный	0,75	0,88	0,55
	Гравий	0,90	0,91	0,35
	Трава:			
	• зелёная	0,86	0,92	0,25
	• пожелтевшая	0,82	0,85	0,20
	Кустарник:			
	• зелёный	0,87	0,92	0,20
	• пожелтевший	0,82	0,85	0,20
	• без листьев	0,89	0,94	0,20
	Лес хвойный	0,90	0,94	0,15
	Песок:			
	• сухой	0,85	0,91	0,35
	• мокрый	0,97	0,97	0,20
	Грунт	0,88	0,92	0,30
	Снег	0,91	0,92	0,80
	Пашня	0,80	0,88	0,15
	Стерня	0,90	0,90	0,20
	Брезент зелёный	0,75	0,88	0,25

Разрыхление поверхности (почва, свежесвыпавший снег) уменьшает её отражательную способность, повышая диффузный характер излучения/отражения. Увеличение коэффициента излучения при этом может достигать [9], стр. 260 в LWIR диапазоне до $\Delta\varepsilon \sim 0,1$.

Задача обнаружения целей чаще всего фигурирует как основная в области военного приборостроения и в области охранных систем. Для этих применений характерно стремление обеспечить максимальную дальность обнаружения, из-за чего угловые размеры обнаруживаемых объектов столь малы, что процедура формально попадает в большую группу задач «обнаружения точечных целей на фоне внутренних шумов и внешних фоновых помех». Расчётные оценки характеристик проводятся с использованием величины «отношения сигнала к шуму», обобщённое определение которой имеет смысл отношения амплитуды полезного сигнала (составляющая полезной, содержательной информации в сигнале) к суммарной помеховой составляющей информации, формируемой приборными шумами ТВП и совокупностью фоновых помех (характеризуемых СКЗ флуктуаций фонового излучения).

Очевидно, что для разных задач и фоноцелевых ситуаций в категорию «фоновых помех» могут попадать разные естественные и антропогенные образования, при этом одни и те же объекты могут относиться к категориям «цель» и «помеха» в зависимости от решаемой оператором ТВП задачи.

Характеристики флуктуаций излучения фона (пространственно-временные) весьма важны для оценок длительности принятия оператором правильного решения об обнаружении и частоты ошибок первого и второго рода, а также для оптимизации алгоритмов автоматического выделения целей в присутствии естественных и организованных помех. Среднее квадратичное значение (СКЗ) флуктуаций фонового излучения σ экспериментально исследовалось в [9]. Значение σ равно:

$$\sigma = \sigma^* K_1 K_2,$$

где σ^* – СКЗ флуктуаций радиационной температуры фона в дневное время суток летом в безоблачную и безветренную погоду; $K_1 K_2$ – поправочные коэффициенты, учитывающие время года, и суток (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Поправочные коэффициенты

Фон	σ^*	Фон	σ^*
Пустыня	3 – 5	Горы	5 – 7
Лес, луг	1-2	Жнивье	0,5 – 1
Пашня	0,5 - 1	море	0,5 - 2,5

Месяц	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
K1	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1	0,9	0,7	0,6	0,5
час	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
K2	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7	0,9	1	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Анализ пространственных характеристик оптических полей фоновых образований в области небосвода и земных ландшафтов показывает, что они имеют, как правило, большие пространственные масштабы, то есть являются низкочастотными пространственно-временными помехами. Теоретические результаты оптимизации выделения точечных целей на фоне помех [3,4, 9–15] рекомендуют в качестве наиболее эффективного приборного способа подавления фоновых помех уменьшение мгновенного поля зрения ТВП, то есть увеличения его пространственной разрешающей способности δ . При прочих равных условиях ИК приборы с малыми значениями δ будут иметь преимущества с точки зрения защищённости от фоновых помех. Физическим ограничением этого параметра ТВП выступает турбулентность атмосферы.

Под термином «распознавание» понимают разного уровня приближения к факту отнесения обнаруженного объекта к категории объектов, имеющих общее функциональное назначение или другие близкие характеристики. По общей постановке распознавание является многоальтернативной задачей. На практике оператор всегда обладает дополнительной априорной информацией, полученной из других источников, или же делает предположения о возможном облике объекта распознавания. Это позволяет ему сформировать априорное представление о предполагаемом изображении объекта, который нужно выделить из совокупности похожих (оперативный «эталон»). Дальнейшая процедура сводится к сопоставлению с ним наблюдаемого изображения и вынесению решения о степени схожести. Часто достаточным уровнем распознавания является выделение сигнала от объекта из совокупности сигналов от внешних естественных и организованных помех, или, например, выделение изображения одного типа техники из совокупности изображений других объектов.

Заимствованная из Интернета (рисунок 2.1) демонстрация военного применения ТВП в качестве прицельного устройства вертолёт Апачи показывает, что часто единственным отличительным признаком цели является конфигурация контура его ИК изображения, в то время как амплитуды сигналов от фоновых помех соизмеримы с её тепловым контрастом.



Рисунок 2.1 – Тепловизионное изображение объекта бронетанковой техники в присутствии интенсивных оптических помех

Для решения задачи распознавания основным признаком является форма тепловизионного изображения объекта. При этом в разной степени важны контур объекта и полутонное изображение внутри контура, но флуктуации излучения фона имеют сравнительно малое влияние на достоверность и время принятия решения оператором. Приборы с малыми значениями δ также имеют преимущества, однако уже из-за более высокой информативности изображения объектов.

Для расчётных оценок прогнозов дальности распознавания объектов используется метод «эквивалентных штриховых мир» [2, 8–15]. Применительно к анализу информационной составляющей тепловизионных изображений наземных сюжетов следует указать, что принято вводить некоторые коэффициенты, призванные учесть усложнение процедуры распознавания объектов из-за наличия в тепловизионной картине изображения фоновых образований (помех). Наиболее подробно методика последовательного подбора соответствующих коэффициентов деградации значений «критерия Джонсона» (исходно полученных на равномерном фоне) по мере «усложнения фона» приведена в [8,9]. Как результат, можно указать, что требуемое для распознавания объекта количество штрихов эквивалентной тепловой миры может вырасти с 6 до 10 при появлении в изображении сложных фоновых помех.

Среди всего многообразия фоновых помех необходимо указать на специфические для ТВП MWIR и LWIR фоновые образования, которые могут выступать как помеха, затрудняющая правильную интерпретацию тепловизионного изображения объектов, или же как их дополнительный отличительный признак.

В условиях земных ландшафтов наблюдается явление, которое на тепловизионном изображении воспринимается как «тень от объекта». Традиционное понимание «тени от объекта» связано с наличием источника внешней подсветки наблюдаемого объекта. Поверхности, экранируемые объектом от этой подсветки, собственно, и определяются как «тень». При наблюдении стационарных объектов в ИК диапазоне естественное перемещение Солнца по небосводу обуславливает появление тепловых «теней», то есть областей, более «холодных» по отношению к рядом расположенным фрагментам ландшафта, освещённым и нагреваемым прямым излучением Солнца. Часто при этом процессы нагревания и выхолаживания фрагментов ландшафта заметно более инерционны, чем наблюдаемое в видимом диапазоне перемещение тени из-за естественного перемещения Солнца. По отдельным сведениям «отставание» контуров тени, связанной с процессами нагрева/выхолаживания, от контуров традиционной тени может достигать 15–30 минут.

На иллюстрации (рис. 2.2), заимствованной из Интернет–ресурса, рекламирующего Thermal Camera Axis Communication /APW Solution, видны «тепловые» тени от деревьев на земле. Это области поверхности, нагретые Солнцем меньше, чем другие участки, так как они экранированы от него достаточно длительное время. Идущие люди и едущие автомобили не создают такой тепловой «тени», поскольку естественный теплообмен не успевает «выхоладить» участки земли в тени от движущихся объектов. По этому признаку можно однозначно определить, что изображение получено в LWIR диапазоне. Однако под автомобилем видна тепловая неоднородность обратного знака. Она обусловлена рассеянием теплового излучения нижней части автомобиля на неровностях грунта в направлении наблюдателя.

Для ТВП, работающих в MWIR диапазоне, возникают условия наблюдения одновременно двух типов «теней», связанных с прямым

излучением Солнца: тепловые тени, связанные с нагреванием/выхолаживанием поверхности фрагментов ландшафта (как и в LWIR диапазоне), и тени, связанные с их экранированием от прямого излучения Солнца, которое отражалось бы ими в направлении наблюдателя как привычные тени в видимом диапазоне.



Рисунок 2.2 – «Тепловые тени» разного происхождения. Заимствован из Интернет–ресурса

На рис. 2.3, заимствованном из рекламного ролика авиационной MWIR ИК гиросtabilизированной системы EOTS в тепловизионном изображении движущиеся автотранспортные средства формируют движущиеся тени, связанные с экранированием ими солнечного излучения. Эти тени имеют относительно невысокий контраст. Тени под пролётами мостов связаны с длительными процессами нагревания/остывания поверхности земли. Их тепловой контраст заметно более превышает контраст теней первого типа.



Рисунок 2.3 – Тепловизионное изображение движущегося автотранспортного средства

На рис. 2.4, заимствованном из рекламного ролика авиационной MWIR ИК гиросtabilизированной системы EOTS в тепловизионном изображении

тепловые тени от гор, связанные с процессами нагревания/остывания поверхности противоположного берега реки. Также хорошо наблюдается его отражение от воды. Это свидетельствует о том, что в формировании изображения данного оптико-электронного канала рабочий спектральный диапазон существенно сдвинут в коротковолновую область. Это, несомненно, даёт преимущества при наблюдении сюжетов, имеющих малые контрасты непосредственно в MWIR ИК диапазоне. Однако существенно снижается помехозащищённость системы и возрастает риск утери информации при воздействии сложных оптических помех, включая солнечное излучение или в присутствии интенсивных оптических помех антропогенного происхождения.

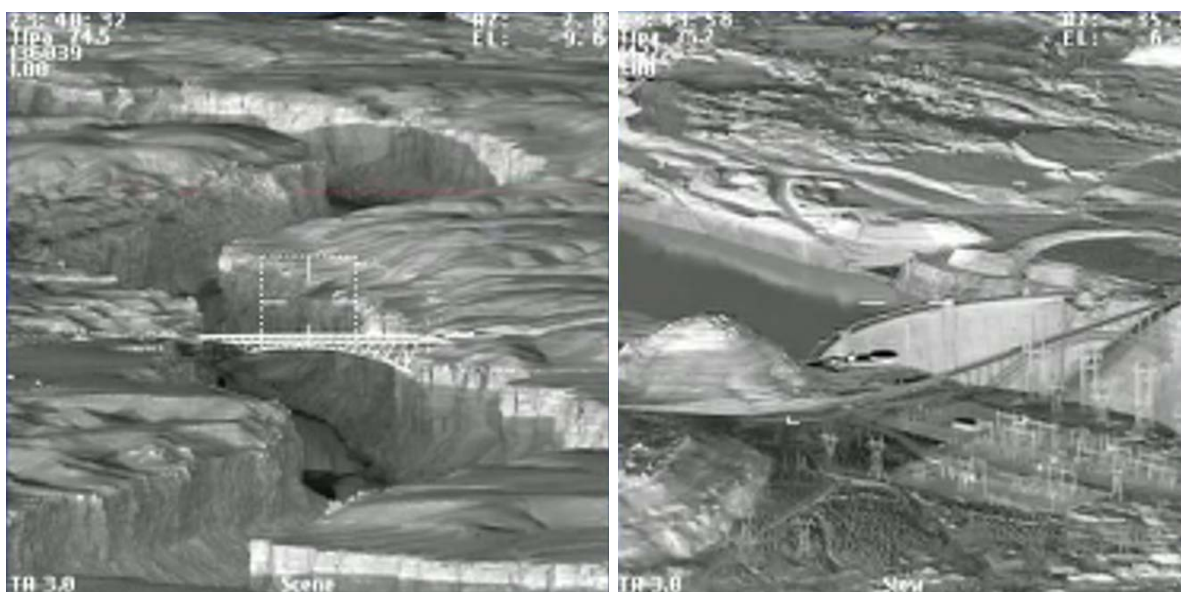


Рисунок 2.4 – Тепловые тени от гор

Тепловизионное изображение на рис. 2.5 получено ТВП с применением МФПУ на основе Si:Pt фирмы Inframetrics. МФПУ имеет расширенный в коротковолновую область рабочий спектральный диапазон, из-за чего одновременно видны солнечные тени и яркие сигналы от сигарет.

Третий вид «тепловой тени» от объектов вызван зеркально-диффузным отражением собственного излучения наблюдаемого объекта от фрагментов ландшафта. Этот вид не является тенью в прямом смысле этого слова, но употребляется из-за внешнего сходства с тенью (затенённостью поверхности от излучения Солнца наблюдаемым объектом) на тепловизионном изображении на рис. 2.5. Например, на рис. 2.2 видны области грунта под автомобилями, рассеивающие их тепловое излучение. Эти «тени», созданные собственным излучением днища и корпуса автомобилей, имеют положительный контраст по отношению к ландшафту. Отражённый лучистый поток, как правило, ненамного меньше собственного излучения объекта, поскольку коэффициенты зеркально-диффузного отражения диэлектриков (подавляющее большинство элементов ландшафта) в условиях его формирования довольно велики: от 0,3 до 0,6. Знак контраста области «тени» по отношению к фону совпадает знаком контраста самого объекта.



Рисунок 2.5 – Тепловизионное изображение солнечных теней

Отличительные особенности рассмотренных типов «теней» в том, что последний тип располагается по линии визирования, соединяющей наблюдателя, объект наблюдения и фрагмент ландшафта, на котором находится его «тень». «Тени» первых двух типов располагаются в плоскости, определяемой положением Солнца, объекта наблюдения и области «тени». (рис. 2.5).

Наиболее часто отражённое от поверхности ИК излучение объектов сопровождается их наблюдением вблизи водоёмов или непосредственно на водной поверхности (рис. 2.6).

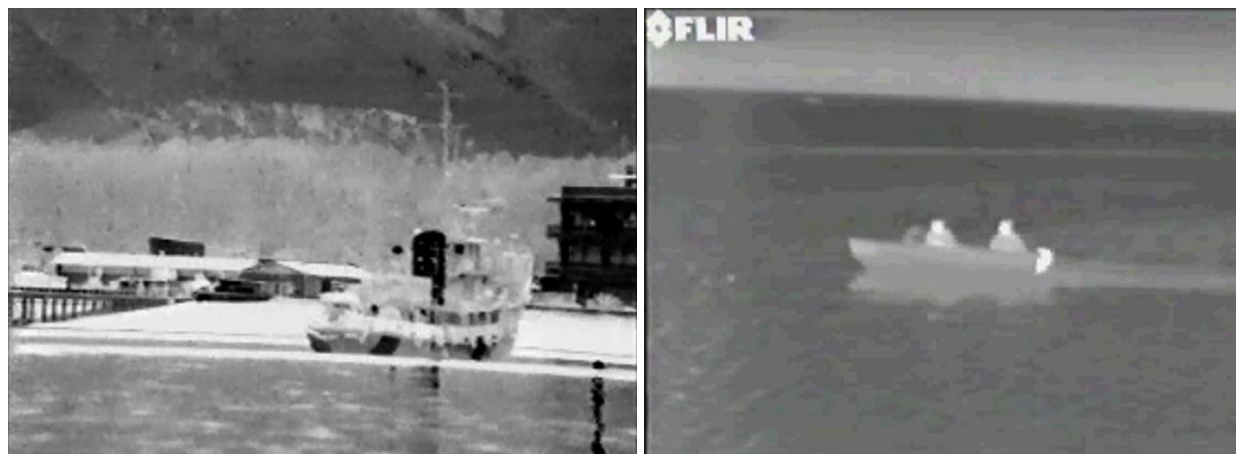


Рисунок 2.6 – Отражённое от воды собственное излучение корпуса корабля и лодки с людьми в диапазоне 8–12 мкм

Разнообразие сопутствующих эффектов («теней» различных типов), сопровождающих тепловизионное наблюдение объектов на земных ландшафтах, необходимо учитывать при совместном анализе многоспектральной информации, например, при сопоставлении телевизионных и тепловизионных изображений, при сопоставлении тепловизионных изображений, сделанных в различные моменты времени (при различных положениях Солнца) и тепловизионных изображений MWIR и LWIR диапазонов.

3 Инфракрасное излучение взволнованной поверхности моря

Взволнованная поверхность моря (ВПМ) выступает как самостоятельный объект наблюдения при гидрофизических исследованиях и как подстилающая поверхность, если на ее фоне наблюдаются естественные или искусственные образования и объекты.

Практическим примером использования количественных данных об особенностях излучения ВПМ как фонового образования может служить прогнозирование амплитудных и корреляционных характеристик фонового излучения одного и того же сюжета, наблюдаемого одним и тем же ТВП, но при различных кратностях увеличения оптической системы. При наблюдении пространства вблизи линии морского горизонта непосредственно примыкающие к границе наблюдаемого раздела области моря и неба обладают относительно малыми флуктуациями фонового излучения, соизмеримыми с флуктуациями внутренних шумов ТВП. Статистические характеристики суммарного шума соответствуют характеристикам суммы двух независимых случайных процессов с законами распределения, близкими к нормальному. Периферийные зоны поля зрения ТВП в большинстве ситуаций отличаются от области линии горизонта как по среднему значению, так и по характеру флуктуаций яркости. Из-за изменения фоновой засветки меняется чувствительность фотоприёмного устройства ТВП и изменяется соотношение между вкладом внешних и внутренних шумов в совокупное отношение «сигнал/шум». Фоновые шумы определяют статистические характеристики результирующих шумов и, как правило, настолько отличаются от нормального закона, что для них алгоритмы, оптимальные при автоматическом выделении сигналов из шумов с нормальным законом распределения, могут давать существенный проигрыш по сравнению с другими [2–5, 10]. Это положение в принципе характерно для всех ситуаций наблюдения в пригоризонтной области моря, но степень различия характеристик фоноцелевой обстановки в центре и на периферии поля зрения ТВП зависит от его величины и будет разной, например, при разной кратности увеличения оптической системы одного и того же прибора, работающего в режиме наблюдения за надводной обстановкой (широкое поле зрения, обычно $20^\circ \times 30^\circ$) и в режиме сопровождения и выработки координат цели (узкое поле зрения, обычно $0,8^\circ \times 1,0^\circ$).

При малых кратностях увеличения и при широком поле зрения ИК прибора (режим обзора надводной обстановки) разброс пиковых амплитуд фоновых сигналов существенно больше, чем при больших кратностях увеличения и узком поле обзора ТВП (режим сопровождения цели). Однако для значений радиусов автокорреляции фоновых помех наблюдается обратная ситуация - относительный радиус корреляции фоновых помех увеличивается с уменьшением поля зрения ТВП. При наблюдении на экране дисплея в «обзорном» режиме, то есть при малых кратностях увеличения и больших полях зрения (что характерно для решения навигационных задач корабельных ТВП), автоматика электронного тракта «загружает» чувствительность ТВП,

чтобы «вписать» весь диапазон яркостей ИК излучения сюжета в диапазон яркостей свечения экрана ТВП. При этом часть «тонкой структуры» теплового поля наблюдаемой обстановки становится скрытой от оператора. Переход ТВП от режима обзора к режиму сопровождения цели, например, для определения её дальности с помощью дальномера, предполагает уменьшение поля зрения ТВП. При этом разброс амплитуд оптических сигналов от фоновых образований уменьшается и изменяется среднее по кадру значение излучения фона. Автоматическая регулировка усиления сигнала увеличивает чувствительность ТВП, одновременно сдвигая «температурное окно», чтобы «вписать» весь диапазон яркостей ИК излучения сюжета в диапазон яркостей свечения экрана ТВП. В предъявляемом оператору тепловизионном изображении часть объектов может оказаться вне области линейного диапазона отображения («чернее чёрного» или «белее белого») и могут выявиться дополнительные структурные элементы сюжета, ранее не наблюдавшиеся из-за «загрублённой» чувствительности ТВП. Знание этих особенностей формирования ИК излучения наблюдаемой обстановки и причинно-следственная их связь с характеристиками прибора повышают шансы оперативного выявления содержательной информации и правильного решения оператором корабельного ТВП специфических задач в сложной помеховой обстановке.

3.1 Физическая картина формирования ИК излучения ВПМ и объектов на её фоне

Толщина поверхностного слоя воды d , который реально участвует в формировании оптического поля водной поверхности (и, соответственно, является толщиной излучающей «поверхностной пленки»), зависит от соотношения длины волны λ и показателя поглощения вещества на этой длине волны $\chi(\lambda)$ ([1], стр. 40). Для воды в диапазоне 3–5 мкм основные процессы поглощения – излучения определяются поверхностным слоем толщиной $d \sim 100$ мкм, а в диапазоне 7–14 мкм – соответственно $d \sim 20$ мкм.

Общее выражение для спектральной излучательной способности воды:

$$\varepsilon(\lambda) = a(\lambda) \cdot [1 - \rho(\lambda)] \cdot \left[1 - \exp\left\{ -\frac{4 \cdot \pi \cdot \chi(\lambda) \cdot \ell}{\lambda} \right\} \right].$$

В ИК диапазоне 3–14 мкм оно существенно упрощается из-за того, что для длин волн больше 2 мкм спектральный показатель поглощения воды $\chi(\lambda)$ довольно велик, так что экспоненциальный член пренебрежимо мал:

$$\varepsilon(\lambda) = 1 - \rho(\lambda)$$

Таким образом, ИК излучение слоя воды формируется, в основном, за счёт двух составляющих: собственного теплового излучения поверхности и отражённого от него ИК излучения других участков пространства. Отражённая составляющая может быть первоначально связана с нисходящим излучением небосвода, естественных или искусственных источников ИК излучения, с ИК излучением соседних участков взволнованной поверхности. Вклад каждой из

этих составляющих в формирование оптического поля ВПМ определяется оптическими характеристиками её поверхности, и в частности, коэффициентами излучения и отражения поверхностной плёнки.

Величину энергетической яркости лучистого потока $L(\varphi, \psi)$, формируемого участком воды в направлении φ, ψ , можно записать как суперпозицию собственного и отраженного ИК излучения или как величину, характеризующую отклонение ИК излучения ВПМ от ИК излучения АЧТ с температурой воды за счет отражения нисходящего ИК излучения:

$$L(\varphi, \psi) = L_m^0 \cdot \varepsilon(\omega) + L_n(\varphi_n, \psi_n) \cdot \rho(\omega) = L_m^0 - [L_m^0 - L_n(\varphi_n, \psi_n)] \cdot \rho(\omega),$$

где $L^0(T_m)$ – спектральная энергетическая яркость АЧТ с температурой излучающей поверхностной пленки воды (T_m); $L_n(\varphi_n, \psi_n)$ – падающее (нисходящее) ИК излучение, отражённое с коэффициентом $\rho(\omega)$ в направлении наблюдателя (φ, ψ) под углом ω .

Выражение иллюстрирует тот факт, что ИК излучение поверхностной плёнки воды (как физического объекта на морской поверхности), как правило, отличается от ИК излучения АЧТ с температурой воды. В зависимости от того, под каким углом наблюдатель видит данный участок и какое нисходящее излучение отражается от него в этом же направлении, оно может быть либо меньше, либо больше излучения АЧТ с температурой воды.

ТВП регистрируют суммарный лучистый поток, несущий в себе как «полезную» информацию (например, об излучении моря или объекта на его поверхности), так и «шумовую» информацию, порождённую отражённым излучением небосвода и излучением атмосферы. При некоторых условиях вклад «полезной» информации становится меньше «шумовой» (например, при больших дистанциях наблюдения), и тогда выделить содержательную информацию за счёт прямого улучшения чувствительности прибора не получится. Необходимо регистрировать какие-то дополнительные отличительные признаки целей и фонов, чтобы правильно интерпретировать наблюдаемую картину. Такие отличительные признаки могут содержаться в тонкой спектрально-поляризационной структуре оптического поля объекта и подстилающей поверхности, или же в особенностях динамики перемещений объектов по поверхности воды.

В отличие от простейших случаев идеально гладких поверхностей водоёмов, в реальных условиях водная поверхность покрыта волнами (разных масштабов), из-за чего её ИК излучение флуктуирует. Первоначальной причиной флуктуаций яркости элементарного участка поверхности (фацета) является его случайный наклон, определяющий случайный характер функционально связанных с ним физических величин:

- коэффициента излучения поверхности, определяющего долю собственного теплового излучения поверхностной плёнки воды;
- коэффициента отражения поверхностной плёнки воды, определяющего долю отраженного от поверхности нисходящего излучения;

- угловые координаты точки пространства, откуда падает на фацет и отражается от него в направлении наблюдателя нисходящее излучение.

При описании флуктуаций единичного участка ВПМ конечных размеров (например, соответствующих линейным размерам мгновенного поля зрения ТВП на местности) необходимо учитывать дополнительные факторы, не позволяющих производить простое суммирование количества фацетов, «вписывающихся» в площадь «единичного» участка. В пределах мгновенного поля зрения (элемента углового пространственного разрешения) оптического прибора флуктуации излучения ВПМ определяются флуктуациями излучения каждого из фацетов, формирующих единичный участок взволнованной поверхности, и флуктуациями числа фацетов, реально принимающих участие в формировании ИК излучения этого участка.

Для наблюдателя, визирующего единичный участок ВПМ под углами φ , ψ в пределах элементарного углового поля зрения δ , лучистый поток формируется совокупностью фацетов, имеющих различные уклоны и по-разному затененных от небосвода и от наблюдателя. Главная и определяющая причина флуктуаций лучистого потока наблюдаемого единичного участка ВПМ состоит в том, что формирующие его фацеты имеют различные возвышения и уклоны (в силу случайного характера волнения поверхности), из-за чего отражают падающее на них излучение с различными коэффициентами отражения. Спектральный и поляризационный состав излучения, сформированного единичным участком ВПМ, флуктуирует также за счет изменяющегося соотношения собственного и отраженного излучения у каждого из совокупности фацетов, составляющих этот участок.

Вторая физическая причина флуктуаций собственного излучения ВПМ - флуктуации числа фацетов, затененных относительно наблюдателя при наклонных углах визирования. Особенность физической картины формирования ИК излучения ВПМ связана с тем, под каким углом происходит визирование поверхности его элементарного участка. В области углов от 0° (наблюдение в надира – «прямо под собой») до $\sim 60^\circ$ – 70° поверхность воды имеет высокий коэффициент излучения и малый коэффициент отражения нисходящего излучения. Для большинства практических применений ИК излучение поверхности воды в этой области углов вполне допустимо описывать закономерностями излучения АЧТ с коэффициентом излучения $\varepsilon \sim 0,96$ – $0,92$. В области скользящих углов визирования от $\sim 70^\circ$ до 90° дополнительно в процесс формирования излучения ВПМ включаются эффекты затенения одних участков волн другими. При этом возрастает роль процессов многократных отражений излучения, и картина формирования яркости усложняется.

В самом первом приближении к «скользящим» углам следует отнести углы визирования ВПМ от направления на линию горизонта и ниже неё до -12° . В этой области коэффициенты отражения и гладкой воды, и взволнованной поверхности начинают заметно увеличиваться и превышают значение $\rho \approx 0,07$. То есть, в формировании ИК излучения ВПМ всё большее значение принимает отражённая составляющая излучения небосвода. При более отвесных углах

наблюдения ($\varphi < 78^\circ$) ИК излучение моря близко (по крайней мере, по средней составляющей) к излучению АЧТ с температурой поверхности пленки воды. Поэтому от ракурса, под которым наблюдается объект, существенным образом зависит его контраст на фоне ВПМ из-за характера излучения подстилающей поверхности.

Ракурс и геометрические соотношения при наблюдении надводных целей определяются, в первую очередь, высотой наблюдателя (H) над уровнем моря. При высотах 1000 и 500 метров (воздушный носитель) геометрическая дальность до линии горизонта составляет 114,59 км и 79,6 км соответственно. При этом угол места Φ , при котором наблюдается линия морского горизонта (даже без учёта рефракции), не равен нулю. Он составляет $\Phi_{\text{гр}} = -0,51^\circ$ ($84,49^\circ$ вверх от надира) и $\Phi_{\text{гр}} = -0,36^\circ$ ($89,54^\circ$ вверх от надира).

При дистанции до цели (например, корабля) $l_{\text{ц}} = 30$ км угол его визирования $\Phi_{\text{ц}}$ с высоты 1000 метров составляет $\Phi_{\text{ц}} = -1,57^\circ$, или $-1,07^\circ$ ниже линии геометрического горизонта (или $\varphi_{\text{ц}} = 88,43^\circ$). При дистанции до корабля $l_{\text{ц}} = 21$ км ракурс его наблюдения составляет $\Phi_{\text{ц}} = -2,75^\circ$ (или $-2,24^\circ$ ниже линии геометрического горизонта, или $\varphi_{\text{ц}} = 87,25^\circ$). Для дистанций $l_{\text{ц}} = 17$ км и $l_{\text{ц}} = 12$ км эти углы составляют соответственно $\Phi_{\text{ц}} = -3,25^\circ$ ($-2,74^\circ$ ниже линии горизонта) и $\Phi_{\text{ц}} = -4,7^\circ$ ($-4,2^\circ$ ниже линии горизонта). Наблюдение объектов под такими углами происходит при «скользящих» углах визирования, когда в их контраст преобладающий вклад вносит отражённое от моря ИК излучение небосвода.

Шлюпка на дистанциях $l_{\text{ц}} = 3,2$ км и $l_{\text{ц}} = 1,3$ км с высоты 500 метров наблюдается под углами $\Phi_{\text{ц}} = -9^\circ$ ($\Phi_{\text{ц}} = -8,44^\circ$ ниже геометрического горизонта) и $\Phi_{\text{ц}} = -22,62^\circ$ ($\Phi_{\text{ц}} = -22,26^\circ$ ниже геометрического горизонта). Если в первом случае контраст шлюпки формируется с преобладающим вкладом отражённого от моря ИК излучения небосвода, то во втором случае излучение подстилающей поверхности (поверхности моря) определяется температурой воды $T_{\text{м}}$, что соответствующим образом сказывается на контрастном излучении цели. Поскольку при скользящих углах визирования средняя энергетическая яркость взволнованного моря может быть как больше, так и меньше энергетической яркости АЧТ с температурой воды, то контраст ИК излучения наблюдаемых объектов также может менять свой знак, если, например, воздушный носитель ИК аппаратуры подлетает к надводной цели и пролетает над ней.

Фактор угла визирования ВПМ следует отнести к априорной информации, учитывая которую оператор может повысить достоверность интерпретации тепловизионной информации, выстраивая приоритетность регистрируемых признаков целей и помех. В частности, при наблюдении водной поверхности при отвесных углах составляющей отражённого излучения небосвода можно в большинстве случаев пренебречь.

Традиционно процессы отражения/излучения подстилающей поверхности (ВПМ) описываются с использованием «эффективных» коэффициентов, имеющих определённый физический смысл. При зеркально-гладком море

формирование излучения описывается детерминированными закономерностями, построенными на основе геометрической оптики, оперирующими коэффициентом отражения $\rho(\omega)$. По мере возникновения волн на поверхности (в общем случае – шероховатой поверхности) детерминированный характер процессов излучения/отражения сменяется стохастическим. Обобщённые характеристики этих процессов – моменты первого и второго порядков – могут быть выражены с использованием некоторых нормированных коэффициентов, зависящих только от волнообразующих факторов и относительного расположения линий визирования и распространения волнения [5]. Для среднего значения (первого момента случайного процесса) и для дисперсии флуктуаций (второго момента случайного процесса) энергетической яркости собственного излучения ВПМ, для параметров отражённого от моря ИК излучения Солнца и других объектов, каждый из нормированных коэффициентов имеет физический смысл, так или иначе связанный с коэффициентом эффективного отражения, то есть с отношением числа факторов, реально участвующих в формировании излучения единичного участка поверхности, к общему их числу на этом участке. При изменении углов наблюдения и параметров волнения коэффициенты эффективного отражения ВПМ изменяются «в одном направлении» (в смысле увеличения или уменьшения), но степень их изменения при одинаковых изменениях условий наблюдения – различна.

Для конкретных условий удобно разделить все возможные ситуации на три группы по типу формирования нисходящего излучения небосвода:

1. Излучение небосвода изотропно по углу места и азимуту и не зависит от углов φ_n, ψ_n (Сплошная облачность, СО).

2. Излучение небосвода описывается детерминированной функцией одного аргумента – угла места падающего луча φ_n (Ясное небо, ЯН)

3. Излучение небосвода описывается случайной функцией двух углов φ_n, ψ_n (Переменная облачность, ПО).

В случае ПО пространственно-временные случайные процессы имеют существенно разные масштабы, связанные с волнением моря и с наличием облаков.

Основным отличием оптических свойств взволнованной поверхности воды от аналогичных характеристик гладкой водной поверхности является уменьшение отражательной способности, покрытой волнами морской поверхности (эффект «почернения»), приближающий ее излучение к излучению АЧТ с температурой моря. Наличие неравномерного распределения нисходящего излучения небосвода вызывает дополнительный эффект, который при всех гидрометеоситуациях, отличных от низкой сплошной облачности СО, определяет уменьшение яркости морской поверхности относительно яркости АЧТ с температурой воды (эффект «похолодания»). Оба эти эффекта взаимно усиливаются или компенсируются в зависимости от соотношения температур воздуха.

Сравнение среднего значения энергетической яркости ВПМ (\bar{L}) с яркостью АЧТ при температуре воды L_m^0 показывает, что соотношение температур воздуха T_v и воды T_m определяет, в какую сторону величина \bar{L} отклоняется от L_m^0 . Температура воды T_m , как количественно измеряемый фактор, влияющий на энергетическую яркость ее поверхности, определяет энергетическую яркость ВПМ L_m^0 , которая может рассматриваться как уровень, относительно которого изменяются характеристики ИК излучения шероховатой (взволнованной) поверхности при изменении условий её наблюдения.

С температурой воздуха T_v связаны непосредственно величина излучения атмосферной трассы (L_a) и угловое распределение нисходящего излучения небосвода. Принимая во внимание, что эффективная температура излучения облаков также может быть сложным образом связана с температурой приповерхностного слоя воздуха, становится очевидным существенное и неоднозначное влияние этого фактора (T_v) на энергетическую яркость моря L_m .

При СО соотношение T_m и T_v имеет большее относительное влияние на излучение ВПМ, чем изменение волнообразующих факторов, причем разность $\Delta T_{mv} = T_m - T_v$ однозначно определяет уменьшение или увеличение излучения ВПМ по отношению к излучению АЧТ с температурой воды, т.е. характер изменения $L(\varphi)$ при изменении углов визирования от надирных к скользящим.

Влияние волнообразующих факторов, таких, в частности, как скорость приповерхностного ветра V , степень развитости волнения k и относительного направления волнения, сказываются на значении яркости через коэффициент эффективного отражения A , в котором учитываются особенности геометрии наблюдения, оптических свойств отражающего слоя поверхности и т.д., но никак не принимают участие температуры воды и воздуха. Для случая СО, когда излучение неба принимается равномерным и равным L_v^0 (т.е. максимальным с точки зрения других метеоситуаций) в формировании излучения моря роль отраженной составляющей излучения небосвода возрастает с приближением линии визирования к горизонту и уменьшением скорости ветра.

В реальных условиях ЯН энергетическая яркость морской поверхности всегда меньше, чем при СО (эффект «похолодания» моря), а соотношение температуры воздуха и воды уже не так однозначно определяет знак отклонения излучения ВПМ от $L^0(T_m)$ - излучения чёрного тела с температурой воды моря T_m . Например, в условиях изотермии ($T_m = T_v$) вследствие отражения «холодного» небосвода яркость моря меньше $L^0(T_m)$. Одинаковые изменения температуры воздуха вызывают в условиях ЯН большие приращения абсолютного значения энергетической яркости моря, чем в условиях СО, что важно, например, для оценки изменения контраста морских объектов в течение ночи, когда происходит охлаждение воздуха, причем тем более интенсивное, чем меньше степень облачности. «Похолодание» моря при ЯН наиболее заметно при скользящих углах и спокойном море. Для ситуаций $T_m > T_v$ эффект «похолодания» усиливает эффект «почернения» ВПМ, а для $T_m < T_v$ ослабляет

его, но в любом случае приводит к уменьшению яркости моря по отношению к яркости АЧТ при T_m .

Стохастический процесс ИК излучения моря при сканировании его поверхности в вертикальном направлении носит сугубо нестационарный характер, в то время как в азимутальном направлении для каждого значения угла места визирования случайный процесс излучения может с достаточной достоверностью считаться стационарным и даже эргодическим в масштабах полей зрения современных ИК приборов.

Зависимость степени пространственного усреднения флуктуаций фонового излучения от угла визирования подстилающей поверхности имеет решающее значение в формировании воспринимаемого прибором отношения сигнала к шуму и изменяет статистику флуктуаций фоновых помех, делая их нестационарными и сугубо анизотропными по углу места.

Например, при соизмеримых размерах мгновенного поля зрения ИК прибора δ и угловых размеров отдельных волн флуктуации воспринимаемого прибором потока излучения определяются изменениями угла наблюдения огибающей волны, т.е. изменениями коэффициента эффективного отражения наблюдаемого участка поверхности. В условиях наблюдения с борта корабля или низколетящего воздушного носителя при углах визирования до 3° ниже линии горизонта, например, коэффициент отражения изменяется от 0,76 до 0,04, что является основной причиной роста флуктуаций сигналов этих пространственно - временных масштабов. Тепловизионные приборы в этом случае дают достаточно контрастное изображение склонов волн, которые на тепловизионных изображениях могут изменять даже знак своего наблюдаемого на экране контраста относительно "уровня серого". Пространственное усреднение таких неоднородностей мало, и наблюдается возрастание флуктуаций оптического сигнала (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Тепловизионное изображение взволнованной водной поверхности, полученное LWIR ТВП «Маугли» изготовления АО «ЛОМО»

В области пространства ближе к линии горизонта пространственное усреднение растёт, и флуктуации оптического сигнала значительно уменьшаются. Но одновременно уменьшается полезный контрастный оптический сигнал от малоразмерной цели, и формируемое отношение сигнала к внешним помехам изменяется неоднозначно.

3.2 Методика расчётных оценок характеристик ИК излучения ВПМ

Расчётные оценки характеристик оптического поля ВПМ и объектов на её фоне строятся на основе стохастической фацетной модели, представляющей ВПМ как совокупность элементарных участков поверхности – фацетов, наклоны которых распределены случайным образом [5]. В качестве входных данных используются параметры, которые количественно измеряются стандартными гидрометеорологическими приборами и по которым накоплен большой статистический материал по Мировому Океану. Выходной характеристикой выбирается угловое распределение энергетической яркости L [Вт/см²ср].

3.2.1 Среднее значения ИК излучения ВПМ (первый момент случайного процесса флуктуаций яркости)

ИК излучение ВПМ формируется как суперпозиция собственного излучения поверхности воды и отражённого от неё излучения небосвода. При отвесных углах визирования вклад нисходящего ИК излучения из верхней полусферы существенно меньше собственного излучения воды из-за того, что достаточно малы коэффициенты отражения воды: при углах визирования $\varphi \leq 70^\circ$ коэффициент эффективного отражения ВПМ $\rho_{\text{эф}} \approx 0,07$. Её излучение близко к излучению АЧТ при температуре воды $L^\circ(T_m)$ и определяется, главным образом, термодинамической температурой излучающей поверхностной пленки T_m .

При наклонных углах визирования роль отражённой составляющей нисходящего излучения небосвода $L_n(\varphi_n, \psi_n)$ велика. В общем случае выделяются три подансамбля условий, объединённых по признаку углового распределения нисходящего излучения небосвода $L_n(\varphi_n, \psi_n)$: СО, ЯН и ПО.

При СО ($L_n = L_v^\circ$) формулы для расчёта среднего значения энергетической яркости взволнованной поверхности моря по своей структуре полностью соответствуют выражениям, описывающим излучение гладкой поверхности воды:

$$L_{\text{воды}} = L_m^\circ [1 - \rho_\lambda(\omega)] + L_v^\circ \rho_\lambda(\omega),$$

когда морскую поверхность можно рассматривать как плоскую границу раздела двух сред с комплексным показателем преломления $n(\lambda)$ и коэффициентами излучения и отражения: $\varepsilon_\lambda(\omega)$ и $\rho_\lambda(\omega)$. При наличии волнения на поверхности

воды для равномерного распределения нисходящего из верхней полусферы излучения ($L_H(\varphi_H, \psi_H) = L_B^0 = \text{const}$):

$$L_M^{CO} = L_M^0 [1 - A_\lambda(\omega)] + L_B^0 A_\lambda(\omega) = L_M^0 - \Delta L_{MB}^0 A_\lambda(\omega).$$

Коэффициент $A_\lambda(\omega)$ [5] имеет физический смысл коэффициента эффективного отражения взволнованной поверхности моря, усредненного с учетом спектральных оптических свойств поверхностной пленки воды, затенения и вероятностных характеристик волнения моря.

Для безоблачного ясного небосвода (ЯН) $L_H(\varphi_H, \psi_H) = L_B^0 - L_3 f(\varphi_H, \psi_H)$ и расчётные оценки можно производить по формуле

$$\bar{L}^{ЯН} = L_M^0 - \Delta L_{MB}^0 \cdot A - \Delta L_{B3} Z = \bar{L}_M^{CO} - \Delta L_{B3} Z,$$

где ΔL_{B3} – разность энергетических яркостей излучения небосвода у горизонта и в зените; коэффициент Z [5] имеет физический смысл коэффициента эффективного отражения взволнованной поверхности моря, усредненного с учетом спектральных оптических свойств поверхностной пленки воды, затенения и вероятностных характеристик волнения моря и характера углового распределения нисходящего излучения небосвода.

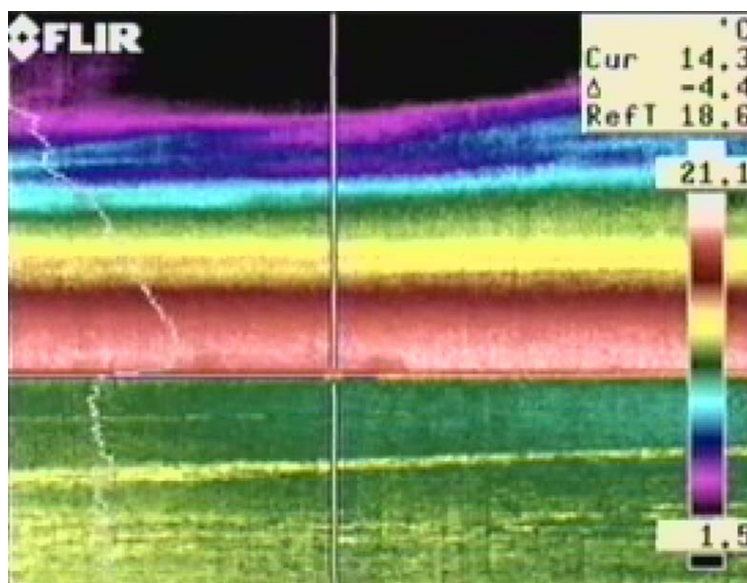


Рисунок 3.2 – Вертикальный профиль распределения радиационной температуры пригоризонтной области моря. Получен с использованием ТВИ FLIR 640

На рис. 3.2 в левой части кадра отображён «вертикальный профиль» яркости излучения морского пригоризонтного фона в диапазоне 8–12 мкм, который иллюстрирует описанные выше угловые зависимости.

Для небосвода, частично покрытого облаками (переменная облачность ПО) расчётные оценки можно производить по формуле

$$\bar{L}^{ПО} = L_M^0 - \Delta L_{MB}^0 \cdot A - \Delta L_{B3} C = \bar{L}_M^{CO} - \Delta L_{B3} C,$$

где коэффициент C [5] имеет физический смысл коэффициента эффективного отражения взволнованной поверхности моря, усредненного с учетом

спектральных оптических свойств поверхностной пленки воды, затенения и вероятностных характеристик волнения моря и случайного характера углового распределения нисходящего излучения небосвода.

Коэффициенты A , Z и C , по аналогии с коэффициентами отражения излучения $\rho_\lambda(\omega)$ от гладкой границы раздела двух сред с разными показателями преломления, удобно трактовать как коэффициенты отражения шероховатой поверхности - коэффициенты эффективного отражения ВПМ. Они учитывают последовательно волнение моря (через закон и параметры распределения уклонов facets), направленность распространения волнения (k), затенение facets (S) и оптические характеристики тонкой излучающей пленки (коэффициент A). Этого вполне достаточно для полного описания оптического поля ВПМ в случае простейшей гидрометеоситуации СО, когда верхняя полусфера (небосвод) плотно закрыта облаками, имеющими радиационную температуру излучения, равную температуре воздуха (T_v).

В общем случае излучение небосвода неравномерно, поэтому при расчётах коэффициентов эффективного отражения ВПМ вводятся коэффициенты, учитывающие, дополнительно к вышперечисленному, детерминированное угловое распределение нисходящего излучения ясного безоблачного небосвода Z (в случае ЯН) и стохастический характер распределения яркости небосвода, покрытого облаками частично (коэффициент C для ПО). Из общезначимых соображений следует, что коэффициенты эффективного отражения шероховатой поверхности (взволнованной поверхности моря) меньше коэффициента отражения гладкой воды: $0 \leq C \leq Z \leq A \leq \rho(\omega) \leq 1$ во всех условиях наблюдения.

Оптическое поле ВПМ представляет собой динамический неоднородный пространственно-временной фон. В условиях СО энергетическая яркость ВПМ в зависимости от скорости ветра изменяется в интервале от $L_m^0 - \Delta L_{mv}^0 \cdot \rho$ (при полном штиле или в области «сликов» и «выглаженных» участков морской поверхности) до $L^0(T_m)$ - и полностью покрытом пеной и «барашками» море.

На взволнованной морской поверхности в большинстве случаев можно визуально выделить два (иногда и три) направления преимущественного распространения волн нескольких различных масштабов (периодов). Это особенно заметно при наблюдении с достаточно большой высоты, когда в поле зрения ТВП попадает значительная область пространства. При наблюдении под скользящими углами с малых высот и вблизи горизонта этот эффект нивелируется, поскольку видны лишь верхние части волн.

Особенность формирования ИК излучения ВПМ в том, что целый ряд разнородных физических факторов проявляется через одну и ту же величину - коэффициент эффективного отражения ВПМ. Этим, в частности, объясняется тот факт, что средняя составляющая ИК излучения ВПМ не позволяет надежно выделять (классифицировать) в явном виде аномалии на ВПМ, вызванные теми или иными природными или антропогенными воздействиями.

Зависимость величин коэффициентов эффективного отражения A от угла визирования φ характеризуется плавным уменьшением от их максимальных

значений при касательных углах наблюдения ($\varphi \rightarrow 90^\circ$) к минимальным - при надирных ($\varphi \rightarrow 0^\circ$). Эта тенденция сохраняется при всех скоростях ветра ($V < 30$ м/с) и при штиле ($V = 0$), когда поляризационные составляющие A_s и A_p в соответствующих выражениях совпадают с оптическими характеристиками воды ρ_s и ρ_p . С увеличением степени волнения моря возрастает степень отличия коэффициентов A_s и A_p (коэффициентов эффективного отражения) от коэффициентов зеркального отражения (эффект «почернения» взволнованной или шероховатой поверхности по сравнению с гладкой поверхностью), причем отличие тем больше, чем ближе линия визирования к горизонту.

Особенностью оптических свойств морской воды (как и, например, пленок поверхностных органических загрязнений) является наличие минимума значений коэффициента отражения ρ_p в области углов, аналогичных углу Брюстера для диэлектриков (ω_B). Для гладкого моря это соответствует углам визирования $\varphi_B = \omega_B$. $\varphi_B(\lambda = 3,8 \text{ мкм}) = 53,79^\circ$; $\varphi_B(\lambda = 10 \text{ мкм}) = 50,59^\circ$. При волнении угловое положение минимальных значений A_p сдвигается ближе к горизонту относительно φ_B пропорционально «среднему наклону» наблюдаемых фацетов, и, следовательно, скорости ветра. Кроме того, волнение обуславливает разброс наблюдаемых наклонов фацетов вокруг среднего значения, что приводит к более плавному угловому профилю A и A_s по сравнению с ρ и ρ_s и к увеличивающемуся с ростом волнения соотношению $A_{s \min} > \rho_s(\varphi_B)$.

Поляризационные особенности ИК излучения ВПМ несут в себе информацию о спектральных свойствах тонкой поверхностной пленки, причем эта информация мало искажается собственно волнением и температурами моря и воздуха. В то время, как сами поляризационные составляющие ИК излучения ВПМ чувствительны к достаточно малым изменениям параметров волнения, их отношение (особенно в условиях СО) является достаточно устойчивым (в смысле независимости от температуры и волнения моря) отличительным признаком, позволяющим с высокой степенью различия идентифицировать объекты на поверхности воды по спектральным особенностям их ИК излучения. В условиях равномерного распределения нисходящего излучения эта информация может быть однозначно связана с оптическими характеристиками, например, вещества поверхностной пленки на воде.

Из всех природных ландшафтов лишь для ВПМ предсказуемость поляризационных характеристик можно считать общим качеством для подавляющего числа условий наблюдения. Небосвод и земные ландшафты слишком изменчивы, чтобы можно было делать состоятельные обобщения и рассчитывать на устойчивость поляризационных отличительных признаков.

3.2.2 Дисперсия флуктуаций ИК излучения ВПМ (второй момент случайного процесса флуктуаций яркости)

Дисперсия флуктуаций энергетической яркости ИК излучения ВПМ как второй момент случайного процесса, характеризует мощность его переменной составляющей. Поскольку этот случайный процесс представляет собой «шумовую» информационную составляющую, то значения дисперсии флуктуаций фонового излучения можно принять в качестве оценки уровня ограничений, накладываемых фоновой помеховой обстановкой на регистрируемое ИК прибором соотношение «сигнал/(внутренние шумы + фоновые помехи)»

Флуктуации фонового ИК излучения взволнованной поверхности моря с точки зрения наблюдения с помощью современных ИК приборов можно подразделить на следующие группы:

- крупномасштабные пространственно-временные неоднородности, обусловленные случайным характером распределения ветрового поля, направления распространения волнения и температуры поверхности в масштабах до сотен километров и по времени до десятков минут;
- крупномасштабные пространственно-временные неоднородности, обусловленные отражением от ВПМ ИК излучения отдельных облаков, излучение Солнца в разрывах между облаками и локальные изменения шероховатости ВПМ под влиянием ветрового фронта («ветровые дорожки») масштабом от десятков до сотен метров;
- мелкомасштабные флуктуации ИК излучения моря, обусловленные волнением и имеющие масштабы от долей миллиметров до единиц метров.

Области на морской поверхности, где наблюдаются изменения характеристик оптического поля ВПМ первых двух групп, как правило, имеют нечеткие границы, поэтому в качестве основной характеристики флуктуаций излучения используются значения максимальных перепадов энергетической яркости поверхности моря.

Основной физической причиной флуктуаций ИК излучения ВПМ при СО является изменение коэффициента отражения фацетов относительно среднего («эффективного») коэффициента отражения наблюдаемого элементарного участка ВПМ.

Для ЯН физическая картина формирования ИК излучения ВПМ и его флуктуаций усложняется за счёт неравномерного по углу места излучения небосвода, демонстрируя увеличение дисперсии флуктуаций яркости ВПМ при ЯН из-за отражения фацетами разных по температуре излучения (т.е. разных по энергетической яркости излучения) участков небосвода при его неравномерном распределении.

Рассматривая излучение малого участка ВПМ как квазистационарный пространственно-временной случайный процесс, выражение для вторых моментов случайных функций в условиях детерминированного распределения

нисходящего излучения небосвода СО и ЯН можно записать в виде соотношений [5]:

$$D^{CO} = \Delta L_{MB}^0 \cdot D1; D^{ЯН} = \Delta L_{MB}^0 \cdot D1 + 2\Delta L_{MB}^0 \Delta L_{B3} \cdot D2 + \Delta L_{B3}^2 \cdot D3.$$

Коэффициенты D1 и D3 представляют собой дисперсии величин $\rho(\omega)$ и $\rho(\omega) \cdot f(\varphi_H)$, а D2 - корреляционный момент величин $\rho(\omega)$ и $(\rho(\omega) \cdot f(\varphi_H))$. Анализ влияния условий наблюдения на D_L показывает, что при уменьшении разности температур воздуха и воды однозначно уменьшаются флуктуации излучения ВПМ лишь для облачного небосвода СО, в то время как для ЯН могут наблюдаться ситуации ($T_M < T_B$), когда с уменьшением разности ΔL_{MB}^0 флуктуации увеличиваются.

Для ясного небосвода ЯН общая связь дисперсии флуктуаций яркости морской поверхности $D_{ЯН_L}$ с отдельными гидрологическими и метеорологическими параметрами усложняется и становится неоднозначной, поскольку, например, зависимость флуктуаций яркости поверхности моря от угла её визирования и параметров поверхностного волнения существенно различна для разных соотношений температуры воды и воздуха. С приближением углов визирования к отвесным флуктуации излучения ВПМ уменьшаются вследствие уменьшения флуктуаций коэффициента отражения воды при довольно больших вариациях угла отражения.

Величина D_L является «точечной» дисперсией, которая во всех практических случаях усредняется в пределах мгновенного поля зрения ИК прибора δ . Именно конечные размеры входной апертуры прибора являются причиной того, что при некоторых углах визирования размеры отдельных волновых склонов становятся соизмеримыми с размерами мгновенного поля зрения прибора δ , и характер формирования оптического сигнала от ВПМ резко меняется. На тепловизионном изображении эти области наиболее насыщены фоновыми помехами. Воспринимаемый ИК прибором сигнал содержит ярко выраженную квазигармоническую составляющую, определяемую волнением данного масштаба и вызывающую флуктуации ИК излучения с большим размахом.

Тепловизионное LWIR изображение ВПМ на рис. 3.3 имеет у горизонта значительно меньше неоднородностей, чем в ближней зоне обзора, из-за различия тепловизором отдельных склонов волн.

Флуктуации ИК излучения моря в условиях частичной облачности можно представить как суперпозицию флуктуаций, вызванных собственно волнением и обусловленных отражением излучения небосвода, то есть чередованием при наблюдении ВПМ участков, формирующих излучение преимущественно как в условиях СО или как в условиях ЯН. Пространственно-временные масштабы флуктуаций второй группы существенно больше, чем масштаб флуктуаций, вызванных собственно волнением, т.е. лежат в более низкочастотной области, и вместе с тем амплитуда этих флуктуаций больше.



Рисунок 3.3 – Уменьшение флуктуаций фона при приближении линии визирования к горизонту. Изображение в диапазоне 8–12 мкм

Для подансамбля ПО, когда небосвод частично покрыт облаками, закон распределения перепадов яркости небосвода близок к пуассоновскому, с амплитудой сигналов $\Delta L_n = \Delta L_{вз} \cdot f(\varphi_n)$. В соответствии с этим, распределение областей поверхности моря, формирующих излучение как при ЯН или как при СО, также близко к закону распределения редких событий (закон Пуассона) с максимальной амплитудой $\Delta L_{max} = \Delta L_{вз} \cdot Z$. Из известных соотношений, связывающих среднее значение с дисперсией (или СКЗ) для пуассоновского закона, можно принять:

$$СКЗ = \sqrt{L^{пo}} = \sqrt{L_M^0 - \Delta L_{MB}^0 \cdot C}$$

Для подансамблей ПО с более высокой балльностью облачности, когда небо покрыто облаками достаточно неплотно и участки сплошной облачности чередуются с просветами между облаками, закон распределения яркости протяженных участков ВПМ можно в первом приближении принять близким к ограниченному гауссовскому распределению с максимальной амплитудой также $\Delta L_{max} = \Delta L_{вз} \cdot Z$. Для флуктуаций яркости такого масштаба СКЗ можно оценить как

$$СКЗ = \sqrt{\Delta L_{max} / 6} = \sqrt{\Delta L_{вз} \cdot Z / 6}$$

3.2.3 Перепад энергетической яркости при переходе линии морского горизонта

В морских условиях линия горизонта традиционно используется для ориентации в навигационных системах и для выработки опорных сигналов при автоматической стабилизации бортовых систем. Кроме того, линия горизонта может являться достаточно мощной устойчивой естественной помехой, если при сканировании или при нестабилизации ТВП линия визирования пересекает линию горизонта. В этом случае непосредственно вблизи линии

морского горизонта на экране наблюдается помеха типа "тянучки", описанной в [12]. В системах с автоматическим слежением помеха от линии горизонта соответствует помехам при реакции оптико-электронного тракта на "ступеньку" ($\text{sign}(x)$).

Величина перепада излучения морского горизонта ($\Delta\bar{L}_{\text{гг}}$) определяется как разность средних составляющих энергетических яркостей неба ($\Delta\bar{L}_{\text{нг}}$) и моря ($\Delta\bar{L}_{\text{мг}}$) в непосредственной близости к линии геометрического горизонта [5]:

$$\Delta\bar{L}_{\text{гг}} = \bar{L}_{\text{нг}} - \bar{L}_{\text{мг}}$$

Выражение для среднего значения энергетической яркости моря под линией горизонта найдем при $\varphi \rightarrow \pi/2$, а излучение неба над горизонтом принимается равным $L_{\text{в}}^0$:

$$\begin{aligned}\Delta\bar{L}_{\text{гг}}^{\text{с.о.}} &= L_{\text{в}}^0 - [L_{\text{м}}^0 - \Delta L_{\text{мв}}^0 \cdot A(\varphi = \pi/2)] = \Delta L_{\text{мв}}^0 [1 - A(\varphi = \pi/2)] \\ \Delta\bar{L}_{\text{гг}}^{\text{ян}} &= \Delta L_{\text{мв}}^0 [1 - A(\varphi = \pi/2)] + \Delta L_{\text{вз}} \cdot Z(\varphi = \pi/2)\end{aligned}$$

Перепад спектральных энергетических яркостей при переходе линии морского горизонта является функцией разности спектральных энергетических яркостей АЧТ, определенных разностью функций Планка, соответственно при температурах воды $L_{\text{м}}^0$ и воздуха $L_{\text{в}}^0$. В условиях СО функция $\Delta L_{\text{гг}}$ проходит через начало координат, что означает при $T_{\text{м}} = T_{\text{в}}$ отсутствие перепада спектральной энергетической яркости при переходе линии горизонта и его совпадении по знаку с разностью спектральных энергетических яркостей АЧТ с температурами воздуха и воды. Кроме того, очевидно, что контраст ИК излучения линии горизонта при СО не может превышать разность энергетических яркостей АЧТ с температурами воздуха и воды, и он тем меньше, чем меньше волнение моря.

Поскольку статистика соотношения температур воздуха и воды по Мировому океану дает максимальный среднегодовой разброс $\Delta(T_{\text{в}} - T_{\text{м}})$ от -4°C до $+7^{\circ}\text{C}$, то математическое ожидание величины $\Delta L_{\text{гг}}$ при СО можно оценить из этих значений.

Соотношение между яркостью линии горизонта в "окнах прозрачности" атмосферы 3-5 мкм и 8-14 мкм определяются спектральными соотношениями контрастного излучения АЧТ и пропусканием атмосферной трассы.

При ясном небосводе картина формирования ИК излучения в пригоризонтной области существенно меняется в силу того, что при наклонах facets в направлении наблюдателя отражается излучение верхних, более холодных участков небосвода. Условие отсутствия перепада яркости в этом случае определяется равенством, выполняющимся при $T_{\text{м}} > T_{\text{в}}$

$$\Delta L^0(T_{\text{в}}, T_{\text{м}}) = -\Delta\bar{L}_{\text{гг}} \cdot Z(\varphi = \pi/2) / A(\varphi = \pi/2).$$

Знак величины перепада энергетической яркости на линии горизонта при $T_{\text{м}} > T_{\text{в}}$ зависит от волнообразующих факторов и может быть, например,

положительным при увеличении скорости ветра или отрицательным при уменьшении скорости ветра.

Наибольшее влияние на величину $\Delta L_{\text{лг}}$ оказывает изменение степени облачности. Наличие переменной облачности приводит (в рамках одной гидрометеоситуации T_m , T_b , V , влажность e , г/м³) к случайному характеру изменения $L_{\text{лг}}$ в пределах

$$\Delta \bar{L}_{\text{лг max}} \cdot Z(\varphi = \pi / 2) \leq L_b^0(\varphi = \pi / 2).$$

Так, например, при отрицательной разности температур воздуха и воды - 4°С яркостная контрастная температура линии горизонта составит на длине волны 10 мкм от -2К до +10К при ЯН. При положительном значении разности температур $T_{b-m} = 7^\circ\text{C}$ контраст яркости составит для длины волны 10 мкм соответственно +4К для СО и +12К для ЯН.

Приведенные соотношения справедливы для скользящих углов визирования метеоусловий достаточно хорошей видимости. При сильно замутненной атмосфере, например, в тумане, горизонт может быть невидим как визуальными средствами, так и с помощью ИК приборов. В этом случае различимая граница раздела морской поверхности наблюдается при более отвесных углах, чем угол визирования линии горизонта с данной высоты над морем. Для современных ТВП с высокой пороговой чувствительностью на тепловизионном изображении часто наблюдаются зоны тепловых неоднородностей атмосферы, параллельные горизонту. Они вызваны вертикальной стратификацией аэрозольных компонент атмосферы.

Необходимо отметить, что визуально слоистая структура небосвода на тепловизионном изображении выглядит так, как будто контрасты ИК излучения между слоями велики. Однако профиль вертикального распределения радиационной температуры в диапазоне 8–12 мкм (рис. 11) показывает, что перепады яркости относительно невелики и существенно меньше, чем перепад излучения при пересечении линии истинного горизонта. При работе оператора ТВП в натуральных условиях такие фоновые образования на небосводе маскируют положение истинного горизонта и затрудняют наблюдателю ориентировку в пространстве.

При наблюдении с воздушных носителей угол визирования линии морского горизонта может заметно отличаться от скользящего ($\varphi_r < \pi/2$). Из геометрических соотношений следует, что угол визирования горизонта равен

$$\varphi_{\text{горизонта}} = \arccos \left\{ \frac{R_3}{R_3 + H} \right\}.$$

Для таких ситуаций контраст линии горизонта необходимо рассчитывать по общей формуле:

$$\Delta \bar{L}_{\text{лг}} = L_b^0 - \bar{L}_m(\varphi_r).$$

Воспринимаемое при этом ИК излучение испытывает определенную трансформацию за счет ослабления излучения атмосферной трассой:

$$\Delta \bar{L}_{\text{ЛГ}}^{\text{в о с п р}} = \bar{L}_{\text{м}}(\varphi_{\text{Г}}) \cdot \tau_{\text{атм}},$$

причем пропускание атмосферной трассы может быть настолько малым, что линия истинного морского горизонта будет размыта. Например, при высоте установки аппаратуры 400 м над уровнем моря дальность до горизонта составляет более 70 км. Истинный горизонт будет наблюдаться лишь при высокой метеовидимости, а при наличии дымки и низкой МДВ заметный перепад энергетической яркости при переходе линии визирования от неба к морю будет наблюдаться при углах, отличных от углов визирования истинного горизонта. На практике такое отличие может оказаться несущественным: так, для рассматриваемого случая $H = 400$ м при МДВ 5 км и наблюдаемой дальности горизонта 10 км при угле $87,75^\circ$ угол наблюдения истинного горизонта составляет $89,7^\circ$ [5].

3.2.4 Среднее значение яркости ИК излучения в районе солнечной дорожки

Отражённое от водной поверхности ИК излучение Солнца является наиболее мощной естественной фоновой помехой при работе оптико-электронных приборов в натуральных условиях. В видимом диапазоне рассеяние излучения Солнца в верхних слоях атмосферы может образовывать достаточно большую область, которая принимает участие в формировании солнечной дорожки на поверхности моря. Из-за этого при сочетании некоторых условий солнечная дорожка, в свою очередь, также занимает достаточно широкую область ВПМ, отражающую и рассеивающую солнечное излучение, и создающую ослепляющий эффект. В ИК области 3–14 мкм атмосферное рассеяние солнечного излучения существенно меньше, из-за чего солнечная дорожка создаётся, главным образом, непосредственно солнечным диском и её размеры на ВПМ меньше, чем в видимом диапазоне. Ослепляющее действие отражённого от ВПМ излучения Солнца можно продемонстрировать на примере обнаружения выходящего из воды человека с помощью ТВП MWIR диапазона. Если на фоне ВПМ дальность обнаружения составляет 500–800 метров, то на фоне солнечной дорожки она не превышает 150 метров. Поэтому количественные оценки характеристик отражённого от ВПМ ИК излучения Солнца представляют собой исходные данные для выработки методов борьбы с экстремальными фоновыми помехами.

Излучение Солнца принимается в первом приближении неполяризованным. Также с достаточно хорошим приближением Солнце можно считать ламбертовским излучателем [1, 10 стр. 212], что позволяет представлять его излучение как излучение диска с равномерным распределением яркости по всей его площади. Хотя, как следует из литературы,

в диапазоне 3–14 мкм максимальное отличие спектральной интенсивности излучения его центра от средней интенсивности по всей площади достигает 5,5% при яркостной температуре (T_c) от 5730 К до 6000 К, в рамках инженерной методики такое упрощение допустимо, поскольку на уровне моря неравномерное распределение яркости солнечного диска проявляется в существенно меньшей степени и не оказывает заметного влияния на характеристики солнечной дорожки.

Угловой радиус солнечного диска ε на уровне моря составляет 16 угловых минут ($\varepsilon_c = 16'$). Спектральная энергетическая яркость АЧТ с температурой Солнца L_{λ}^0 ($T_c = 6000$ К) на уровне моря ослабляется атмосферной трассой в зависимости от углового возвышения Солнца φ_c и состояния атмосферы $\bar{L}_{c\tau\lambda}^0 = L_{\lambda}^0(T_c) \tau_{a\lambda}(\varphi_c)$. Так, если собственная энергетическая яркость Солнца в диапазонах 3,4–5,2 мкм и 7,6–13,6 мкм составляет соответственно 22,15 Вт/ср и 2,71 Вт/ср, то на уровне моря при положении Солнца в зените энергетическая яркость составляет уже 9,8 Вт/ср и 0,596 Вт/ср, а при закате (Солнце выше горизонта на 20°) соответственно 5,3 Вт/ср и 0,352 Вт/ср.

Спектральная энергетическая облученность горизонтальной площадки на уровне моря e_c связана со спектральной энергетической яркостью Солнца выражением $e_c = L_{c\tau} \cdot \pi \cdot \varepsilon^2 \cdot \cos \varphi_c$. Энергетическая облученность поверхности, перпендикулярной линии падения излучения равна $e_c = L_{c\tau}^0 \cdot \pi \cdot \varepsilon^2$, где $\varepsilon_c^2 \pi / 4 \cong 6,805 \cdot 10^{-5}$ ср - телесный угол наблюдения Солнца из точки отражения на уровне моря. Энергетическая яркость отражённого от ВПМ излучения Солнца равна

$$L_{cd} = L_{c\tau}^0 \cdot A_c \cdot \rho(\omega)$$

Физический смысл коэффициента A_c в том, что он учитывает изменение общей картины при изменении характера отражения излучения Солнца от невзволнованной гладкой поверхности к отражению этого же излучения от шероховатой поверхности [10]. Произведение $A_c \cdot \rho(\omega)$ можно рассматривать как коэффициент эффективного отражения направленного излучения от шероховатой поверхности, причем $\rho(\omega)$ характеризует отражение от гладкой поверхности (в том числе спектральные и поляризационные характеристики), а коэффициент A_c описывает все особенности, связанные со стохастической структурой шероховатостей (волнообразующими параметрами), взаимным расположением наблюдателя и излучателя и габаритами источника излучения. Произведение $L_{c\tau}^0 \cdot \rho(\omega)$ учитывает все спектральные и поляризационные особенности яркости отраженного излучения для фиксированного положения излучателя и наблюдателя в любой точке солнечной дорожки, не зависит от волнения и является детерминированным. Кроме того, произведение $L_{c\tau}^0 \cdot \rho(\omega)$ описывает для зеркально гладкого моря яркость отраженного излучения в пределах изображения излучателя на поверхности, а для взволнованной поверхности - яркость элементарного блика в любой точке солнечной дорожки. Соответственно, все соотношения для отраженного излучения, связанные со

степенью поляризации и его спектральным составом в любой точке солнечной дорожки полностью описываются яркостью элементарного блика facets $L_{ct}^0 \cdot \rho(\omega)$ и не зависят от волнения.

Коэффициент A_c учитывает количество «бликующих» facets, которые при визировании ВПМ в направлении (φ, ψ) при совокупности внешних условий (степень волнения, размеры и положение излучателя) реально участвуют в формировании отраженного излучения (солнечной дорожки), т.е. характеризуют степень уменьшения отражательной способности участка поверхности за счет волнения.

Плоская незволнованная поверхность воды образует зеркальное изображение Солнца в виде эллипса, большая ось которого направлена к наблюдателю и имеет угловой размер $2 \cdot \varepsilon \cdot \sec \varphi_c$. Малая ось эллипса имеет угловой размер, равный угловому диаметру Солнца $2 \cdot \varepsilon$, а центр находится из законов зеркального отражения при $\psi = \pi/2$, $\varphi = \varphi_c = \omega$. Наличие волнения обуславливает, во-первых, появление в пределах эллипса изображения Солнца таких facets, которые из-за наклона не участвуют в формировании этого изображения, так как отражают излучение Солнца в ином направлении, нежели φ, ψ , то есть происходит уменьшение эквивалентной отражательной способности шероховатой поверхности пропорционально A_c по сравнению с гладкой поверхностью в пределах эллипса изображения Солнца $\rho(\omega)$.

Во-вторых, вследствие волнения теоретически в любых точках ВПМ facets могут принять такой наклон, что смогут зеркально отразить излучение Солнца по направлению линии визирования. Таким образом, эллипс изображения Солнца на гладкой поверхности при волнении уменьшает свою яркость и, увеличивая длину обеих осей, теряет четкие очертания. Заданному положению линии визирования соответствует конкретная область наклонов facets, которая (при фиксированном положении излучателя) с учетом вероятности принятия facetsами таких уклонов определяет общее число facets, участвующих в формировании отраженного излучения, т.е. суммарную яркость по направлению наблюдения. Конечная наблюдаемая ширина солнечной дорожки обуславливается тем, что при значительных отклонениях от оси солнечной дорожки большие значения наклонов facets (необходимые для участия в формировании отраженного излучения) обладают малой статистической обеспеченностью.

Таким образом, солнечная дорожка, как фоновое естественное образование на ВПМ, представляет собой совокупность «бликующих» facets со статистически определяемыми границами (рис. 3.4). Флуктуации яркости определяются главным образом флуктуациями числа facets, участвующих в отражении излучения Солнца.

Максимум среднего значения L_{sd} и флуктуаций яркости наблюдается в области, близкой к точке зеркального отражения центра солнечного диска при данном φ_c от гладкой поверхности с наклоном, соответствующим среднему наклону поверхности наблюдаемых facets при данном волнении.

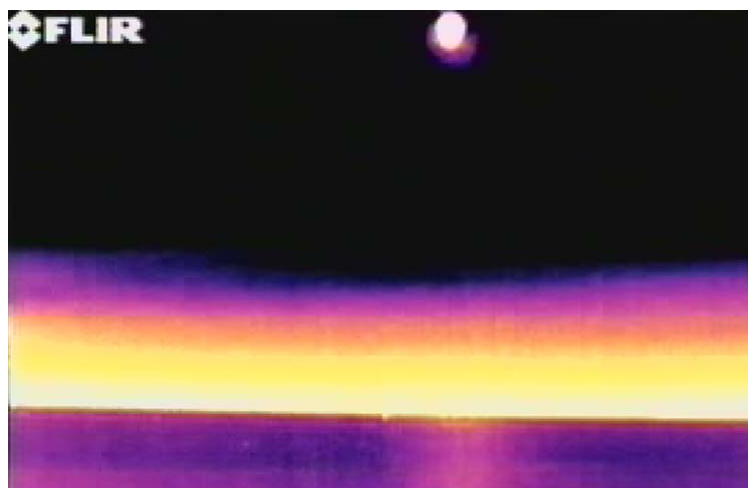


Рисунок 3.4 – Тепловизионное изображение солнечной дорожки на ВПМ, полученное с помощью LWIR ТВП FLIR 680

С увеличением угла φ_c (с приближением Солнца к горизонту) и увеличением волнения этот максимум смещается к горизонту. С увеличением углов φ и φ_c и с уменьшением волнения ширина солнечной дорожки уменьшается, стремясь в пределе к угловой ширине солнечного диска. С увеличением скорости ветра уменьшается эквивалентная отражательная способность ВПМ в центре солнечной дорожки, но увеличивается по ее периферии, из-за чего в центре резко снижается средняя составляющая и дисперсия флуктуаций яркости, но значительно расширяются угловые профили $L_{сд}$.

Для широкого круга условий угол отражения ω^* меняется мало (из-за малых угловых размеров Солнца $\varepsilon_c = 16^\circ$), что в свою очередь обуславливает относительно малое изменение коэффициента отражения $\rho(\omega)$ и, следовательно, малые различия в яркости отдельных бликов (рис. 3.5), степени поляризации и соотношения характеристик флуктуаций «р» и «s» составляющих излучения отдельных фацетов, независимо от того, находятся ли они в центре солнечной дорожки, или на ее краю.

Угловые профили как среднего значения, так и дисперсии флуктуаций определяются, в основном, количеством фацетов, реально участвующих в формировании солнечной дорожки, то есть имеющих нужный наклон и не затененных ни от Солнца, ни от наблюдателя. Асимметричность солнечной дорожки наблюдается при развитии волнения ($k > 1$) и несовпадении направления распространения волнения и направления на Солнце ($\psi_v \neq 0$).

При фиксированных углах наблюдения Φ и положения Солнца на небосводе φ_c степень поляризации ИК излучения в районе солнечной дорожки $P(\lambda)$ зависит от длины волны излучения. Поэтому для многоспектральных ИК приборов существуют физические предпосылки борьбы с солнечной дорожкой как одной из мощных фоновых помех за счёт использования поляризационных особенностей её излучения. При оценке потенциального выигрыша от использования тонкой спектрально-поляризационной структуры ИК излучения

в районе солнечной дорожки следует учитывать, что углы наблюдения морской поверхности $\Phi \geq 0$.



Рисунок 3.5 – Яркость отдельных зафиксированных в кадре бликов отражённого от ВПМ солнечного излучения. Получено с помощью LWIR ТВП FLIR 680

Поэтому полная поляризация отраженного солнечного излучения невозможна даже при положениях Солнца, близких к зениту: $\varphi_c < \Delta(\lambda)$. Степень поляризации отраженного от морской поверхности излучения Солнца, определяемая только его спектральным составом и взаимным расположением Солнца, линии визирования и наблюдателя, при скользящих углах наблюдения ($\varphi > 75^\circ$) мала, если Солнце находится низко над горизонтом, и увеличивается с уменьшением φ_c (Солнце близко к зениту). Таким образом, достижимая в принципе эффективность использования поляризационных свойств отраженного излучения Солнца при подавлении его как фоновой помехи для ИК приборов не достигает 100%.

Азимутальный профиль дисперсии яркости в районе солнечной дорожки симметричен для изотропного волнения ($k = 1$) или же при совпадении направления распространения волнения (направления ветра) с направлением на центр солнечной дорожки ($\psi_b = 0$) [5]. На практике всегда $k > 1$ и $\psi_b \neq 0$, поэтому солнечная дорожка несколько асимметрична, и эта асимметричность более заметна для дисперсии, чем для среднего значения яркости. В зависимости от угла визирования Φ максимум профиля дисперсии может лежать по разные стороны относительно направления на центр солнечного диска. Увеличение степени волнения уменьшает абсолютное значение дисперсии флуктуаций яркости D_c в центре солнечной дорожки, но резко увеличивает ее значение на краях, т.е. солнечная дорожка расширяется.

Угловой профиль дисперсии, как и для средней составляющей солнечной дорожки, зависит от высоты Солнца φ_c и характеризуется наличием максимума в области, близкой к точке зеркального отражения излучения Солнца при данном φ_c от гладкой поверхности с наклоном, соответствующим среднему при

данном волнении наклону β . С увеличением волнения и снижением Солнца эта зеркальная область смещается к горизонту: $\Phi = 90^\circ - (\varphi_c + 2\beta)$. В отличие от углового профиля среднего значения яркости солнечной дорожки, угловой профиль дисперсии флуктуаций может иметь два максимума. Это зависит от высоты Солнца на небосводе. Единственный максимум дисперсии яркости солнечной дорожки наблюдается лишь для средних углов возвышения Солнца ($\varphi_c \sim 40^\circ$), а при близких к зениту ($\varphi_c < 20^\circ$) или к горизонту ($\varphi_c > 70^\circ$) – появляется второй максимум дисперсии отраженного излучения Солнца.

Спектральные и поляризационные особенности дисперсии флуктуаций излучения в районе солнечной дорожки определяются только составом дошедшего через атмосферу излучения Солнца и коэффициентом отражения воды $\rho(\omega)$. Ни степень поляризации, ни соотношение между дисперсиями флуктуаций поляризационных составляющих отраженного солнечного излучения не зависят от скорости ветра и других волнообразующих факторов, а определяются только оптическими характеристиками отражающей поверхности и взаимным расположением линии визирования и Солнца [5].

3.2.5 Рассеянное вспененной морской поверхностью ИК излучение Солнца

Помимо явления зеркального отражения солнечного излучения от ВПМ, наблюдение объектов на фоне моря сопровождается появлением в дневных условиях дополнительной помехи в работе ИК приборов - диффузно рассеянным вспененными гребнями волн ИК излучением Солнца.

Появление «барашков» связано с началом обрушения волн, когда крутизна гребней превышает 0,14, и при скорости ветра 5 м/сек появляются отдельные вспененные гребни волн. Для мелководных и пресных акваторий начало обрушения волн относится к скоростям ветра 4-5 м/сек. При 12 м/сек уже 4% площади поверхности моря покрыто пеной, и явление рассеянного солнечного излучения приобретает существенное значение [5]. Количество наблюдаемых вспененных гребней волн в поле зрения ТВП нелинейно растёт с увеличением скорости ветра V . «Плотности распределения относительного «пенпокрытия» весьма сильно отличаются от гауссовского распределения. При нормировке плотности очагов диссипации на морской поверхности размером в 1 км^2 плотность очагов диссипации энергии за счёт образования гребневой пеной аппроксимируется ступенчатой функцией» [16], стр. 80:

$$Q (\text{км}^{-2}) = 281 [1 + 6,37 \cdot 10^{-3} (V-5)^3] \text{ для } V \geq 5 \text{ м/с}; \quad Q (\text{км}^{-2}) = 0 \text{ при } V \leq 5 \text{ м/с}.$$

Физический смысл $Q (\text{км}^{-2})$ – удельная (на единицу площади поверхности моря) плотность очагов диссипации энергии. Это означает, что пороговая плотность очагов диссипации энергии при $V = 5 \text{ м/с}$ составляет около 280 центров на 1 км^2 , затем возрастает по кубическому закону так, что при $V = 10,5 \text{ м/с}$ плотность составляет около 580 центров на 1 км^2 . Пространственное распределение единичных пенных структур как точечных образований на

площади порядка 100 м × 100 м в [16], стр. 82 аппроксимируется распределением Пуассона

$$p(N,A) = [(N_0 A)^N / N!] \exp(- N_0 A),$$

N – удельная (на исследуемую площадь кадра) плотность пенных структур; N_0 – математическое ожидание процесса, или, интенсивность появления центров обрушения гравитационных океанических волн на площади исследуемой акватории; A – площадь исследуемого кадра. В таблице 3.1 приводятся экспериментальные значения [16] параметров распределения удельной плотности центров обрушения N и СКО их интенсивности σ .

Таблица 3.1 – Плотность центров обрушения гребней волн в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра V м/с	N_0 (км ⁻²)	σ / N_0
5,7	2,09	4,11
9,5	3,95	6,75
10,5	6,94	16,88

При усилении ветра зависимость среднего значения удельной плотности пенных структур N_0 от скорости приповерхностного ветра V аппроксимируется ступенчатой кубической функцией [16]:

$$N_0 = 210 [1 + 2 \cdot 10^{-2}(V-5)^3] \text{ для } V \geq 5 \text{ м/с и } N_0 = 0 \text{ при } V \leq 5 \text{ м/с.}$$

Область морской поверхности с одинаковой яркостью «барашка» соизмерима по линейным размерам во всех направлениях, однако при наблюдении при скользких углах мгновенное поле зрения ТВП соответствует малому участку поверхности моря в азимутальном направлении и очень большому - по углу места. Например, при расстоянии до «барашка» $l_{mn} = 5$ км, высоте наблюдателя $H = 30$ м над уровнем моря и при мгновенном поле зрения прибора $0,3 \times 0,3$ мрад², линейные размеры участка морской поверхности, формирующего фоновое излучение в пределах элементарного мгновенного поля зрения, составляет $1,5 \times 150$ м². При этом среднее количество вспененных гребней волн $B = A_c N_0 B$ в тепловизионном стробе наблюдения цели составит от ~2 до ~10 штук, как это показано в таблице 3.2. Эти значения можно принять в качестве усреднённой оценки интенсивности фоновых помех при наблюдении в пригоризонтной области моря.

Таблица 3.2 – Количество вспененных гребней в стробе 30 x 30 пикселей 0,3 x 0,3 мрад²

Скорость ветра V , м/с	5,7	9,5	10,5
Плотность обрушающихся гребней волн N_0 , км ⁻²	2,09	3,95	6,94
Количество вспененных гребней в стробе 30 × 30 пикселей 0,3 × 0,3 мрад ²	2,82	5,32	9,35

Средняя высота вспененного гребня составляет 0,3–0,5 м [16]. Принимая, что в минимальной оценке для изотропного неразвитого волнения горизонтальные размеры зоны обрушения не меньше вертикальных, можно ориентироваться на оценочную площадь наблюдаемого вспененного гребня волны от 0,01 м² до 0,25 м². Оценки контрастного ИК излучения вспененных гребней волн на фоне ВПМ имеют смысл лишь при совместном рассмотрении их собственного и отражённого от них излучения фона, в том числе и Солнца.

В точке диффузного рассеяния на морской поверхности энергетическая облученность «барашка» E_{δ} , обусловленная излучением Солнца, равна

$$E_{\delta} = 0,25 \cdot L_c^0 \cdot \tau(\varphi_c) \cdot \pi \cdot \varepsilon^2.$$

Энергетическая яркость рассеянного в направлении наблюдателя излучения Солнца равна:

$$L_{\delta} = L_{\text{солнца}} \cdot \tau_{\text{атмосферы}}(\varphi_c^*) \cdot \rho_{\delta}(\omega^*).$$

Совокупность таких участков, образующих вспененный гребень волны, создает в плоскости входного зрачка ИК прибора на дистанции $l_{\text{ин}}$ энергетическую облученность $E_{\text{вх.зр.}}$

$$E_{\text{вх.зр.б.}} = L_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot \tau_{\delta} / l_{\text{ин}}^2 = L_c^0 \cdot \tau_c \cdot S_{\delta} \cdot \rho_{\delta} \cdot \tau_{\delta} / l_{\text{ин}}^2,$$

где S_{δ} – видимая наблюдателю площадь вспененного гребня волны.

В дневных условиях в зависимости от степени ослабления солнечного излучения атмосферной трассой отраженное от «барашка» ИК излучение Солнца может быть зафиксировано в «окне прозрачности» ИК прибором с чувствительностью 10^{-13} Вт/см² на дистанциях от 12 км (при высокой прозрачности атмосферы) до 2 км (при замутненной атмосфере и низком положении Солнца). Если одновременно с целью в поле зрения попадает участок ВПМ с «барашком», освещенным Солнцем, то при обнаружении и захвате цели в строб сопровождения в процессе слежения за нею сигнал на входном зрачке ИК прибора изменяется случайным образом. Закон изменения амплитуды оптического сигнала можно связать с волнообразующими параметрами. Среднее время жизни пенной структуры составляет от 2 секунд до 5 секунд [16], стр. 113. Среднее расстояние между гребнями волн d связано со средним периодом волнения t соотношением [5], включающим значение постоянной ускорения силы тяжести g :

$$t^2 = 2\pi d / 0,65 g; d = 0,65 g t^2 / 2\pi \approx 1,014 t^2.$$

Средний период волнения t может быть оценён на основании статистических его связей со скоростью ветра V для заданного района Мирового океана [5]. На основании этого среднее расстояние между обрушающимися гребнями d_{δ} можно принять равным

$$d_{\delta} \approx d / P_{\delta} \approx d / \{ 281 [1 + 6,37 \cdot 10^{-3} (V-5)^3] \} \approx 1,014 t^2 / \{ 281 [1 + 6,37 \cdot 10^{-3} (V-5)^3] \}$$

и среднее время между попаданием «барашка» в поле зрения обнаружителя оценить как

$$\bar{t}_6 = \frac{\bar{\lambda}_6}{V_{\text{сканирования}} + V_{\text{в}} \cdot \cos\psi_{\text{в}}} = \frac{\bar{\lambda}_6 \cdot P_6^{-1}}{V_{\text{сканирования}} + V_{\text{в}} \cdot \cos\psi_{\text{в}}},$$

где $V_{\text{в}}$ – средняя скорость распространения волнения, $\psi_{\text{в}}$ – угол между направлением распространения волнения и направлением визирования, $V_{\text{сканирования}}$ – линейная скорость перемещения проекции мгновенного поля зрения сканирующего ИК прибора по ВПМ. Вероятность обрушения отдельных гребней волн можно принять приближённо соответствующей закону Пуассона с относительной интенсивностью $\bar{\gamma}_6 = 1/\bar{t}_6$. Число скачков K энергетической облучённости в плоскости входного зрачка $E_{\text{вх.зр}}$ от значения $E_{\text{вх.зр.фон}}$ до $E_{\text{вх.зр.б}}$ за время $T = Z \cdot t_{\text{кадра}}$ будет наблюдаться с вероятностью

$$p(K, T) = [(\gamma \cdot T)^K / K!] \exp\{-\gamma \cdot T\} = \{T \cdot \{281 [1 + 6,37 \cdot 10^{-3} (V - 5)^3]\} [(V_{\text{нлц}} + V_{\text{в}} \times \cos\psi_{\text{в}})]\}^K (d \cdot K!)^{-1} (\exp\{T \cdot \{281 [1 + 6,37 \cdot 10^{-3} (V - 5)^3]\} [(V_{\text{нлц}} + V_{\text{в}} \cos\psi_{\text{в}})] / d\}),$$

где T – общее время анализа изображения; Z – количество анализируемых кадров; $t_{\text{кадра}}$ – время одного кадра (0,02 сек).

Эта величина может, в определённых условиях, приниматься за величину «вероятности ложных тревог» $P_{\text{лт}}$ для систем автоматического обнаружения и сопровождения целей (таблица 3.3). Её значение может превышать на несколько порядков значение $P_{\text{лт}}$, обусловленное внутренними шумами ИК прибора. Поэтому алгоритмы обработки сигналов, оптимизированные на его выделение из внутренних шумов, могут оказаться проигрышными в реальных условиях воздействия фоновых помех такого рода. Если речь идёт о тепловизионном режиме, то время обнаружения и распознавания оператором малоразмерных целей на ВПМ (шлюпки, пловца, беспилотные аппараты) заметным образом зависит от количества целеподобных отметок, которые формируют «барашки» и блики на склонах волн.

Таблица 3.3 – Вероятности появления в стробе наблюдения сигнала от вспененного гребня волны

Скорость ветра V м/с	Количество центров обрушения на 1 км ²	Вероятность появления сигнала от «барашка», за время одного кадра $t_{\text{кадра}}$	
		площадь ВПМ ~ 290 м ²	площадь ВПМ ~ 1342 м ²
5,7	280	0,081	0,376
10,5	580	0,168	0,778

В «окне прозрачности» атмосферы 8–14 мкм собственное излучение «барашков» соизмеримо с контрастом мало нагретой цели только в том случае, если «барашек» находится существенно ближе к обнаружителю, чем цель. Например, шлюпка в верхней части поля обзора наблюдательного прибора, а «барашек» - в нижней части поля обзора создают одинаковую облучённость в

плоскости его входного зрачка. С уменьшением поля обзора помехозащищенность ИК прибора возрастает, однако флуктуации контрастного сигнала от цели при этом не уменьшаются из-за флуктуаций излучения подстилающей поверхности при периодическом прохождении линии визирования через «барашки».

Отраженное и рассеянное ИК излучение Солнца резко повышает заметность вспененных гребней волн в обоих спектральных диапазонах 3–5 мкм и 8–14 мкм, причем это повышение в существенно большей степени сказывается в области 3–5 мкм из-за спектрального состава солнечной подсветки.

Наиболее сложной в помеховом плане является ситуация переменной облачности, когда «барашки» могут менять знак оптического контраста в зависимости от того, освещены они Солнцем или нет.

В ночных условиях вспененные гребни волн также остаются источником достаточно мощной фоновой помехи, однако радиационные контрасты, обусловленные только собственным излучением пены, существенно меньше теплового контраста наблюдаемых целей и могут давать соизмеримые с ним сигналы, если находятся существенно ближе к наблюдателю.

Обобщённые в [5] результаты свидетельствуют, что в наиболее обеспеченных условиях по Мировому океану флуктуации энергетической яркости собственного ИК излучения фона за счёт бликов составляют от $1,1 \cdot 10^{-5}$ Вт/см²ср до $2,77 \cdot 10^{-5}$ Вт/см²ср в диапазоне 3,4–5,2 мкм и от $2,12 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²ср до $4,6 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²ср в диапазоне 7,6–13,6 мкм. Максимальная яркость блика на склоне волны в районе солнечной дорожки может достигать 0,24 Вт/см²ср в диапазоне 7,6–13,6 мкм. Помехи, связанные с зеркальным отражением солнечного излучения, расположены в районе солнечной дорожки на ВПМ по направлению на Солнце. С разрывом поверхностной плёнки воды и образованием пены физическая картина формирования отражённого излучения изменяется принципиально, и процессы зеркального отражения скачком сменяются процессами диффузного рассеяния оптического излучения. Поэтому в стробе наблюдения ТВП могут присутствовать точечные ложные отметки, образованные как бликами зеркального отражения излучения Солнца от воды, так и его рассеянным на вспененных гребнях волн излучением. Помехи, связанные с диффузным рассеянием излучения Солнца на вспененном гребне волны, могут появляться при любом положении Солнца относительно наблюдателя. При этом к собственному тепловому контрасту «барашка» добавляется мощная (иногда на 2 порядка большая) подсветка Солнцем. В частности, для современных ТВП контраст энергетической яркости в диапазоне 7,6–13,6 мкм собственного излучения вспененных гребней волн составляет от $-3,5 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²ср до $+5,1 \cdot 10^{-4}$ Вт/см²ср, а рассеянное на них солнечное излучение даёт контраст до $+4,5 \cdot 10^{-2}$ Вт/см²ср.

При скользящих углах визирования, например, на $0,125^\circ$ ($\sim 2,2$ мрад) ниже линии морского горизонта, в зависимости от состояния небосвода (сплошная облачность или ясный небосвод) и от соотношения температур воздуха и воды, контраст энергетической яркости собственного излучения

вспененных гребней волн составляет от $-17,1$ мкВт/см²ср до $+44,2$ мкВт/см²ср в диапазоне $3,4-5,2$ мкм и от -40 мкВт/см²ср до $+360$ мкВт/см²ср в диапазоне $7,8-13,6$ мкм. Эти значения можно принять в качестве оценок размаха амплитуд сигналов от малоразмерных естественных помех при обнаружении и сопровождении объектов на предельных дистанциях.

С помощью современных ИК приборов дистанционного зондирования разделить в регистрируемом излучении ВПМ компоненты собственного и отраженного солнечного излучения невозможно. Требуются заметные отличия в спектральном или поляризационном составе излучения естественного или искусственного источника подсветки, чтобы выявить их после отражения от ВПМ, если регистрируется среднее значение излучения. Однако физические предпосылки для выделения отражённой составляющей ИК излучения из суммарного лучистого потока существуют, и связаны они с регистрацией статистических характеристик этого излучения более высокого порядка. В соответствии со статистикой Бозе-Эйнштейна, которая описывает излучение АЧТ, от температуры источника излучения зависит «параметр вырождения $\delta_v(\lambda)$ » [2] стр. 479, который связан с корреляцией излучения фотонов тепловыми источниками и определяется как

$$\delta_v(\lambda) = 1 / [\exp(C_2/\lambda T) - 1]; C_2 = 1,43879 \text{ см К.}$$

Значения параметра вырождения $\delta_v(\lambda)$ существенным образом различаются для значений лучистого потока, испускаемого телами с низкой и высокой температурой. Если бы было возможно зарегистрировать эту характеристику фонового ИК излучения, то можно было бы определить температуру излучения источника подсветки, не прибегая к привлечению для анализа сигналы в нескольких спектральных диапазонах. Например, при отражении излучения Солнца или другого высоко нагретого объекта от относительно холодной поверхности моря в суммарном излучении ВПМ составляющая отражённого излучения объекта будет иметь значение параметра вырождения $\delta_v(\lambda)$ выше, чем составляющая собственного теплового излучения гладкой или вспененной поверхности.

3.2.6 Отраженное от взволнованной морской поверхности ИК излучение облаков

Отражённое от ВПМ нисходящее ИК излучение облаков формирует стохастическое оптическое поле ВПМ с масштабом неоднородностей, определяемых размерами облаков или разрывов между ними. Это обуславливает конечную вероятность появления таких метеоситуаций, когда наблюдаемые размеры участков отражения излучения облаков от ВПМ совпадают с наблюдаемыми размерами других аномалий на ВПМ, вызванных иными физическими факторами, в том числе, внутренними гидродинамическими воздействиями и т.п. Общая тенденция связи наблюдаемого оптического поля ВПМ и его волнения заключается в том, что с уменьшением волнения границы между участками отражения излучения

облаков и участков ЯН становятся более четкими, а размеры этих областей несколько уменьшаются. При увеличении волнения границы участков размываются, а сами они увеличиваются и сливаются.

Максимально возможный контраст между участками неоднородного оптического поля ВПМ в условиях переменной облачности равен [5]

$$\Delta \bar{L}_m = \Delta L_{вз} \cdot Z.$$

Принимая во внимание, что нисходящее излучение небосвода при СО и ЯН отличается по спектральному составу, т.е. меняется и тонкий спектральный состав ИК излучения морской поверхности, можно предположить, что при анализе тонкой спектральной структуры и поляризационных характеристик ИК излучения ВПМ можно выявить устойчивые отличительные признаки оптического поля, характерные именно для отраженного излучения облаков (в отличие от аномалий, вызванных, например, поверхностными проявлениями внутренних гидродинамических воздействий), позволяющие выделить эти области как фоновую помеху с высокой достоверностью.

Дисперсия флуктуаций собственного ИК излучения ВПМ для участков СО и ЯН изменяется от

$$D^{CO} = \Delta L_{MB}^0 \cdot D_1$$

до

$$D^{ЯН} = \Delta L_{MB}^0 \cdot D_1 + \Delta L_{MB}^0 \cdot \Delta L_{вз} \cdot D_2 + \Delta L_{вз}^2 \cdot D_3$$

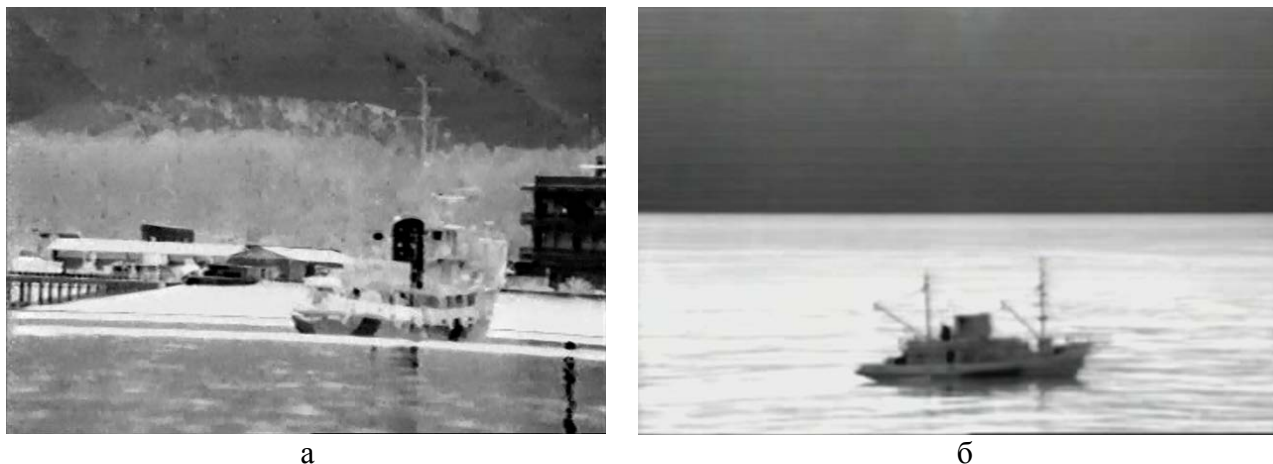
то есть на величину

$$D^{ЯН} - D^{CO} = \Delta L_{MB}^0 \cdot \Delta L_{вз} \cdot D_2 + \Delta L_{вз}^2 \cdot D_3.$$

Помимо указанного механизма формирования неоднородностей яркостей на ВПМ из-за неравномерности отражения нисходящего ИК излучения облачного небосвода, в литературе существуют указания на физическую возможность образования неоднородностей температуры поверхностной излучающей пленки ВПМ, обусловленных различным теплообменом участков морской поверхности под облаком и под разрывом между облаками. Этот эффект имеет второй порядок малости по сравнению с отраженным нисходящим ИК излучением. Вместе с тем, физическая картина динамики метеорологических процессов характеризуется тем, что в области под кучевыми облаками атмосферное давление больше, чем под ясным небосводом, а при движении облаков в приводном слое перед облаком движется ветровой фронт. Для морских условий это является физической причиной изменения целой совокупности гидрометеопараметров (а не только нисходящего ИК излучения небосвода), влияющих на характеристики оптического поля ВПМ.

3.2.7 Отражение от ВПМ ИК излучения объектов конечных размеров

При наблюдении за надводной обстановкой с помощью оптических средств, помимо собственно объектов (целей), может наблюдаться и их ИК излучение, отражённое от водной поверхности (рис. 3.6 а, б).



а

б

Рисунок 3.6 – Отражённое от ВПМ излучение объектов конечных размеров при наблюдении в диапазоне 8–12 мкм: а – отражается ИК излучение трубы корабля и ИК излучателя на балконе здания; б – отражается тепловое излучение корпуса корабля

Отражённое ИК излучение входит составной частью в общую тепловую картину фоноцелевой обстановки. Характерными примерами являются солнечная дорожка, отраженное ИК излучение отдельных кучевых облаков, отраженное от ВПМ ИК излучение корпуса надводных кораблей или береговых строений. Характеристики отраженного от ВПМ ИК излучения объектов конечных размеров, находящихся на произвольной высоте над уровнем моря и обладающих произвольным распределением излучения, могут быть рассчитаны с учетом двухстороннего затенения и с использованием геометрических соотношений в рамках зеркального отражения ИК излучения от факетов [5]. Основываясь на общности физической картины ИК излучения от ВПМ, в основе численных методик расчетов лежит подход, когда первоначально рассчитываются характеристики отраженного от ВПМ ИК излучения геометрически простых излучателей, а затем оптическое поле реальных объектов синтезируется как суперпозиция ИК излучения таких элементарных излучателей. На конечном этапе рассчитывается суммарное отраженное от ВПМ ИК излучение объекта как суперпозиция отраженного от ВПМ ИК излучения составляющих его простых элементов [5].

Особый интерес представляет формирование отражения от ВПМ ИК излучения направленных излучателей антропогенного происхождения (прожекторов, лазеров). Методики расчётов характеристик отражённого излучения [5] позволяют достаточно точно определить энергетические и геометрические параметры возникающих на воде бликов. На рис. 3.6 (б) и рис. 3.7 иллюстрируется тепловизионное изображение таких бликов в натуральных условиях.



Рисунок 3.7 – Чёрная область в левой нижней части – отражение от ВПМ излучения лазера с длиной волны 10,6 мкм, зарегистрированное ТВП LWIR диапазона

3.2.8 Контраст ИК излучения температурных аномалий на ВПМ

Наличие на ВПМ участков, отличающихся по температуре тонкого излучающего слоя воды, может быть вызвано естественными причинами, например, локальным выхолаживанием моря при неоднородном конвекционном теплообмене с воздушными массами (неоднородное ветровое поле приповерхностного слоя атмосферы). Согласно [5], «изменение скорости ветра изменяет условия обдува и, следовательно, изменение тепла, уносимого с поверхности моря при испарении. Величина перепада температуры, соответствующая этим изменениям, может быть оценена по формуле

$$\Delta T = 0,01 \cdot \Delta V,$$

где V – м/с, ΔT - К. При $\Delta V = 10$ м/с $\Delta T = 0,1$ К.»

Тепловые «дорожки» на ВПМ могут быть обусловлены выходом на поверхность глубинных масс воды из-за движения кораблей по поверхности или при разрыве поверхностной пленки.

На рис. 3.8 выделяются области ВПМ, отличающаяся радиационной температурой (более светлая часть в центре кадра).



Рисунок 3.8 – Тепловизионное изображение корабля в прибрежной зоне в летнее время в LWIR диапазоне

Тепловизионное изображение получено в летнее время в прибрежной зоне Чёрного моря, недалеко от места впадения в него горной реки с температурой воды около +14°C. Температура морской воды составляла около +24°C. Контактным способом измеренная (с борта наблюдаемого корабля) разность температур воды в «светлой» зоне и вне её составляла от 1,8°C до 2,3°C. Тепловизионное изображение получено в режиме «позитив», при котором более тёплые объекты отображаются более тёмными (тепловыделяющие элементы конструкции корабля), а более холодные отображаются более светлыми градациями серого. Поэтому происхождение более светлой части изображения ВПМ в центре кадра связывается с более холодной поверхностной плёнкой воды. Рис. 3.8 относится к достаточно редким натурным экспериментам, когда можно зафиксировать влияние одного физического фактора на природное явление, зависящее от совокупности случайных гидрологических и метеорологических факторов.

Предпосылки к изменению температуры поверхностной пленки существуют также при взаимодействии внутренних гидродинамических воздействий с поверхностью. Контраст энергетической яркости таких областей при любой облачности описывается выражением

$$\Delta \bar{L}_T = \bar{L}_M(T_1) - \bar{L}_M(T_2) = (1 - A) \cdot [L^0(T_{M2}) - L^0(T_{M1})].$$

Максимальное значение $\Delta \bar{L}_T$ наблюдается при отвесных углах визирования ($\varphi \rightarrow 0$)

$$\Delta \bar{L}_T = (1 - \rho)[L_2^0(T_{M2}) - L_1^0(T_{M2})] = \varepsilon \cdot \Delta L_M^0$$

В отличие от контраста среднего значения яркости, различия в дисперсиях флуктуаций яркости ВПМ в области невозмущенного фона и в области температурных аномалий зависят от состояния небосвода.

Поляризационные характеристики ИК излучения ВПМ очень мало зависят от температуры воды (в пределах ее возможных природных значений). Можно считать, что ни степень поляризации, ни отношение поляризационных составляющих заметно не изменяются при последовательном визировании участков ВПМ с различной температурой.

Абсолютные значения изменения дисперсии флуктуаций яркости относительно невелики и, скорее всего, самостоятельно не могут являться устойчивым отличительным признаком температурных аномалий в присутствии других фоновых помех. Однако при учете совокупного влияния всех гидрометеопараметров на характеристики оптического поля ВПМ указанные характеристики не относятся к пренебрежимо малым и должны приниматься в расчет наряду с другими.

Для СО

$$\Delta D_T^{CO} = D_1 \left[(L_M^0(T_1) - L_B^0)^2 - (L_M^0(T_2) - L_B^0)^2 \right] = D_1 \left[L_M^0(T_1) - L_M^0(T_2) \cdot (L_M^0(T_1) + L_M^0(T_2) - 2L_B^0) \right] \quad (4.5.8)$$

Для ЯН

$$\begin{aligned} \Delta D_{\text{Т}}^{\text{ЯН}} &= D_1 \left[\left(L_{\text{М}}^0(T_1) - L_{\text{В}}^0 \right)^2 - \left(L_{\text{М}}^0(T_2) - L_{\text{В}}^0 \right)^2 \right] + D_2 \Delta L_{\text{ВЗ}} \left[L_{\text{М}}^0(T_1) - L_{\text{М}}^0(T_2) \right] = \\ &= \left[L_{\text{М}}^0(T_1) - L_{\text{М}}^0(T_2) \right] \cdot \left\{ D_1 \left[L_{\text{М}}^0(T_1) + L_{\text{М}}^0(T_2) + 2L_{\text{В}}^0 \right] + D_2 \cdot \Delta L_{\text{ВЗ}} \right\} \end{aligned}$$

3.2.9 Блики на склонах отдельных волн

Флуктуации яркости, вызванные отражением от склонов волн нисходящего излучения небосвода, наиболее заметны в тех областях поля обзора, где величина проекции мгновенного поля зрения прибора на местности соизмерима с линейными размерами склонов волн. В этом случае мелкие шероховатости на поверхности воды играют роль диффузных рассеивателей, обеспечивая в конечном итоге диффузно-зеркальную индикатрису отражения склонов крупных волн. Как и другие аномалии на ВПМ, блики на склонах отдельных волн могут нарушать стационарность случайного процесса - флуктуаций её яркости, если в масштабах наблюдения такие блики проявляются как отдельные редкие события. Если же масштабы наблюдения достаточно велики, то бликующие склоны волн входят как составляющая часть в общий статистический процесс флуктуаций яркости моря, который вполне стационарен в том смысле, что выражения для функций распределения любого порядка не зависят от положения начала отсчёта.

В самом первом приближении максимально возможное значение яркости отдельного склона волны можно оценить, приняв его плоским отражателем со средним коэффициентом зеркального отражения $\rho(\bar{\omega})$

$$L^{co} = L_{\text{М}}^0 - (\Delta L_{\text{МВ}}^0) \cdot \rho(\bar{\omega}); L^{\text{ЯН}} = L_{\text{М}}^0 - (\Delta L_{\text{МВ}}^0) \cdot \rho(\bar{\omega}) - \Delta L_{\text{ВЗ}} \cdot \rho(\bar{\omega}) \cdot f(\varphi_{\text{Н}}).$$

Геометрические соотношения зависят от угла места наблюдения участка поверхности φ и азимутального угла ξ между направлением распространения волнения и проекцией линии визирования. Наиболее вероятное значение среднего наклона $\bar{\beta}$ можно определить по результатам анализа статистики волнения для различных акваторий. Максимальная крутизна волны, при которой сохраняется целостность поверхностной пленки, составляет 0,14, а из общефизических соображений считается, что максимальный наклон склона волны до обрушения не превышает $\beta \leq 30^\circ$. Приняв математическое ожидание $\bar{\beta} = 8^\circ$ [10], получим, что при наклонных углах визирования, например, 2° ниже линии горизонта, угол отражения от воды составит 80° , а угол визирования небосвода $\varphi_{\text{Н}} = 72^\circ$. При ЯН значение функции $f(\varphi_{\text{Н}})$ составит $\sim 0,494$, что обеспечивает различный контраст блика на склоне волны по отношению к излучению АЧТ с температурой воды. Значения контрастной яркости бликов на склоне волн оцениваются для условий, когда температура воды больше или меньше температуры воздуха.

$$T_{\text{М}} > T_{\text{В}} \quad (T_{\text{М}} = 286 \text{ К}; T_{\text{В}} = 278 \text{ К})$$

$$\Delta L_{\text{блик}}^{\text{co}} = 1,62 \cdot 10^{-5} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(3,4 - 5,2 \text{ мкм}) \quad \text{и} \quad 2,34 \cdot 10^{-4} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(7,6 - 13,6 \text{ мкм})$$

$$\Delta L_{\text{блик}}^{\text{ян}} = 2,77 \cdot 10^{-5} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(3,4 - 5,2 \text{ мкм}) \quad \text{и} \quad 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(7,6 - 13,6 \text{ мкм})$$

$$T_{\text{м}} < T_{\text{в}} \quad (T_{\text{м}} = 286 \text{ К}; \quad T_{\text{в}} = 294 \text{ К})$$

$$\Delta L_{\text{блик}}^{\text{co}} = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(3,4 - 5,2 \text{ мкм}) \quad \text{и} \quad 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(7,6 - 13,6 \text{ мкм})$$

$$\Delta L_{\text{блик}}^{\text{ян}} = 1,10 \cdot 10^{-5} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(3,4 - 5,2 \text{ мкм}) \quad \text{и} \quad 2,12 \cdot 10^{-4} \text{ Вт / см}^2 \cdot \text{cp}(7,6 - 13,6 \text{ мкм})$$

Флуктуации яркости фона от бликов ИК излучения на склонах волн могут чрезвычайно усложнить структуру сигнала при визировании взволнованной поверхности, что и наблюдается при анализе тепловизионных изображений ВПМ. При улучшении пространственного и энергетического разрешения ИК приборов одновременно с увеличением амплитуды полезного сигнала от цели увеличивается количество и амплитуда естественных помех, на фоне которых необходимо этот сигнал выделить. Блики на склонах волн вносят свой вклад сложную фоновую обстановку при наблюдении объектов на фоне моря. На рис. 3.9 было бы чрезвычайно трудно обнаружить голову всплывшего дайвера, поскольку она имеет размеры, близкие к тепловизионному изображению крупных волн.



Рисунок 3.9 – Тепловизионное изображение ВПМ, полученное ТВП «Маугли» изготовления АО «ЛЮМО»

Наличие крупномасштабных бликующих склонов волн создает тепловизионную картину, которую удобно характеризовать и анализировать с использованием текстурного подхода. При наличии неизменных статистических характеристик взволнованная морская поверхность может иметь аномалии, резко выделяющиеся по структуре теплового изображения волн (по текстуре тепловизионного изображения ВПМ). Особенностью такого анализа является необходимость иметь достаточно большие объемы выборки, что возможно, например, при использовании ИК приборов с воздушных или космических носителей.

3.2.10 Контрастное излучение мало нагретых искусственных объектов и естественных образований на поверхности моря

Контраст ИК излучения объектов, находящихся непосредственно в плоскости подстилающей поверхности (на поверхности моря) в общем случае носит случайный характер из-за случайного поля яркости ИК излучения ВПМ и из-за динамики собственного ИК излучения объекта. Для широкого круга прикладных задач, в частности для создания синтезированных ИК изображений объектов на фоне моря, представляет интерес разность средних составляющих ИК излучения цели и подстилающей поверхности (трактуемая как контраст ИК излучения), определяющая амплитуду полезного сигнала, выделяемого на фоне внутренних и внешних помех в ИК приборах:

$$\Delta \bar{L}_{ц} = \bar{L}_{ц} - \bar{L}_{м}.$$

В общем случае собственное оптическое поле целей представляет собой суперпозицию собственного и отраженного фонового излучения, зависящих от большого числа физических факторов. Можно выделить несколько групп гидрометеоситуаций при наблюдении источников объектов без тепловыделения, температура которых близка к температуре воды или воздуха и определяется свободным теплообменом с окружающей средой. Энергетическая яркость таких объектов может быть представлена в виде

$$L_{ц} = \varepsilon_{ц} \{ L_{ц}^0 - [L_{м}^0 - L_{ц}^0] \cdot m \} + \rho_{ц} L_{ф},$$

где $\varepsilon_{ц} = 1 - \rho_{ц}$ – коэффициенты излучения и отражения цели; m – функция, характеризующая степень отклонения излучения цели от излучения АЧТ с температурой воды.

Для выявления основных закономерностей можно принять излучательную способность поверхности объекта наблюдения близкой к единице ($\varepsilon_{ц} \approx 1$), что правомерно для некоторых реальных объектов в диапазоне 3–14 мкм (например, [10]). Принимая $\varepsilon_{ц} = 1$, получим:

$$\Delta \bar{L}_{ц}^{co} = \Delta L_{мв}^0 \cdot (A - m); \Delta \bar{L}_{ц}^{яи} = \Delta L_{мв}^0 \cdot (A - m) + \Delta L_{вз} Z.$$

Для некоторых приложений представляют интерес расчётные выражения, в которых можно было бы непосредственно получать значения яркостной температуры на длине волны λ в зависимости от параметров условий наблюдения. В пределах погрешностей, возникающих при допущении о возможной аппроксимации зависимости L_0 от T при малых ΔT по закону Вина, получим:

$$\Delta T_{цярк}^{co}(\lambda) \cong \frac{(A - m)}{c_2} \cdot \lambda \cdot T_{и}^2 \left\{ 1 - \exp \left[- \frac{c_2}{\lambda} \cdot \frac{\Delta T_{мв}}{T_{м}(T_{м} - \Delta T_{мв})} \right] \right\}$$

Для радиационных температур в диапазоне $\Delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, принимая усредненные значения по спектру A , Z и используя интегральные показательные функции

$$E_i(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{\alpha x}}{x} dx; \quad c_2 = 1,44 \cdot 10^4 \text{K} \cdot \text{мкм}; \quad E_n(x) = \int_1^{\infty} e^{-xt} \cdot t^{-n} dt$$

МОЖНО ПОЛУЧИТЬ:

$$\begin{aligned} \Delta T_{\text{црэд}}^{\text{co}} \approx & (A-m) \cdot \frac{T_M^2}{c_2} \left\{ \frac{1}{2} (\lambda_2^2 - \lambda_1^2) - \frac{3}{2} c_2 \frac{\Delta T_{\text{MB}}}{T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})} \left[\lambda_1 \cdot \exp\left(\frac{c_2 \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_1 T_M (T_M - \Delta T_{\text{MB}})}\right) - \right. \right. \\ & \left. \left. - \lambda_2 \cdot \exp\left(\frac{c_2 \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_2 T_M (T_M - \Delta T_{\text{MB}})}\right) \right] \right\} + \frac{c_2^2 \cdot \Delta T_{\text{MB}}^2}{\lambda_1 \cdot T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})^2} \cdot \left[E_i \cdot \left(\frac{c_2 \cdot \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_2 \cdot T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})} \right) - \right. \\ & \left. - E_i \left(\frac{c_2 \cdot \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_1 \cdot T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})} \right) \right] \\ \Delta T_{\text{црэд}}^{\text{ян}} (\Delta \lambda) \approx & \frac{T_M^2}{c_2} (A-m) \left[\lambda_2^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2 E_3 \cdot \left(\frac{c_2 \cdot \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_2 \cdot T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})} \right) + \right. \\ & \left. + \lambda_1 E_3 \left(\frac{c_2 \cdot \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_1 \cdot T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})} \right) \right] + Z \cdot \left[\lambda_2 E_3 \cdot \left(\frac{c_2 \cdot \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_2 \cdot T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})} \right) \right. \\ & \left. + \lambda_1 E_3 \left(\frac{c_2 \cdot \Delta T_{\text{MB}}}{\lambda_1 \cdot T_M \cdot (T_M - \Delta T_{\text{MB}})} \right) \right] \end{aligned}$$

Дальнейшее рассмотрение целесообразно проводить для таких групп объектов, температура излучения которых равна температуре воды ($L_{\text{ц}} = L_{\text{м}}^0, m = 0$) или температуре воздуха ($L_{\text{ц}} = L_{\text{м}}^0, m = 1$). Из общезначимых представлений в такие группы можно включить некоторые естественные образования и искусственные объекты (таблица 3.4):

Таблица 3.4 – Расчётные выражения для оценки контрастной яркости малоагретых объектов

	$L_{\text{ц}}$	Небо	$T_{\text{м}} < T_{\text{в}}, \Delta \bar{L}_{\text{ц}}$ Весна, северные районы летом	$T_{\text{м}} > T_{\text{в}}, \Delta \bar{L}_{\text{ц}}$ осень- зима, ночное время летом	Объекты и фоновые помехи
+1	$L_{\text{ц}} = L_{\text{в}}^0$	СО	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A-1) > 0$	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A-1) < 0$	Неагретые надстройки НК, шлюпки, камни, береговая черта
		ЯН	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A-1) + \Delta L_{\text{в3}} Z > 0$	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A-1) + \Delta L_{\text{в3}} Z < 0$	
0	$L_{\text{ц}} = L_{\text{м}}^0$	СО	$\Delta L_{\text{MB}}^0 A < 0$	$\Delta L_{\text{MB}}^0 A > 0$	Буруны за кораблем, "барашки", пена, плавающие буи и мины
		ЯН	$\Delta L_{\text{MB}}^0 A + \Delta L_{\text{в3}} L < 0$	$\Delta L_{\text{MB}}^0 A + \Delta L_{\text{в3}} Z > 0$	
-1	$L_{\text{ц}} = L_{\text{м}}^0 - \Delta L_{\text{MB}}^0$	СО	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A+1) < 0$	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A+1) > 0$	Навигационные знаки, бонны, части НК около ВОДЫ
		ЯН	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A+1) + \Delta L_{\text{в3}} Z < 0$	$\Delta L_{\text{MB}}^0 (A+1) + \Delta L_{\text{в3}} Z > 0$	

На рис. 3.10 иллюстрируется характерный сюжет, в котором объекты, находящиеся в тепловом равновесии с окружающей средой, формируют

контрастную тепловизионную картину, содержащую контрасты как положительного, так и отрицательного знаков.



Рисунок 3.10 – Распределение тепловых контрастов объектов, находящихся в равновесном теплообмене с окружающей средой в диапазоне 8–12 мкм

3.2.11 Контраст энергетической яркости навигационных знаков, камней и берегового уреза

Для объектов, температура которых определяется температурой воздуха (например, навигационные знаки на море, камни, выступающие из воды, и береговой урез) при $m = 1$ контраст энергетической яркости можно записать в следующем виде:

$$\Delta \bar{L}_{\text{ц}}^{\text{co}} = \Delta L_{\text{MB}}^0 \cdot (A - 1); \Delta \bar{L}_{\text{ц}}^{\text{ЯН}} = \Delta L_{\text{MB}}^0 \cdot (A - 1) + \Delta L_{\text{B3}} \cdot Z$$

$$\Delta T_{\text{цр ад}}^{\text{co}} = (A - 1) \cdot N \cdot \left\{ \frac{\lambda_2^2 - \lambda_1^2}{2} - \frac{3}{2} B \left[\lambda_1 \cdot \exp\left(\frac{B}{\lambda_1}\right) - \lambda_2 \cdot \exp\left(\frac{B}{\lambda_2}\right) \right] + B^2 \left[E_i\left(\frac{B}{\lambda_1}\right) - E_i\left(\frac{B}{\lambda_2}\right) \right] \right\}$$

$$\Delta T_{\text{цр ад}}^{\text{ЯН}} = \Delta T_{\text{цр ад}}^{\text{co}} + Z \cdot N \cdot \left\{ \frac{3}{2} B \left[\lambda_1 \cdot \exp\left(\frac{B}{\lambda_1}\right) - \lambda_2 \cdot \exp\left(\frac{B}{\lambda_2}\right) \right] + B^2 \left[E_i\left(\frac{B}{\lambda_1}\right) - E_i\left(\frac{B}{\lambda_2}\right) \right] \right\}$$

$$N = T_{\text{M}}^2 / 1,44 \cdot 10^4; \quad B = 1,44 \cdot 10^4 \cdot \Delta T_{\text{MB}} / [T_{\text{MB}}(T_{\text{M}} - T_{\text{MB}})].$$

При СО знак контраста определяется соотношением температуры воздуха и воды, но с уменьшением облачности до ЯН зависимость контраста цели от температуры воздуха усложняется, и знак этого контраста может меняться на противоположный. Условием такого изменения является соотношение волнообразующих факторов и состояния атмосферы (главным образом, содержание водяного пара и аэрозолей) и температур воды и воздуха:

$$\Delta L_{\text{MB}}^0 / \Delta L_{\text{B3}} = Z / (1 - A),$$

$$\Delta T_{\text{MB}} = T_{\text{M}}^2 \cdot \lambda \cdot Z_{\lambda} / c_2 \cdot (1 - A_{\lambda}).$$

3.2.12 Контраст энергетической яркости собственного теплового излучения вспененного гребня волны

Когда наблюдаемый объект имеет температуру воды (например, вспененный гребень волны - "барашек") $m = 0$, формулы для расчета контрастного излучения принимают вид:

$$\Delta \bar{L}_{\text{ц}}^{\text{с}^0} = \Delta L_{\text{МВ}}^0 \cdot A; \quad \Delta \bar{L}_{\text{ц}}^{\text{ЯН}} = \Delta L_{\text{МВ}}^0 \cdot A + \Delta L_{\text{ВЗ}}^0 \cdot Z,$$

$$\Delta T_{\text{цярк}}^{\text{с}^0}(\lambda) = T_{\text{М}}^2 \cdot \frac{A \cdot \lambda}{c_2} \cdot \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{c_2}{\lambda} \cdot \frac{\Delta T_{\text{МВ}}}{T_{\text{М}}(T_{\text{М}} - T_{\text{МВ}})} \right] \right\}.$$

Для ЯН, дополнительно предположив в качестве первого приближения (для упрощения расчетных формул в полосах прозрачности атмосферы это допустимо) $L_{0\text{В}} - L_{\text{З}} \cong L_{0\text{В}}$, получим:

$$\Delta T_{\text{цярк}}^{\text{ЯН}}(\lambda) = \Delta T_{\text{цярк}}^{\text{с}^0}(\lambda) + T_{\text{М}}^2 \cdot \frac{Z \cdot \lambda}{c_2} \cdot \exp \left[-\frac{c_2}{\lambda} \cdot \frac{\Delta T_{\text{МВ}}}{T_{\text{М}}(T_{\text{М}} - T_{\text{МВ}})} \right],$$

$$\Delta T_{\text{ц}\Delta\lambda}^{\text{с}^0} \approx T_{\text{М}}^2 \cdot \frac{\bar{A}}{c_2} \cdot \left\{ \lambda_2^2 \lambda_1^2 - \lambda_2 \cdot E_3 \left[-\frac{c_2}{\lambda_2} \cdot \frac{T_{\text{М}} - T_{\text{МВ}}}{T_{\text{М}} \cdot T_{\text{В}}} \right] + \lambda_1 \cdot E_3 \left[-\frac{c_2}{\lambda_1} \cdot \frac{T_{\text{М}} - T_{\text{МВ}}}{T_{\text{М}} \cdot T_{\text{В}}} \right] \right\},$$

$$\Delta T_{\text{ц}\Delta\lambda}^{\text{ЯН}} \approx \Delta T_{\text{ц}\Delta\lambda}^{\text{с}^0} + T_{\text{М}}^2 \cdot \frac{\bar{Z}}{c_2} \cdot \left\{ \lambda_2 \cdot E_3 \left[-\frac{c_2}{\lambda_2} \cdot \frac{T_{\text{М}} - T_{\text{МВ}}}{T_{\text{М}} \cdot T_{\text{В}}} \right] + \lambda_1 \cdot E_3 \left[-\frac{c_2}{\lambda_1} \cdot \frac{T_{\text{М}} - T_{\text{МВ}}}{T_{\text{М}} \cdot T_{\text{В}}} \right] \right\}.$$

При СО контраст "барашка" однозначно определяется соотношением температур воды и воздуха и сложным образом зависит от степени облачности, переходя ноль при условиях ЯН:

$$\frac{\Delta L_{\text{МВ}}^0}{\Delta L_{\text{ВЗ}}^0} = \frac{Z}{A}; \quad T_{\text{В}} - T_{\text{М}} = T_{\text{М}}^2 \cdot \lambda \cdot \frac{Z_{\lambda}}{c_2 \cdot A_{\lambda}}$$

Для большинства гидрометеоситуаций контраст увеличивается с увеличением разности $T_{\text{М}}$ и $T_{\text{В}}$ и уменьшением углов наблюдения $\Phi = \pi/2 - \varphi$, поскольку растет отражённая составляющая в излучении моря. Для переменной облачности ПО контраст "барашка" может изменяться на величину $\Delta L_{\text{ВЗ}} \cdot Z$ в зависимости от того, попадает ли он в зону ВПМ, соответствующую СО или ЯН. Причем это изменение контраста $\Delta \bar{L}_{\text{ц}}$, больше чем изменение контраста, обусловленное возможными изменениями $T_{\text{М}}$ и $T_{\text{В}}$. Например, при $m = 1$ и $\Phi = 10$ изменение температуры воды на 5 К ($T_{\text{М}}$ от 280 К до 285 К) приводит к изменению $\Delta \bar{L}_{\text{ц}}^{\text{с}^0}$ на 0,13 мВт/см²ср (в диапазоне 8–14 мкм), в то время как изменение облачности от СО до ЯН изменяет $\Delta \bar{L}_{\text{ц}}$ на 0,39 мВт/см²ср, то есть изменение контраста в три раза больше.

Для СО изменение соотношения температур воздуха и воды означает изменение знака контраста с переходом его через ноль при скользящих углах визирования при $T_{\text{М}} = T_{\text{В}}$. При ЯН за счет "похолодания" морской поверхности

при скользящих углах наблюдения контраст "барашка" может оставаться значительным даже при $T_m = T_v$. Это общая особенность наблюдения объектов на шероховатой поверхности, состоящая в том, что при скользящих углах визирования увеличивается их заметность из-за возрастающей роли отражённого от подстилающей поверхности ИК излучения верхней полусферы.

Таким образом, определяющее влияние на контраст объектов, находящихся при температуре воды, имеет состояние небосвода (облачность). Затем, последовательно, наиболее важными факторами являются соотношение температур воздуха и воды, степень и направление распространения волнения.

Неоднозначно влияние такого физического фактора, как температура воздуха. Помимо того, что она в определенной степени сказывается на собственно температуру объекта (например, "барашка"), с ней непосредственно связаны величина противоизлучения атмосферы, угловое распределение нисходящего излучения ясного небосвода (зависящее дополнительно от МДВ и влажности воздуха) и, сложным образом, эффективная температура излучения облаков.

Формально функция m не ограничивается пределами 0–1. Физические интерпретации других значений m носят более приближенный характер и служат лишь для выявления качественных закономерностей. Так, при $m = -1$, $L_{\text{ц}} = L_{0\text{м}} - \Delta L_{0\text{мв}}$, что можно трактовать как охлаждение объекта при $T_m > T_v$ (например, за счет испарения с его поверхности водяных брызг) либо как некоторый нагрев при $T_m < T_v$ (например, солнечным излучением или источником внутреннего слабого тепловыделения). Для СО практически для всех объектов, не имеющих внутренних источников подогрева, изменение соотношения температур воздуха и воды означает изменение знака контраста с переходом его через ноль при $T_m = T_v$. При ЯН за счет "похолодания" морской поверхности при скользящих углах наблюдения контраст $\Delta \bar{L}_{\text{ц}}$ может оставаться значительным даже при $T_m = T_v$ и при любых m . Совместное рассмотрение трех факторов, а именно m , T_m и T_v , позволяет несколько с иной точки зрения посмотреть на временные (в течение ночи, суток и т.п.) зависимости контрастного ИК излучения различных объектов на море, поставив в качестве определяющих количественно измеряемые физические параметры условий наблюдения (а не астрономическое или местное время, как это указывается в некоторых справочниках). За счёт ночного выхолаживания воздуха и его нагревания днём контраст ИК излучения объектов, не имеющих внутренних источников подогрева, меняет свой знак с переходом через ноль. Это означает, что существует период, когда контраст таких объектов так мал, что не может быть зарегистрирован ИК приборами. Знание этого периода составляет априорную информацию для систем охраны водного рубежа, позволяющую на это время использовать системы с подсветкой или другие средства. Для навигационного ИК прибора возможен прогноз его периода неэффективности, например, для обнаружения навигационных знаков и плавающих на поверхности опасных предметов. Количественный прогноз можно составлять на основе данных о распределении гидрологических и метеорологических

параметров для данной акватории. Для этого необходимо выстроить приоритет влияния тех или иных параметров условий наблюдения на контраст ИК излучения интересующих объектов, например, шлюпок, пловцов или беспилотных аппаратов для систем охраны побережья. Контраст радиационной температуры цели на фоне подстилающей поверхности определяет амплитуду полезного оптического сигнала, который в ИК приборах подлежит выделению из совокупности внутренних шумов и внешних помех. Кроме того, знак контраста может служить отличительным признаком при селекции антропогенных объектов и естественных фоновых образований. Он хорошо определяется оператором на тепловизионном изображении и может помочь при селекции целей.

Основной вывод при составлении приоритета количественных факторов условий наблюдения заключается в определяющем влиянии на контраст целей $\Delta\bar{L}_c$ при скользящих углах их наблюдения, в первую очередь, состояния небосвода (облачности), а затем, последовательно, соотношения температур воздуха и воды, степени и направления распространения волнения. Например, уменьшение температуры воздуха при постоянной температуре воды, характерное для ночных условий, вызывает уменьшение контраста цели. Для большинства сезонов года ночное выхолаживание атмосферы от $T_b > T_m$ - днем и вечером до $T_b < T_m$ - утром при любой облачности обуславливает уменьшение до 0, а затем изменение знака контраста воспринимаемого теплового излучения целей. Например, при $\Phi = 20$ изменение температуры воды от $T_m = 278\text{K}$ на +2K и на +7K соответственно изменяет контрастную яркость на 12% и на 17%; изменение температуры воздуха от $T_b = 288\text{K}$ на +10K и на +15K изменяет контраст $\Delta\bar{L}_c$ на 39% и на 50%, в то время как изменение облачности от СО до ЯН в тех же условиях может увеличить контраст цели $\Delta\bar{L}_c$ более, чем в 2 раза. Конечные результаты воздействия различных по физической природе факторов на амплитуду фоновых помех в ИК диапазоне соизмеримы между собой. Например, при $\Phi = 5^\circ$ в районе «ветровой дорожки» перепад энергетических яркостей при $T_m = 285\text{K}$, СО и $\lambda = 10$ мкм составляет $109 \text{ мкВт/см}^2 \text{ ср мкм}$, а в районе выхода глубинных слоёв воды с разницей радиационных температур в $\Delta T = 1 \text{ K}$ перепад энергетических яркостей составляет $\Delta L (V = 10 \text{ м/сек}) = 98 \text{ мкВт/см}^2 \text{ ср мкм}$. При наличии облачности основной вклад в неоднородности излучения подстилающей поверхности вносит отражённое от моря излучение облаков, что наибольшим образом сказывается при скользящих углах визирования. При этом вариации температуры морской поверхности зарегистрировать очень трудно. Так, при $\Phi = 1^\circ$ изменение V от 1 до 10 м/сек вызывает изменение $\Delta L^{co} (\lambda = 10 \text{ мкм})$ от 0,676 до 0,700 $\text{ мкВт/см}^2 \text{ ср мкм}$ при $T_m = 280 \text{ K}$ и $T_b = 285 \text{ K}$, в то время как изменение T_m от 280 К до 282 К при $V = 5 \text{ м/сек}$ даёт $\Delta L = 13 \text{ мкВт/см}^2 \text{ ср мкм}$, а отражение излучения участков ЯН уже при $\Phi = 5^\circ$ составляет $\Delta L = 65 \text{ мкВт/см}^2 \text{ ср мкм}$. При этом изменение степени поляризации излучения составляет 29% при СО (от 0,014 до 0,017) и 30% при ЯН (от 0,028 до 0,036) с изменением скорости ветра от 1 до 10 м/сек.

Поэтому для задач дистанционного обнаружения аномалий типа «ветровых дорожек» или кильватерных следов на морской поверхности использование контраста средних значений их излучения как основного признака нецелесообразно, поскольку ИК излучение других природных образований обладает близкими характеристиками.

Отличия оптического поля наблюдаемых объектов и подстилающей поверхности (ВПМ) не ограничиваются только контрастом радиационных температур. Группа отличительных признаков целей, наблюдаемых на фоне ВПМ, может быть связана с характеристиками пространственно-временных флуктуаций ИК излучения. Достаточно очевидны различия статистических характеристик ИК излучения фона и искусственных объектов, наблюдаемых на их фоне.

Рис. 3.11 иллюстрирует типичный пример тепловизионного изображения в корабля на разных расстояниях. За кораблём на буксире движется лодка, за лодкой на буксире движется буй. Удаляющийся корабль и лодка за ним по-разному наблюдаются в режимах «позитив-негатив» (г, д–а, б, в). По тепловизионному изображению хорошо обнаруживаются надводные объекты (а, б), однако распознать малоразмерный объект за кораблём (лодка, а за ней буй на буксире) можно лишь с малой вероятностью правильного распознавания (б). Так же мала вероятность правильной классификации самого надводного корабля, то есть, решение задачи более высокого иерархического уровня, чем распознавание. Проблемы достоверности интерпретации результатов дистанционного тепловизионного наблюдения в данном случае (повышение вероятности правильного распознавания и классификации) решаются путём увеличения числа элементов в тепловизионном изображении (увеличение пространственной разрешающей способности ТВП) при сохранении чувствительности. Однако для правильной интерпретации происхождения неоднородностей на поверхности моря на том же тепловизионном изображении, а именно, являются ли они поверхностным кильватерным следом корабля, как диагональный светлый отрезок (в), или же тепловизионным изображением области «выглаженной» ВПМ, ни улучшение чувствительности ТВП, ни повышение его разрешающей способности не дают нужного эффекта.

Также невозможно без априорной информации сделать заключение, являются ли темные и светлые зоны ВПМ (д) выше и ниже корабля следствием впадения близлежащей холодной реки, или это – устойчивые «ветровые дорожки». Здесь нужны дополнительные данные, чтобы польза от тепловизионного наблюдения была ощутимой, если ставятся задачи, например, гидрофизического дистанционного зондирования. Для решения задач обнаружения и сопровождения надводных объектов информация, содержащаяся в приведённых тепловизионных изображениях, вполне достаточна, чтобы принимать решения с высокой степенью достоверности.



а



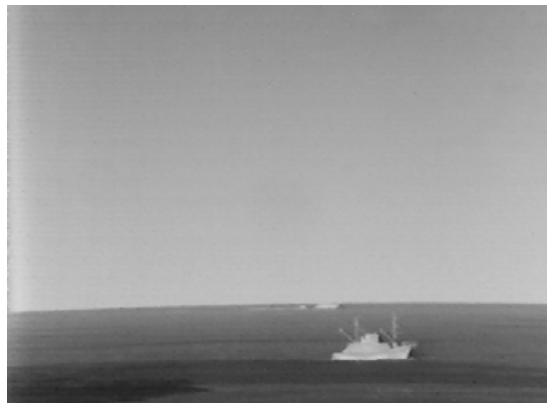
б



в



г



д

Рисунок 3.11 – Тепловизионное изображение в диапазоне 8–12 мкм корабля на разных расстояниях. За кораблём на буксире движется лодка. За лодкой на буксире движется буй. Удаляющийся корабль и лодка за ним по-разному наблюдаются в режимах «позитив-негатив»: а , б, в – «позитив» ; г, д – «негатив»

3.2.13 Характерные значения контрастной энергетической яркости фоновых помех на ВПМ в «окне прозрачности» атмосферы 7,6–13,6 мкм

Обобщённые значения характерных значений фоновых помех, усреднённые для типичных гидрометеоситуаций Мирового океана, приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Характерные значения контрастной энергетической яркости помех на ВПМ

	Размерность	T _м , К	T _в , К	СО	ЯН
Перепад яркости при переходе линии морского горизонта	Вт/см ² ·ср	286	278	-4·10 ⁻⁴	-1,2·10 ⁻⁴
			294	+4,4·10 ⁻⁴	+6,8·10 ⁻⁴
Контраст энергетической яркости собственного излучения "барашков"		286	278	+3,2·10 ⁻⁴	+5,1·10 ⁻⁴
			294	-3,5·10 ⁻⁴	-1,5·10 ⁻⁴
Перепады энергетической яркости на поверхности при порывах ветра с изменением его скорости от 1 до 10 м/с		286	278	+9,2·10 ⁻⁵	+1,85·10 ⁻⁴
			294	+1,0·10 ⁻⁴	+9,2·10 ⁻⁵
Блики на склонах отдельных крупных волн		286	278	+2,3·10 ⁻⁴	+4,6·10 ⁻⁴
			294	-2,55·10 ⁻⁴	+2,12·10 ⁻⁴
Перепады энергетической яркости на поверхности при переменной облачности		286	278	+1,82 · 10 ⁻⁴	
			294	+3,78 · 10 ⁻⁴	
Отраженное солнечное излучение «солнечная» дорожка"	Солнце в зените		Солнце 20 ⁰ над горизонтом		
	Максимальная яркость блика на склоне волны				
	0,24 Вт/см ² ·ср		0,14 Вт/см ² ·ср		
	Среднее значение по центру солнечной дорожки				
	+2,4·10 ⁻⁸ Вт/см ² ·ср		+1,8·10 ⁻⁴ Вт/см ² ·ср		
Рассеянное на "барашках" солнечное излучение	+4,5·10 ⁻² Вт/см ² ·ср		+1,8·10 ⁻² Вт/см ² ·ср		
Перепады энергетической яркости при разрывах поверхностной плёнки и перепадах температуры излучающего слоя воды в 2К (от 286 К до 284 К)	УГЛЫ НАБЛЮДЕНИЯ				
	Отвесные 2 ⁰ от надира		скользящие более 30 ⁰ от надира		
	+8,4·10 ⁻⁵ Вт/см ² ·ср		+1,5·10 ⁻⁴ Вт/см ² ·ср		

3.2.14 Влияние геометрии наблюдения и атмосферной трассы на воспринимаемое аппаратурой ИК излучение

Основная особенность наблюдения в пригоризонтной области моря связана с резким изменением дистанции до подстилающей поверхности при очень малых изменениях угла визирования. Значение этого очевидного факта трудно оценить без рассмотрения конкретных данных, характерных для условий наиболее частого применения ИК приборов – корабельных, береговых и воздушных. Наиболее важной является ситуация наблюдения надводных объектов на предельных дистанциях, то есть в пригоризонтной области, когда морская поверхность видна под скользящими углами. При высоте наблюдателя над морем H дистанция l до точки наблюдения на поверхности моря с учётом кривизны Земли зависит от угла места линии визирования Φ следующим образом:

$$l = (R + H) \cdot \sin\Phi - \sqrt{(R + H)^2 \sin^2\Phi - (2R \cdot H + H^2)},$$

где $R \approx 6371$ км – “средний” радиус геоида Земли на уровне Мирового Океана.

Даже при «бесконечно малых» приращениях угла места линии визирования $d\Phi$ изменение дистанции l до точки наблюдения на ВПМ достаточно заметно:

$$\frac{dl}{d\Phi} = R \cdot \frac{1 + \frac{(R + H) \cdot \sin\Phi}{\cos\Phi \cdot \sqrt{(R + H)^2 \sin^2\Phi - (2RH - H^2)}}}{\left[\frac{(R + H)}{\cos\Phi}\right] - 1}.$$

Для реальных оптических приборов, имеющих конечное значение мгновенного поля зрения $\delta_\Phi \times \delta_\zeta$, этому элементу на местности соответствует площадка, у которой длинная сторона – проекция на горизонтальную плоскость моря - имеет размер Δl :

$$\Delta l = R \cdot \left\{ \left[\frac{H}{R} - 1 \right] \cdot \cos(2\Phi + \delta) \cdot \sin\delta + \sin\Phi \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{H}{R} - 1 \right]^2 \cdot \sin^2\Phi} - \sin(\Phi + \delta) \cdot \sqrt{1 - \left[\frac{H}{R} - 1 \right]^2 \cdot \sin^2(\Phi + \delta)} \right\}.$$

Резкая зависимость расстояния до точки на ВПМ от угла места линии визирования в пригоризонтной области обуславливает такое же резкое изменение размеров площадки на поверхности моря, которая соответствует мгновенному полю зрения ИК прибора Δl . Два важных следствия вытекают из этого при анализе использования ИК приборов для наблюдения за надводной обстановкой:

- сильная зависимость прозрачности и собственного ИК излучения атмосферной трассы от угла места линии визирования ВПМ;
- существенная зависимость эффекта пространственного усреднения (сглаживания) флуктуаций яркости излучения ВПМ.

Оба эти обстоятельства решающим образом влияют на величину воспринимаемого ИК прибором полезного сигнала и на величину фоновой

помехи, определяя, в конечном итоге, значение отношения сигнала к шуму $ОСШ = СИГНАЛ / (помеха\ фона + \text{внутренний шум})$.

Для ИК приборов, решающих задачи, например, освещения надводной обстановки, это приводит к тому, что сигнал от цели и статистика фоновых помех будут различаться для каждой строки тепловизионного кадра. При разработке алгоритмов обработки сигналов в ИК приборах требуется адаптация этих данных к параметрам оптико-электронного тракта конкретных приборов. Например, для ТВП с размером поля зрения 6° по вертикали при наблюдении морской поверхности в пригоризонтной области с высоты 30 м над уровнем моря дисперсия изменяется в различных зонах поля зрения с учетом пропускания атмосферной трассы и изменения угла φ в 1,5 раза. В случае ясного неба дисперсия фоновых шумов возрастает на порядок по сравнению со случаем сплошной облачности.

С увеличением угла места линии визирования φ (с приближением к линии горизонта) среднее значение воспринимаемой ТВП яркости излучения фона монотонно приближается к значению излучения АЧТ с температурой воздуха. Резкое увеличение длины трассы до ВПМ в пригоризонтной области ослабляет флуктуации ее излучения и существенно добавляет собственное ИК излучение атмосферы в фоновую составляющую теплового поля. При этом действующая на фотоприёмник ТВП общая фоновая засветка (среднее значение излучения) изменяется мало, однако существенным образом изменяется статистика (закон распределения и параметры) фоновых помех. В частности, в непосредственной близости к линии горизонта пространственные флуктуации фонового излучения имеют меньшую интенсивность и более низкочастотный характер, чем при наблюдении морского и небесного фона вблизи надира и зенита.

Принято считать нерациональным уменьшать мгновенное поле зрения оптической системы ИК приборов диапазона 3–14 мкм лучше, чем 10–20 угловых секунд из-за турбулентности атмосферы [3,4,8-15,17]. Вместе с тем, как только линия визирования отклоняется от пригоризонтной области к небосводу, турбулентность атмосферной трассы перестаёт сказываться столь драматическим образом на размытие оптического изображения.

Другая особенность наблюдения объектов в пригоризонтной области проявляется в специфических флуктуациях интенсивности их излучения - мерцании оптических сигналов от точечных целей [17], стр. 82: «Мерцание имеет низкочастотный временной спектр. Максимум этого спектра лежит на частоте $f_{\max} = 0,32 v_{\perp} / (\lambda_1)^{0,5}$, v_{\perp} – скорость ветра в направлении, перпендикулярном направлению излучения». Амплитуда мерцаний увеличивается с увеличением массы воздуха (по пути распространения излучения). «У горизонта частота f_{\max} обычно не превышает 5–10 Гц, а вблизи зенита она достигает иногда 1 кГц» [17] стр. 83. Натурные эксперименты прямым образом связывают протяжённость атмосферной трассы непосредственно над водной поверхностью пропорционально с интенсивностью мерцаний изображения светящегося малоразмерного объекта. При этом ИК излучение от протяжённых объектов испытывает традиционно

описываемые трансформации, но не мерцает. Отмечается [17], что с уменьшением возвышения точечного источника над морем сильнее проявляются низкочастотные компоненты частотного спектра его мерцаний (5–50 Гц).

Ещё одна особенность наблюдения в пригоризонтной области моря состоит в том, что наличие градиента плотности воздуха обуславливает наличие градиента его показателя преломления. Из-за этого траектория светового луча изгибается в ту сторону, где плотность воздуха выше. «Углы рефракции достигают порой десятков секунд и более, что снижает точность угловых измерений, затрудняет обеспечение соосности оптических систем и т.д.» [17] стр. 86. С большой обеспеченностью (более 95%) на границе раздела море-воздух существует скачок температуры воды и воздуха разного знака.

При расчётах значений спектрального показателя преломления воздуха n ссылаются на эмпирическую формулу для аппроксимации спектрального показателя преломления среды (формула Коши):

$$n = a + b \lambda^{-2} + c \lambda^{-4},$$

где λ – длина волны оптического излучения, мкм; а, в, с – эмпирически определяемые коэффициенты.

Давление Р воздуха и его температура T_v оказывают значительно большее влияние на изменчивость параметров атмосферной трассы вдоль пути распространения лучей, чем спектральные различия: $(n - 1) \rightarrow P/T_v$ и $dn/dT \rightarrow P/T_v^2$. При этом дисперсия воздуха составляет $dn/d\lambda = - 8,6291 \times 10^{-7}$ [мкм⁻¹]. Результаты расчётов значений показателя преломления воздуха n для центральных длин волн рабочих диапазонов тепло-телевизионных приборов с лазерным ИК дальномером представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Значения спектрального показателя преломления воздуха

№	Канал наблюдения	Центральная длина волны λ , мкм	Значение показателя преломления воздуха, n
1	Телевизионный	0,5512	1,0002778142591
2	Лазерный дальномер 1	1,062	1,0002739895199
3	Лазерный дальномер 2, «безопасный для глаз»	1,559	1,0002732529184
4	Тепловизор MWIR (3-5 мкм)	3,8	1,00027275
5	Тепловизор LWIR (8-12 мкм)	9,3	1,0002726

В видимом диапазоне показатель преломления воздуха $n(\lambda)$ заметно больше, чем в ИК диапазоне, хотя его зависимость от плотности воздуха (определяемой его давлением и температурой) примерно одинакова для видимого и ИК излучения. Количественной характеристикой часто выбирают

«угол полной рефракции – α - угол между касательной к направлениям лучей в начальной и конечной точках их траектории» [3] стр. 101, знак и значение которого определяются градиентом $n(\lambda)$ и который можно, в первом приближении, предсказать по текущему соотношению температур воздуха T_B и моря T_M в непосредственной близости к поверхности моря:

$$\Delta T_{BM} = T_B - T_M; dn = (dn/dT)|\Delta T| \cdot \cos(\alpha) \cdot dl.$$

Согласно [3] стр. 102, после прохождения дистанции l «вследствие рефракции луч войдёт во входной зрачок приёмной системы под углом

$$\alpha = - \int [(\sin \alpha)/n] \cdot (dn/dT) \cdot |\Delta T| \cdot dl$$

Если считать, что основное влияние на показатель преломления n оказывает температура среды, то без учёта давления можно заменить $dn/dT = - (n-1)/T$ без учёта давления. ... углы рефракции достигают порой десятков секунд и более». Принимая, в первом приближении, что члены подынтегрального выражения не зависят от длины оптической трассы l , в самом упрощённом виде можно записать

$$\alpha \approx -[(\sin \alpha)/n] \cdot (- (n-1)/T) \cdot |\Delta T| \cdot l$$

Из рисунка на стр. 101 в [3] следует, что $\sin \alpha \approx 1$, из чего, в первом приближении, применима линейная зависимость угла рефракции α от длины трассы и от разности температур воздуха и воды ΔT :

$$\alpha \approx [(n-1)/n] \cdot (\Delta T/T) \cdot l$$

Если лазерный луч, испытывающий искривление из-за рефракции на угол $\alpha(\text{ЛД})$, попадает на точечную цель, то лучи (видимого диапазона) телевизионного канала испытывают искривление на угол $\alpha_1(\text{ТВ})$, а лучи ИК канала искривляются на угол $\alpha_2(\text{ИК})$. При этом лучи лазера, ИК и видимого диапазонов лежат в одной вертикальной плоскости, но лазерный луч (ближний ИК $\lambda = 1,06$ мкм и $\lambda = 1,56$ мкм) находится между лучами видимого и ИК диапазонов, ближе к последнему. Какой из лучей будет находиться ближе к поверхности моря (ИК или видимого диапазона), зависит от знака разности температур воздуха и воды ΔT_{BM} . При распространении оптического излучения траектория лучей изгибается в ту сторону, где плотность воздуха больше. Более тёплый слой воздуха сравнивают с отражающим (своего рода «зеркальным») слоем при построении траекторий распространения оптического излучения. При температуре воздуха больше температуры воды ($\Delta T_{BM} > 0$) траектории всех лучей изгибаются к воде, в сторону зоны более холодного воздуха («суперрефракция», «сверхрефракция»). Лучи видимого диапазона, испытывающие более сильное влияние рефракции из-за большего значения показателя преломления воздуха $n(\text{ТВ})$ по сравнению с $n(\text{ЛД})$, будут ближе к поверхности моря, чем лазерный и тепловизионный лучи: $\alpha(\text{ТВ}) > \alpha(\text{ЛД}) > \alpha(\text{ИК})$. При температуре воздуха меньше температуры воды ($\Delta T_{BM} < 0$) траектории всех лучей изгибаются от воды к небосводу, в сторону более холодных слоёв воздуха («субрефракция»). Лучи видимого и ИК диапазонов

будут так же располагаться по разные стороны от лазерного луча, но теперь уже в обратном порядке: ближе к воде находятся ИК лучи, выше него – лазерные, а ещё ближе к небосводу – лучи видимого диапазона. При температуре воздуха больше температуры воды траектория луча изгибается вниз, к воде, в сторону холодного воздуха, непосредственно контактирующего с водой. При температуре воздуха меньше температуры воды траектория луча изгибается от воды к небосводу. Угол места, под которым наблюдается цель, изменяется по сравнению с геометрическим углом её наблюдения. Из-за этого возникают эффекты увеличения угла места и дальности до наблюдаемой линии морского горизонта, уменьшение вертикальных размеров корпуса корабля, увеличение угла места изображения точечных целей, наблюдение поверхности моря за геометрическим горизонтом, а также возникновение миражей и появление инвертированных изображений. Эти эффекты становятся всё более заметными по мере улучшения параметров оптико-электронных приборов и на каком-то этапе могут оказаться физическим фактором, ограничивающим дальность действия традиционных ИК приборов. В настоящее время не разработана формализация процесса учёта искажений содержательной информации такого рода, из-за чего нет способов их парирования при автоматической обработке тепловизионных изображений. Задача выявления смыслового содержания наблюдаемой картины возлагается на оператора ТВП, который может опираться на оперативные данные метеослужб и накопленный опыт.

4 Практические применения тепловизионных приборов и особенности интерпретации данных дистанционного зондирования в различных задачах

4.1 Применение тепловидения для военных целей

Тепловидение как приборостроительное направление зародилось и развивается, в первую очередь, из-за тех преимуществ, какие оно даёт в его военном применении. Первые документально зафиксированные эксперименты по «использованию ИК лучей» были проведены в Ленинграде в 1924 году Б.П. Козыревым, сотрудником ЛЭТИ (научная школа А.С. Попова). При поиске наилучших способов организации скрытной оптической связи (с помощью ИК прожекторов и фотоприёмников) им были запеленгованы трубы крейсера «Аврора». Значимость этого эксперимента была оценена, и в результате интенсивных работ в 1939 году был создан тепlopеленгатор, который был установлен в Кронштадте как обнаружитель надводных кораблей. В его оптической системе использовалось зеркало диаметром 1 метр, в качестве фотоприёмного устройства применялся ленточный болометр с золотой чернью. Дальность обнаружения кораблей среднего класса и выше в характерных для этой акватории условиях составляла около 40 км. Угловые координаты обнаруженных кораблей транслировались на артиллерийские установки в качестве данных целеуказания. Включение тепlopеленгатора в состав комплекса защиты явилось решающим техническим фактором, воспрепятствовавшим прорыву вражеского флота к Ленинграду в период войны 1941 – 1945 годов до появления радиолокационных средств.

В современных условиях ИК приборы являются необходимым элементом приборных комплексов практически всех видов вооружённых сил. Использование ТВП в локальных конфликтах современности позволило выявить достоинства этого технического средства, оправдывающие высокую цену их создания. Телевизионные каналы, несомненно, имеют преимущества перед ТВП при достаточном освещении. В добавление к тому, что обеспечивается высококачественное цветное окружающей обстановки, в полной мере используется повседневный опыт и интеллектуальный потенциал оператора для анализа наблюдаемой обстановки. Однако в ночное время и при постановке аэрозольных помех тепловидение выступает как незаменимая альтернатива телевидению, хотя выявление содержательной информации в тепловизионном изображении требует от оператора определённого навыка и большего времени для принятия решения.

Применение тепловидения как средства неразрушающего дистанционного контроля демонстрирует невозможность полной маскировки теплового поля антропогенных объектов, включая военную технику, обитаемые и необитаемые подземные сооружения, людей и животных. Естественный суточный ход температуры окружающей среды вызывает изменение условий теплового обмена всех естественных и искусственных неоднородностей ландшафта [4,8,9,15]. Именно поэтому в утренние и вечерние часы тепловая

разведка местности показывает наибольшую эффективность. Физические причины лежат в основе того, что любая активная деятельность приводит к выделению тепловой энергии, то есть к невозможности длительное время маскироваться от наблюдения.

Важнейшим преимуществом тепловидения, например, перед радиолокационными методами является пассивный характер их работы, обеспечивающий круглосуточное скрытное наблюдение за окружающей обстановкой без применения специальной подсветки. Целый ряд приёмов противодействия радиолокационным системам обнаружения и целеуказания оказывается бесполезным в качестве противодействия тепловидению [4,8]. Другим его преимуществом перед РЛС является существенно более высокая точность определения угловых координат целей. На практике она ограничивается влиянием турбулентности атмосферы и составляет до 5–10 угловых секунд на приземных и приводных трассах. Особенно важно это при наблюдении низколетящих целей под скользящими углами к поверхности вблизи линии горизонта. Определённые преимущества тепловидение имеет перед наблюдением в видимом диапазоне за счёт лучшего прохождения более длинных электромагнитных волн сквозь аэрозольные образования.

Вместе с тем, оптические средства наблюдения имеют общий принципиальный недостаток по отношению к радиолокационным системам, заключающийся в том, что их дальность действия ограничивается «геометрической видимостью» и не позволяет осуществлять «загоризонтное видение», которое является стандартным режимом работы РЛС обнаружения.

Кроме того, дальность действия оптико-электронных средств зависит от состояния атмосферной трассы, что не позволяет наблюдать объекты за облаками, за плотными аэрозольными образованиями искусственного и естественного происхождения.

Рутинная процедура наблюдения за окружающей обстановкой может быть автоматизирована лишь для небольшого круга задач, связанных, в основном, с круглосуточным контролем рубежа проникновения объектов с малой тепловой заметностью, например, воздушных целей или беспилотных летательных или надводных аппаратов. В подавляющем большинстве ситуаций оператор ТВП выполняет функции первичного обнаружителя опасных объектов. На него же возлагаются задачи их первичного распознавания для определения степени исходящей угрозы. При количественных прогнозах эффективности использования ТВП при наблюдении за окружающей обстановкой используется традиционное подразделение уровней интерпретации тепловизионного изображения, состоящее из 4 градаций [2]:

- обнаружение ($1 \pm 0,25$ разрешаемых штрихов эквивалентной штриховой миры);
- определение ориентации ($1,4 \pm 0,35$ разрешаемых штрихов);
- распознавание или различение ($4 \pm 0,8$ разрешаемых штрихов);
- идентификация или опознавание ($6,4 \pm 1,5$ разрешаемых штрихов).

Эти уровни интерпретации основаны на представлении изображения объекта эквивалентной штриховой мирой [2] и определяют дальнейший порядок действий оператора. В различных системных комплексах существуют собственные требования к особенностям интерпретации оператором наблюдаемого тепловизионного изображения, поэтому количественные значения критериев различаются в сходны по словесной формулировке задачах. В частности, наблюдение в морских условиях имеет вполне определённые особенности выявления информативной составляющей в тепловизионной информации. Они заключаются в том, что фон априорно рассматривается не только как источник помехи, затрудняющей правильную интерпретацию воспринимаемого сигнала или, например, тепловизионной картины. Реально же именно фоновые образования являются, как правило, одновременно и источниками фоновых помех, и наиболее устойчивыми ориентирами. Их присутствие или отсутствие определяет, в конечном итоге, дальность действия ИК прибора в натуральных условиях. Примером тому может служить линия горизонта, выступающая как источник оптической помехи («тянучки») при пересечении её полем зрения ТВП (например, при его нестабилизации) и одновременно как основной ориентир для оператора, который увеличивает вероятность правильной интерпретации тепловизионного изображения. Хотя при этом возможно снижение значений воспринимаемого ОСШ, однако возможно и привлечение дополнительной информации, играющей роль априорной. В частности, обнаружение нагретого малоразмерного объекта выше или ниже линии горизонта позволяет оператору одновременно с обнаружением цели отнести её к классу воздушных или надводных объектов. Для всех уровней распознавания влияние наблюдаемых известных оператору фоновых образований и помех аналогично присутствию дополнительных отличительных признаков объектов, то есть это влияние противоположно влиянию помех. Например, при наблюдении на море из всей совокупности плавающих предметов, воздушных объектов и естественных образований на морской поверхности формируются два класса: выше линии горизонта и ниже неё. Поскольку искомый объект априорно считается принадлежащим одному из классов, то сужается область поиска и количество яркостных отметок на экране, подлежащих анализу при интерпретации наблюдаемой картины. Из-за этого задача классификации может перейти на другой уровень, например, из задачи идентификации (требующей, например, 8 периодов эквивалентной штриховой миры) она становится адекватной задаче распознавания (требующей 4 периода эквивалентной штриховой миры [2]). Из общих положений следует, что номенклатура морских объектов несколько шире номенклатуры воздушных целей. Выше линии горизонта могут наблюдаться самолёты, вертолёты, атакующие ракеты и управляемые снаряды, элементы надстроек и мачт надводных кораблей, корпус которых скрыт за горизонтом, ложные тепловые цели и немногочисленные мощные фоновые помехи: Солнце и освещённые им облака, птицы. Ниже линии горизонта могут наблюдаться надводные корабли всех типов, катера, шлюпки, плавающие малоразмерные объекты, представляющие навигационную опасность, навигационные знаки, голова

боевого пловца и помехи - вспененные гребни волн, блики на склонах волн, ветровые дорожки и блики на поверхности (раздел 3, тепловизионные изображения ВПМ). Если рассматривать пример оценки дальности распознавания шлюпки на морской поверхности, её тепловой контраст и количество элементов в изображении соизмеримы со всеми перечисленными выше объектами (рис. 4.1).

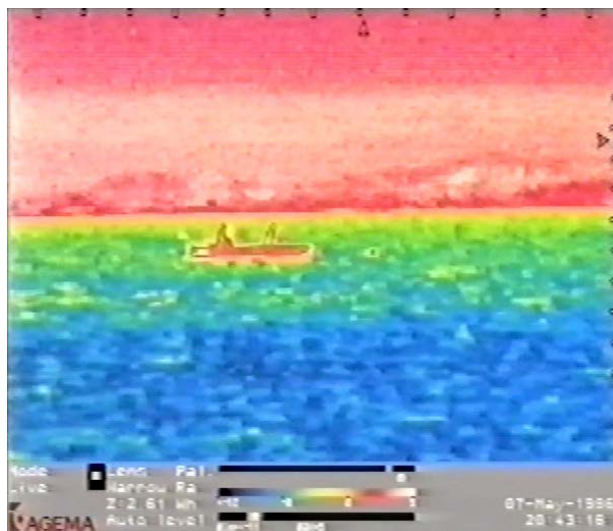


Рисунок 4.1 – Тепловизионное изображение шлюпки на фоне ВПМ в присутствии фоновых помех, полученное с помощью ТВП LWIR диапазона фирмы AGEMA

Поскольку высота расположения корабельного ТВП над морем не меняется, то формируется устойчивый навык оператора по приблизительной оценке линейных размеров наблюдаемого объекта по количеству элементов тепловизионного изображения и его относительному положению относительно линии горизонта. Наблюдаемые при этом элементы морских волн служат добавочным ориентиром относительно линейных размеров наблюдаемого объекта. Зона поиска и анализа яркостных отметок на индикаторе ТВП сужаются, количество помех в ней меньше, чем общее количество помех во всём поле зрения ТВП, и вероятность распознавания шлюпки на взволнованной поверхности повышается. Практический опыт использования ТВП при решении задач обнаружения шлюпок и надводных кораблей в бурном море при наличии множества вспененных гребней волн показывает достаточно высокий процент принятия правильных решений операторами даже при низком качестве тепловизионного изображения, если есть дополнительная информация от других каналов наблюдения (подтверждающая или отрицающая), или если у оператора есть возможность самостоятельно руководить процедурой наблюдения: направлять движение поля зрения ТВП или всего носителя прибора, повторять процедуру поиска определённых участков пространства или изменять её (изменять ракурс наблюдения) и т.п. Общий вывод заключается в том, что активное участие оператора в организации процедуры наблюдения, как правило, заметно повышает эффективность применения ТВП.

В военной области достоверность интерпретации информации определяется не столько пороговой чувствительностью прибора, сколько его

помехозащищённостью, способностью выделять нужные объекты в присутствии сложных фоновых и организованных помех и маскировки целей. И здесь радиометрические измерения так же не решают проблемы повышения достоверности прогнозов развития ситуации, как и прямое повышение чувствительности или разрешающей способности тепловизионных приборов.

На рис. 4.2 иллюстрируется типичный пример, когда по тепловизионному изображению хорошо обнаруживаются надводные объекты, однако распознать малоразмерный объект можно лишь с привлечением дополнительной информации и то лишь с малой вероятностью правильного распознавания.



Рисунок 4.2 – Тепловизионное изображение пригоризонтной области моря в LWIR диапазоне

Так же мала вероятность правильной классификации надводного корабля, то есть решение задачи более высокого иерархического уровня, чем распознавание. Проблемы достоверности интерпретации результатов дистанционного тепловизионного наблюдения в данном случае (повышение вероятности правильного распознавания и классификации) решаются путём увеличения числа элементов в тепловизионном изображении (увеличение пространственной разрешающей способности ТВП) при сохранении чувствительности. В задачах, связанных с обнаружением, распознаванием и классификацией объектов, могут быть рассчитаны или измерены соответствующие вероятности правильного решения задачи на данном иерархическом уровне принятия решений (например, обнаружение, распознавание и классификация), или дистанции, на которых такое решение принимается с заданной вероятностью [2]. Для круга задач, которые можно формализовать и использовать простые альтернативы, понятие достоверности интерпретации информации и оценка эффективности использования ТВП выражается в количественном виде более просто, чем в многоальтернативных задачах. Повышение эффективности ТВП включает в себя, например, повышение вероятности правильного распознавания объектов в присутствии помех, увеличение дальности действия ТВП, уменьшение времени принятия оператором правильного решения при отсутствии необходимости перепроверок полученной информации.

Как всякое техническое средство, тепловидение может однозначно ответить лишь на вполне определённый круг вопросов и не может простым образом быть использовано для решения других задач дистанционного зондирования. В этих случаях существует целый набор способов совместного использования тепловизионной информации, но она уже носит вспомогательный характер дополнительных данных, помогающих решить задачу в комплексе с другими средствами. Для правильного определения, являются ли на рис. 4.2 неоднородности в ближней зоне моря поверхностным кильватерным следом корабля (как диагональный отрезок на тепловизионном изображении), или же волной, ни улучшение чувствительности ТВП, ни повышение его разрешающей способности не добавляют смысловой информации. Здесь нужны дополнительные специфические данные, чтобы выявить смысловое содержание тепловизионного изображения.

При всём многообразии вариантов построения и использования ИК приборов для решения военных задач существует несколько общих черт, отличающих их построение от промышленных и медицинских ТВП. Основная особенность связана с необходимостью всеми доступными методами сокращать «рабочее время», то есть время принятия оператором решения наиболее высокого для него иерархического уровня. Для этого задачи сводятся к двухальтернативным, при которых оператор на основе анализа тепловизионного изображения выбирает одно из двух решений, которые, крайне упрощая, сводятся к определению «свой» или «чужой». После такого выбора наступает регламентированная процедура действий с привлечением других средств. Как правило, производится выработка координат обнаруженной цели для наведения на неё лазерного дальномера или средства поражения. С этого момента основная задача оператора состоит в обеспечении точности целеуказания. В полуавтоматическом режиме это осуществляется путём удержания «прицельной метки» на изображении атакуемой цели. При этом в реальных условиях от тепловизионного изображения объекта требуется лишь формирование достаточно чёткого изображения силуэта цели, позволяющего выбрать уязвимую область для её поражения. Подробности теплового поля объекта являются необходимыми для решения задачи выработки целеуказания по крупноразмерным объектам, например, при атаках на корабли с явно выраженными тепловыми зонами в районах машинного отделения и мест хранения боекомплекта (как правило, термостабилизированных). На рис. 4.3 иллюстрируется распределение теплового поля корабля, раскрывающее наблюдателю ТВП расположение его уязвимых зон. Более тёплые зоны в центре корпуса соответствуют расположению машинного отделения корабля. В случае атаки противокорабельной ракетой с тепловой головкой самонаведения она будет наводиться именно в эту зону.



Рисунок 4.3 – Тепловизионное изображение с применением ТВП MWIR диапазон, фирмы Inframetrics. Заимствовано из рекламных материалов фирмы

В боевых условиях тепловизионное изображение может иметь такое качество, которое в других областях применения ТВП расценивается как неудовлетворительное. Представление о соотношении качества презентационных и реальных тепловизионных изображений можно получить при просмотре в Интернете видеозаписей атак с применением вертолётных ИК систем.

Специфическая особенность военного применения тепловидения в качестве прицельных каналов состоит в то, что именно в те моменты управления стрельбой, для которых, собственно, они и созданы, на них воздействуют наиболее мощные оптические помехи в виде ослепляющих вспышек (рис. 4.4 а – 4.4 г) от собственного оружия и помехи от горячих пыледымовых образований [8] взрывов, маскирующих атакуемую цель.

Дульное пламя и факел ракетного двигателя реактивных снарядов служат демаскирующим признаком, позволяющим обнаруживать артиллерийские позиции, находящиеся вне зоны прямой видимости. Особый приём использования прицельных систем состоит в осуществлении корректировки целеуказания траектории управляемых ракет, наблюдаемой в тепловизионный прицел. Стремление снизить тепловую заметность огнестрельных средств заставляет применять различные средства их маскировки. Маскировка осуществляется специальными средствами гашения дульного пламени, не позволяющими зафиксировать процессы догорания. В области 3–5 мкм факелы от выстрелов более заметны, чем в диапазоне 8–12 мкм, в том числе за счёт более медленного остывания основных излучающих газовых компонент CO и CO₂ в основных полосах излучения 4,3 мкм и 4,7 мкм по сравнению с остыванием паров воды и аэрозолей в диапазоне 8–12 мкм.

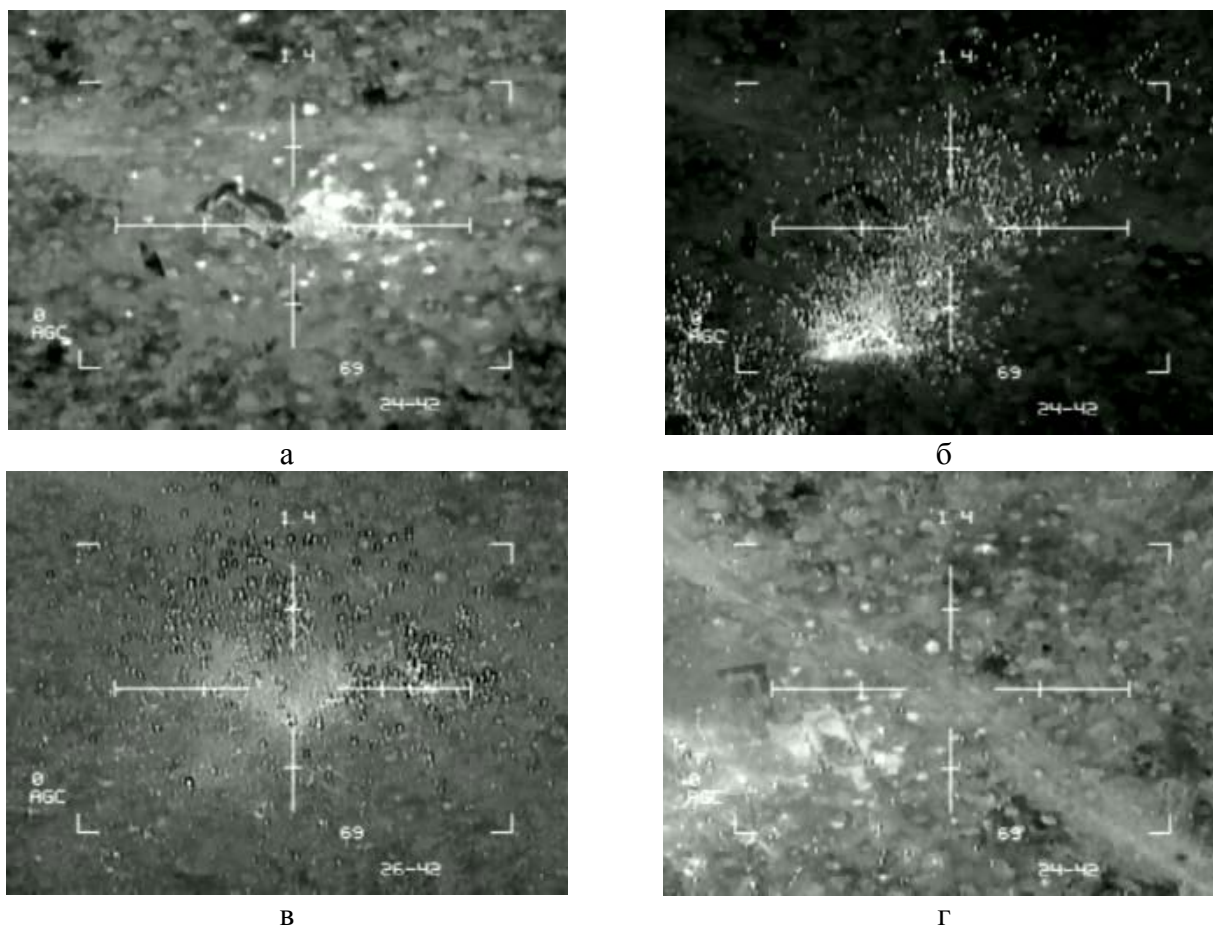


Рисунок 4.4 – Тепловизионное изображение объекта бронетанковой техники в присутствии интенсивных оптических помех, вызванных разрывом снарядов собственного оружия вертолёта. Тепловизионный канал MWIR диапазона универсальной прицельной системы ЕОТС. Рекламные материалы фирмы Inframetrics. На рис. 4.4.а виден силуэт атакуемой цели. На рис. 4.4.б сигналы от малоразмерных, но высокотемпературных разрывов снарядов из-за ярких вспышек разрывов снарядов заставляют автоматику ТВП «заглубить» его чувствительность, вследствие чего изображение цели лишь угадывается. На рис. 4.4.в и 4.4.г сигналы от высокотемпературных вспышек полностью маскируют изображение цели

В [8] (раздел 3.6) приводятся обобщённые данные по параметрам дульного пламени:

- температура от 1500 К до 3000 К;
- продольная длина пламени от 2 м до 50 м;
- ширина пламени от 2 м до 20 м;
- продолжительность вспышки в видимом диапазоне от 50 мс до 200 мс, и до 600 мс в ИК диапазоне.

В течение 3 секунд в эпицентре взрыва облако остаётся полностью непрозрачным в видимом и ИК диапазонах. Пыледымовая составляющая рассеивается в зависимости о скорости ветра за 5 – 15 секунд. На рис. 4.5.а–в показана динамика тепловизионного изображения оружейного выстрела с этапами подготовки к нему (а), маскировки объекта вспышкой выстрела (б) и последующее ухудшение качества изображения из-за последствий ослепляющего действия на ТВП дульного пламени (в).



а



б



в

Рисунок 4.5 – Тепловизионное изображение ослепляющего действия выстрелов собственного оружия: «а» – до стрельбы; «б» – момент выстрела; «в» – после стрельбы. Тепловизионный канал MWIR диапазона универсальной прицельной системы ЕОТС. Рекламные материалы фирмы Inframetrics

Организованными помехами для ТВП являются различного рода пиротехнические завесы и ложные тепловые цели. Цель применения этих средств состоит в создании столь мощного оптического излучения в поле ТВП, что изображение атакуемого объекта оказывается за пределами линейного динамического диапазона отображения сигналов на дисплее, то есть в области «белее белого» или «чернее чёрного». Фрагменты кинограммы воздействия пиротехнической завесы приведены на рис. 4.6 а–ж.



а



б



в



г



д



е



ж

Рисунок 4.6 – Тепловизионное изображение пиротехнической завесы: «а» – до постановки помех; «б», «в» и «г» – разные стадии постановки помех; «д», «е» и «ж» – результаты оптической маскировки цели Тепловизионный канал MWIR диапазона универсальной прицельной системы ЕОТС. Рекламные материалы фирмы Inframetrics

Современные средства оптико-электронного противодействия включают в себя ИК лазеры, которые наиболее эффективно используются для дезинформирующего и подавляющего действия ИК систем, включая разведывательные ТВП и тепловизионные головки самонаведения ракет. В [13] (Глава 4) приводятся подробные данные об особенностях воздействия лазерного излучения разных длин волн и разных мощностей на военные оптико-электронные приборы. В частности, указывается, что для используемых в оптико-электронном приборостроении оптических материалов пороговая плотность мощности облучения для импульсов длительностью около 10^{-7} сек составляет 10^6 - 10^7 Вт/см², что соответствует уровню плотности энергии облучения 0,1–1 Дж/см². Для материалов, используемых при создании современных ИК МФПУ (HgCdTe; InSb; PbSnTe), верхняя граница пороговых значений энергетических характеристик соответствует 1 Дж/см², а изменение состояния элементов наблюдается уже при 0,05 Дж/см².

На рис. 3.6 а и 3.7 иллюстрируется тепловизионное изображение отражённого от ВПМ излучения лазера с длиной волны 10,6 мкм. Тёмная «дорожка» на воде, идущая по направлению от здания на берегу, образована излучением лазера 10,3 мкм, установленного на балконе здания. При прямом попадании в поле зрения ТВП излучение оказывает ослепляющее действие.

Применение ТВП для беспилотных аппаратов существенно расширяет возможности разведки. Помимо возможности наблюдать за обстановкой в тёмное время суток, тепловидение позволяет обнаружить замаскированную военную технику, необитаемые подземные укрытия и другие объекты, позволяющие судить о режимах функционирования антропогенных сооружений и объектов. Однако при использовании беспилотных аппаратов с малой полезной нагрузкой на них приходится использовать ТВП с небольшими размерами оптической системы, что, соответственно, позволяет получать изображения малой детальности. При тех же массах и габаритных параметрах телевизионные каналы позволяют получить изображения заметно более высокого качества. Поэтому для повышения информативности инфракрасной разведки приходится сокращать дистанцию наблюдения либо использовать беспилотные аппараты, позволяющие устанавливать ТВП с длиннофокусными оптическими системами и высоко чувствительными МФПУ с криогенным охлаждением. В качестве примера на рис. 4.7 приводится рекламный проспект универсального тепловизионного модуля, устанавливаемого на объекты бронетанковой техники и на беспилотные аппараты.



CZJ330 Cooled Thermal Imaging Module

Product introduction

Simple module, easy for system integration

- Cooled FPA technology
- High definition image
- Multiple remote interfaces
- Low power consumption

The main feature

CZJ330 Cooled Thermal Imaging Module



Detector

characteristic

- Type:HgCdTe cooled FPA detector
- Wavelength:3-5μm
- Resolution:320×256
- Pixel size:30μm

Function

Gain/Brightness adjustment:

- Manual & Automatic
- Enhancement
- Filter
- Electronic zoom:2x
- Flip video
- Focus: Auto/Manual
- Black/White Hot

Physical characteristic

- Power supply:DC 27±3V
- Power consumption:≤14W
- Video output:PAL, 750
- Remote control:RS422
- Display:External monitor
- Weight:≤1.5Kg
- Dimension:147(L)×87.5(W)×100(H)mm

System

characteristic

- System NETD:≤35mk @ 25°C
- Startup Time:≤8 minute @25°C

Environmental adaptability

- Operating temperature: -40°C~+55°C
- Storage temperature: -45°C~+65°C



Main application

Easy for customer to integrate their system



▲ The information contained in this document is subject to change without notice

Рисунок 4.7 – Тепловизионный модуль универсального назначения CZJ 330

4.2 Использование ТВП в охранных системах

Пассивный характер работы тепловизионных приборов позволяет организовать с их помощью скрытный круглосуточный контроль охраняемого рубежа. Использование ТВП в охранных системах имеет много общего с их использованием в военных системах. Основным объектом наблюдения являются люди, сознательно или случайно пересекающие охраняемые рубежи (рис. 4.8). Задача оператора разделяется на два этапа: обнаружение объекта и его распознавание, то есть определение степени исходящей от него угрозы.

Обнаружение происходит на фоне естественных помех, а распознавание заключается, главным образом, в различении человека от сходных по их тепловизионному изображению объектов, чаще всего, животных. Поскольку позиции наблюдателя заранее организованы, то, как правило, обнаруживаемые объекты имеют достаточно высокий контраст (превышающий значения пороговой чувствительности ТВП) и занимают площадь нескольких пикселей (то есть, не точечные цели). Однако объекты, представляющие опасность, наблюдаются под сложными ракурсами, частично экранируются элементами ландшафта и целенаправленно применяют средства маскировки и противодействия. Основная особенность инструментальных охранных систем в том, что они должны быть высоко автоматизированы, так как при выполнении рутинных операций оператор быстро теряет внимательность и не может гарантировать непрерывный круглосуточный контроль обстановки.



Рисунок 4.8 – Иллюстрация применения ТВП для скрытного наблюдения в целях охраны территории. Материалы из рекламных проспектов фирмы FLIR

Однако алгоритмы автоматического обнаружения точечных целей, применяемые в тепловизионных системах (обнаружение точечных целей), для данных задач не эффективны. Поэтому при применении тепловидения в охранных системах ограничиваются, в основном, созданием аппаратно-программного комплекса автоматического обнаружения и выделение «тревожных зон» для их последующего анализа оператором. В этих зонах оператор определяет степень угрозы от обнаруженной цели по

теповизионному изображению, то есть решение об обнаружении опасного объекта совпадает с решением о его распознавании.

Технические характеристики современных ТВП позволяют организовать с их помощью беспропускной контроль рубежа заданной дальности, однако необходимость обеспечивать распознавание объектов на максимальных дальностях, совпадающих с их обнаружением, обуславливает необходимость анализа тепловизионных изображений объектов с малыми угловыми размерами. В настоящее время нет оправдавших себя алгоритмов автоматического разделения тепловизионных образов движущихся людей от образов животных при малом количестве элементов разложения их изображений. Задача распознавания возлагается на оператора.

При обсуждении возможности распознавания объектов по их изображениям традиционно используют критерии Джонсона [2], которые первоначально были введены для объектов бронетанковой техники, но затем успешно применялись и для других объектов, включая людей [3,4,9,11–15]. В соответствии с современными представлениями о процессах интерпретации тепловизионных изображений для правильного распознавания необходимо выполнение двух условий одновременно: превышение сигналом некоторого порогового уровня (ОСШ) и наличие в тепловизионном изображении минимально необходимого количества элементов разложения изображения [2]. Существует некоторая возможность вариаций в количестве требуемых элементов разложения изображения в зависимости от того, являются ли изображаемые фрагменты «устойчивыми отличительными признаками» наблюдаемого объекта для данного оператора, или же их можно добавлять или убирать из изображения объекта без изменения вероятности правильного его распознавания. Например, наличие оружия, характерного снаряжения или специфические движения и поза человека могут дать возможность оператору принять решение даже по фрагментарному тепловизионному изображению.

Основные различия в имеющихся в известной литературе данных касаются классификации уровней различения объектов и требуемого для этого количества элементов разложения изображения. В работах, посвящённых применению критериев Джонсона при распознавании ростовой человеческой фигуры [2], приводится значение количества периодов эквивалентной штриховой миры, укладываемой на размере плеч человека от 2,5 до 3. Требуемое количество её полупериодов на минимальный линейный размер фигуры человека при сложных ракурсах по [12] составляет от $8^{+1,6}_{-1,4}$ до 20 при высоком отношении сигнала к шуму. При малых значениях сигнала или при наличии фоновых помех, как указано в [9–15], требуемое число элементов разложения изображения возрастает вдвое и более. Длина штрихов эквивалентной тепловой миры равна максимальному размеру проекции объекта. При увеличении формата проекции цели E , равного отношению максимального размера проекции к минимальному (например, высоты роста стоящего человека к ширине его плеч), длина штрихов эквивалентной миры возрастает в E раз, и, следовательно, требуемое значение отношения сигнала к

шуму в изображении $\rho_{\text{воспр}}$ также возрастает в E раз. Для фигуры человека, видимой лишь частично (стоящий на колене, наблюдаемый в проёме окна и т.п.), формат проекции цели E близок к единице.

Иногда для численных оценок используется величина «число элементов разложения изображения», равная отношению площади проекции объекта к площади «предельно разрешаемого элемента на местности». Такой подход считается предпочтительным, если трудно провести чёткую грань между обнаружением и распознаванием, например, когда решение об обнаружении можно с уверенностью вынести лишь тогда, когда цель опознана. В таких случаях процесс распознавания ближе к обнаружению аperiodических тестовых объектов, чем к наблюдению периодических тепловых мир.

Оценки дальности действия ТВП производятся исходя из необходимости обеспечить заданное значение вероятности правильного решения задачи обнаружения или распознавания [2]. Это значение вероятности правильного решения задачи затем участвует в расчётных оценках эффективности по более обобщённым критериям, например, при оценках эффективности всей системы охраны, укомплектованной заданным составом технических средств. Однако исходно уровень вероятности правильного решения задачи задаётся чаще всего от 0,5 до 0,95. При этом различия в значениях требуемого воспринимаемого оператором на дисплее ТВП ОСШ довольно велики, хотя практические различия в значениях вероятности правильного решения этим оператором задачи могут оказаться незначительными. Например, вероятность правильного обнаружения фигуры в кадре 0,95 или 0,90 требует различия воспринимаемого ОСШ от 6 до 5, то есть повышение вероятности на 5% требует увеличения ОСШ на 20%.

Объект различается легче, если его формат E больше единицы.

Для ростовой фигуры человека $E = 1,8 / 0,7 = 2,57$.

Для полуростовой фигуры человека $E = 0,9 / 0,7 = 1,29$.

При использовании методик, основанных на джонсоновском подходе эквивалентных тепловых штриховых мир, соотношение минимально различаемой разности температур $T_{\text{мр}}$ может быть записано как

$$T_{\text{объекта}} = \Delta T_{\text{миры}} \sqrt{\frac{E_{\text{миры}}}{E_{\text{объекта}}}}.$$

Тогда для ростовой фигуры человека $\Delta T_{\text{человека}} = 1,65 \cdot \Delta T_{\text{миры}}$, для полуростовой фигуры человека $\Delta T_{\text{человека}} = 1,13 \cdot \Delta T_{\text{миры}}$.

Принято считать, что для любой дальности объекта опознавание требует в 4 раза более высокую пространственную разрешающую способность по сравнению с обнаружением по критериям Джонсона.

Особенность наблюдения человеческих фигур с помощью тепловизионных приборов состоит в том, что наблюдаемые люди могут быть замаскированы, наблюдаться под сложными ракурсами или лишь частично. Кроме того, наличие в наблюдаемом сюжете сходных по очертаниям объектов требует для правильного распознавания более подробной тепловизионной

картины, то есть более высоких требований к ТВП по сравнению с наблюдением на ровном фоне. Пример тепловизионного изображения фигуры боевого пловца при выходе на берег приведён на рис. 4.9. Фигура боевого пловца, находящегося по пояс в воде, расположена в центре экрана

При теоретических оценках эффективности использования ТВП для обнаружения фигур человека в расчётные формулы закладываются экспериментальные данные о необходимом и достаточном количестве элементов разложения изображения, чтобы по тепловизионной картине можно было бы обнаруживать и распознавать человеческие фигуры в различных ракурсах и условиях. Эти данные позволяют определить:

- количество строк тепловизионного изображения или полупериодов штриховой миры с контрастом между штрихами k , равным контрасту объекта, укладываемых в минимальный размер объекта, при котором обеспечивается необходимый уровень распознавания объекта;
- количество элементов разложения тепловизионного изображения, укладываемых в размер площади проекции изображения объекта, при котором обеспечивается необходимый уровень распознавания объекта.

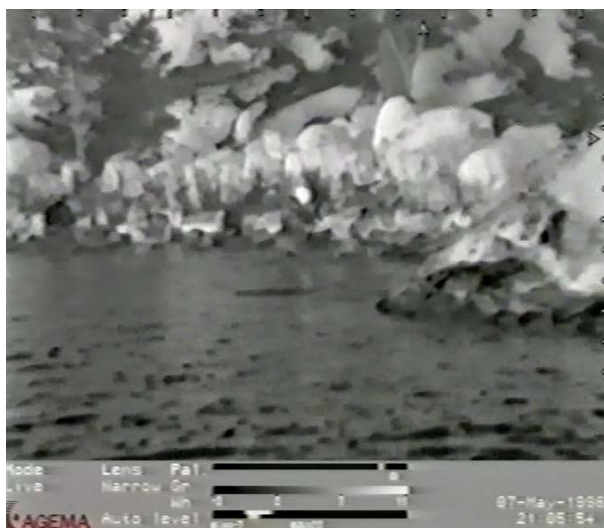


Рисунок 4.9 – Тепловизионное изображение берегового уреза получено в диапазоне 8–12 мкм с помощью ТВП фирмы AGEMA и заимствовано из рекламных материалов фирмы. Фигура боевого пловца, находящегося по пояс в воде, расположена в центре экрана.

По этим данным в дальнейших оценках эффективности ТВП, например, определяется дистанция, на которой ТВП с данными характеристиками может обнаруживать и распознавать фигуры людей при разных ракурсах их наблюдения. Возможность недемонстративного обнаружения человеческих фигур в пассивном режиме по их собственному тепловому излучению широко используется в настоящее время. В рекламных проспектах зарубежных тепловизионных приборов указываются значения дальности обнаружения от 0,5 км до 5,0 км. Приводимые данные следует оценивать критически, поскольку они относятся к условиям комфортного наблюдения человеческой фигуры полностью, без учёта маскирующих факторов и помех фона. Кроме того, эти данные относятся к движущимся фигурам, обнаружение которых

осуществляется, по большей мере, за счёт характерной для человека динамики передвижений. С этой точки зрения важным элементом комплекса обработки тепловизионной информации является автоматическая обработка изображений для выделения движущихся целей (селекция движущихся целей, СДЦ).

Следует отметить уменьшение эффективности оптико-электронных систем всех диапазонов при воздействии маскирующих фоновых помех и статичности наблюдаемой картины. Динамика передвижения человека, а также наличие априорной информации о том, что в наблюдаемой зоне есть человек, заметно повышают вероятность его обнаружения и распознавания. Некоторые силуэты воспринимаются как присущие только человеческим фигурам (например, человек в рост с расставленными ногами и руками). При этом количество элементов, необходимых для отнесения этих изображений к классу «человек», резко снижается. В частности, вместо 22–23 линий в вертикальном направлении, оказывается достаточным 3–4. И наоборот – лежащий и маскирующийся человек может быть опознан при количестве линий не менее 40 в вертикальном направлении его тепловизионного изображения.

На рис. 4.10а–в проведена последовательность тепловизионных кадров из демонстрационного ролика фирмы FLIR.

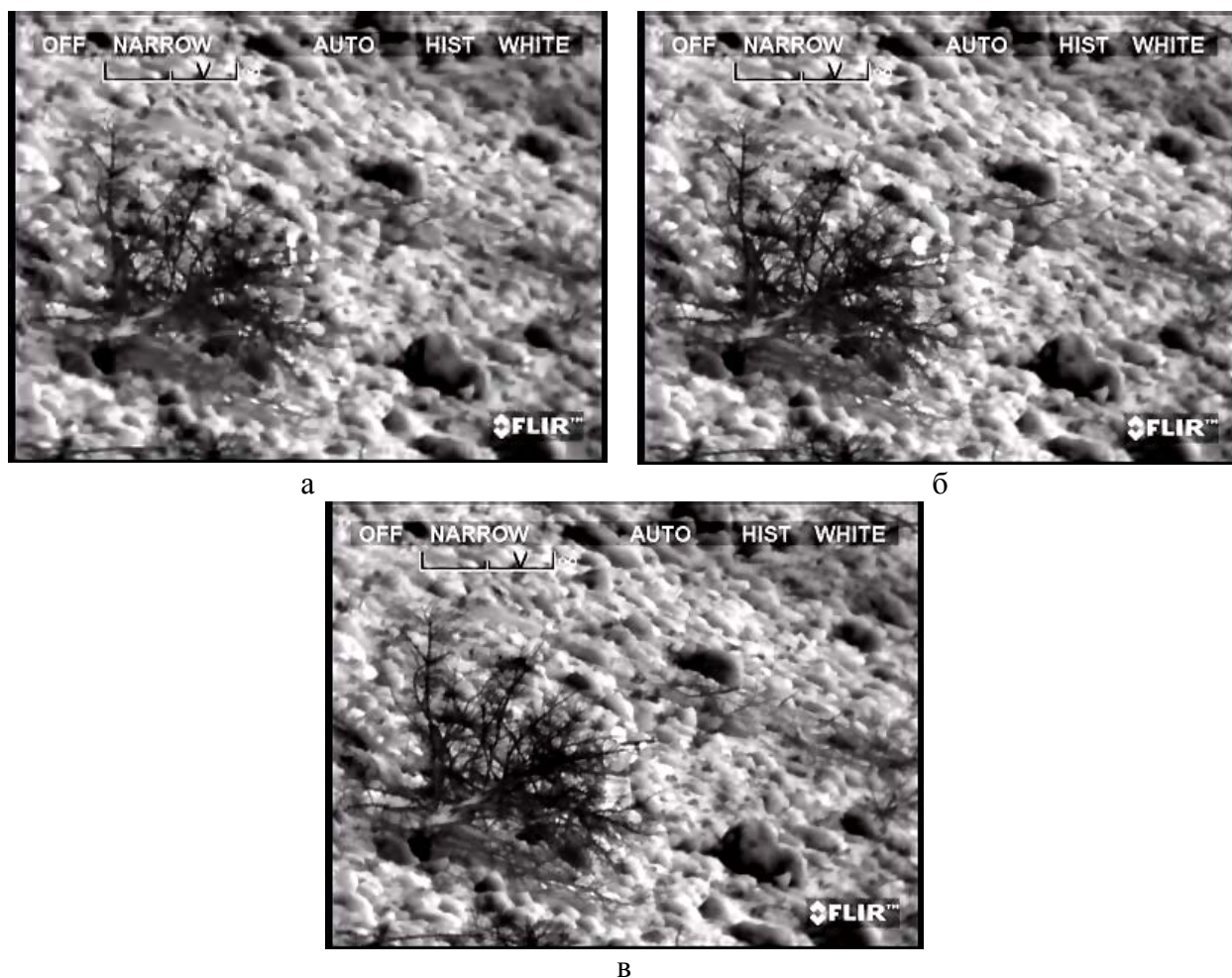


Рисунок 4.10 – Тепловизионное изображение фигуры человека с оружием за деревом: «а» - исходное положение; «б» – человек заряжает оружие; «в» – человек прицеливается. Взято из демонстрационного ролика фирмы FLIR

Фигура человека за деревом обнаруживается и распознается в течение секунды, если наблюдается его движение, в то время как по неподвижному изображению обнаружение/распознавание человека с оружием занимает несколько секунд или осуществляется с высокой неопределённостью (первый кадр).

На рис. 4.11 приведена последовательность тепловизионных кадров из аналогичного демонстрационного ролика фирмы FLIR, из которой видно, что даже по серии неподвижных изображений фигуру обнаружить не удаётся, если нет априорной информации, что он находится перед автомобилем.

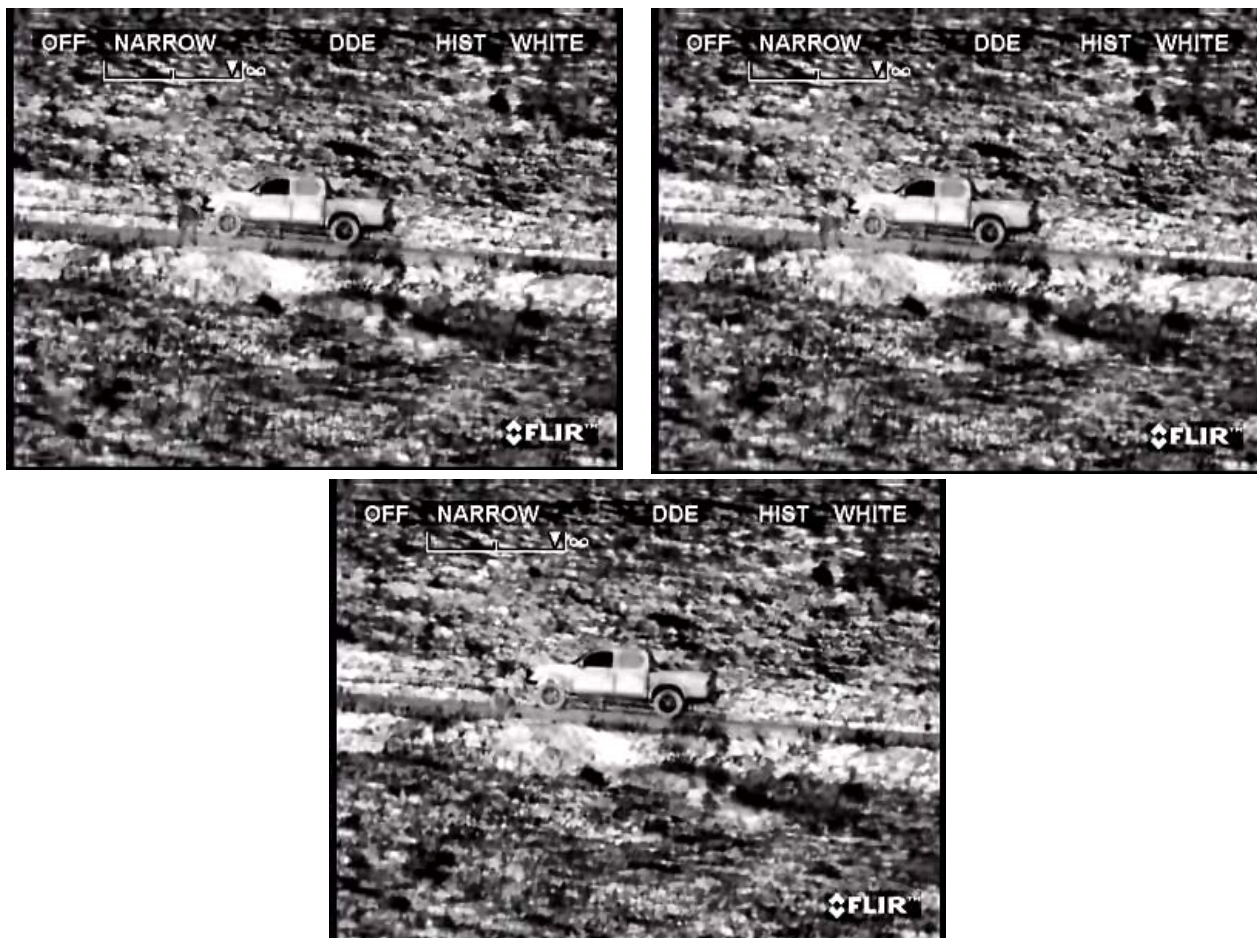


Рисунок 4.11 – Фигура человека рядом с автомобилем. Последовательность тепловизионных кадров из демонстрационного ролика фирмы FLIR

При наблюдении движущихся фигур уверенное распознавание человека отмечается на дистанциях, соответствующих трём строкам тепловизионного изображения ростовой фигуры человека по вертикали. При этом неподвижные элементы сюжета не оказывают влияния на вероятность правильной интерпретации изображения. Присутствие других движущихся малоразмерных объектов (собаки, удалённые автомобили) увеличивает время, необходимое оператору для принятия правильного решения (если нет режима селекции движущихся целей), но не изменяет вероятность правильной интерпретации тепловизионного изображения.

На тепловизионном изображении (рис. 4.12) демонстрируется тот факт, что в тепловом поле человека участвуют три составляющие: излучение открытых участков тела, излучение одежды и излучение снаряжения (собственное и отражённое). Все эти составляющие хорошо различаются у случайно оказавшихся в поле наблюдения охранных систем людей. Однако в случае целенаправленного проникновения все три составляющие теплового поля подлежат специальной маскировке.

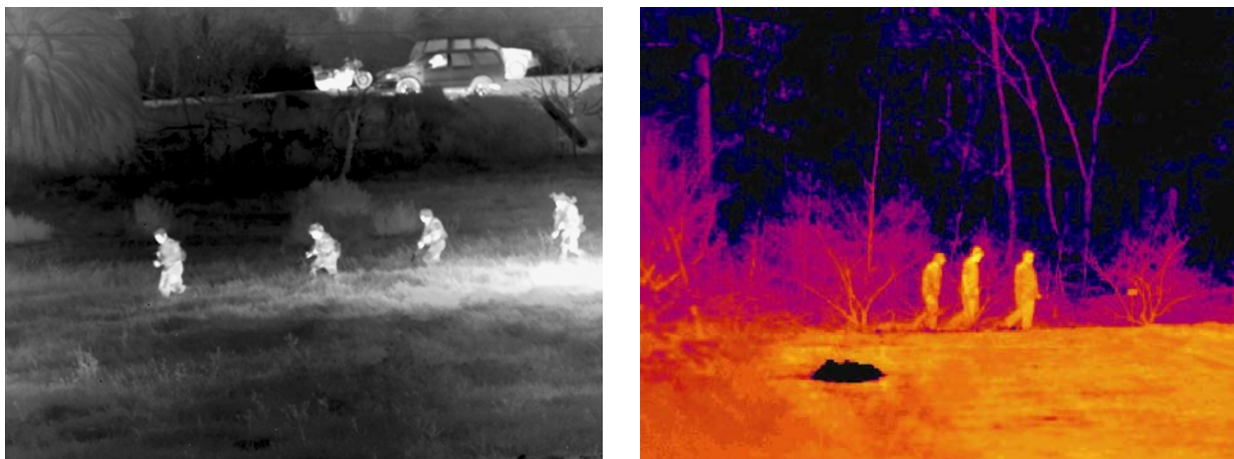


Рисунок 4.12 – Иллюстрации использования тепловизионного изображения ТВП фирмы FLIR для обнаружения людей на удалении. Заимствовано из рекламных материалов фирмы FLIR

Осуществить полную «тепловую незаметность» на практике не удаётся или удаётся на короткое время, поэтому наиболее часто используется приём разрушения характерного «теплового образа» человека, при котором сигналы от объекта обнаруживаются, но распознать объект удаётся лишь на очень малой дистанции. Тепловая саморегуляция организма человека и животных обуславливает возможность их обнаружения практически на фоне всех ландшафтов, если они не экранируются его элементами. Особенностью человека как теплового излучателя является то, что открытые части его тела имеют почти постоянную температуру излучающей поверхности во всех условиях наблюдения от отрицательных до положительных температур окружающего воздуха [8]. В условиях отсутствия маскировки наблюдаются обычно голова, лицо и руки человека. Если нет осадков и обдува воздухом, то радиационная температура лица близка к 298 К. Летом при температуре воздуха +20° С эквивалентная температура излучения близка к яркостной температуре излучения АЧТ при $T_{\text{АЧТ}} = 298 \text{ К}$

- сила излучения стоящего человека 1,4 Вт / ср;
- сила излучения лежащего лицом к наблюдателю человека 0,3 Вт/ср;
- сила излучения лежащего боком к наблюдателю человека 0,8 Вт/ср;

Зимой при температуре воздуха -20°С эквивалентная температура излучения близка к яркостной температуре излучения АЧТ при $T_{\text{АЧТ}} = 283 \text{ К}$, а сила излучения стоящего человека - 2,2 Вт / ср

Эффективные площади человека как излучателя принимаются равными:

- площадь излучения стоящего человека $0,5 \cdot 0,5 \text{ м} \cdot \text{м}$;
- площадь излучения лежащего лицом к наблюдателю человека $0,5 \cdot 0,1 \text{ м} \cdot \text{м}$;
- площадь излучения лежащего боком к наблюдателю человека $0,1 \cdot 1,5 \text{ м} \cdot \text{м}$;

В [8] приводятся экспериментальные данные по измерениям тепловых контрастов фигур военнослужащих в зимнее время (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Тепловые контрасты фигур военнослужащих

Солдат в зимней одежде	Радиационный контраст ΔT , К			
	Голова	Туловище выше пояса зона бронежилета	Туловище ниже пояса	ноги
В маскхалате	12-15/4,4	2,1-4,7/2,4	2,1-5,3/2,6	3,3-5,8/3,1
С бронежилетом и стальным шлемом	11,8–13/4,8	1,6-4,1/3,3	1,9-6,0/5,5	5,8-6,7/5,4
С радиостанцией	11-13/4,4	3,2-4,7/3,9	2,9-7,9/5,5	4,3-6,7/4,8

В летнее время ростовая фигура человека в стандартном снаряжении дайвера имеет в диапазоне $3,4\text{--}5,2 \text{ мкм}$ контраст радиационной температуры $1,6\text{К}$, контраст энергетической яркости $1,09 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/см}^2 \text{ ср}$ и контраст силы излучения в $0,066 \text{ Вт / ср}$.

В диапазоне $7,6\text{--}13,6 \text{ мкм}$ контраст радиационной температуры $2,5\text{К}$, контраст энергетической яркости $1,87 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2 \text{ ср}$ и контраст силы излучения в $1,12 \text{ Вт/ср}$.

Если наблюдается голова человека и открыто лишь лицо, а остальные части – закрыты головным убором, то контраст радиационной температуры и энергетической яркости у этого фрагмента больше, чем усреднённый по всей площади контраст ростовой фигуры. Контраст силы излучения из-за малой излучающей площади лица (обычно принимается круг диаметром 30см) существенно меньше.

В диапазоне $3,4\text{--}5,2 \text{ мкм}$ контраст радиационной температуры открытой части лица человека составляет $1,7 \text{ К}$, контраст энергетической яркости $1,15 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/см}^2 \text{ ср}$, и контраст силы излучения в $7,24 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/ср}$.

В диапазоне $7,6\text{--}13,6 \text{ мкм}$ контраст радиационной температуры $4,5\text{К}$, контраст энергетической яркости $3,36 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/см}^2 \text{ ср}$, и контраст силы излучения составляет $0,021 \text{ Вт/ср}$.

Тепловые поля дайверов в штатном снаряжении обуславливают их высокую заметность в моменты выхода на берег. Даже в условиях сильного волнения и наличия пенных образований в прибрежной полосе тепловой контраст дайвера из-за особенностей излучательной способности материала и формы гидрокостюма достигает высоких значений.

Из всего штатного снаряжения дайверов наиболее нагретым элементом является регенератор воздуха независимо от его типа. Радиационный контраст регенератора воздуха при длительной работе достигает около 10К, однако во всех характерных ракурсах наблюдения дайвера его регенерационный аппарат экранируется сравнительно малоконтрастными участками тела или гидрокостюма.

Актуальной областью применения ТВП является распознавание объектов, находящихся в руках у человека. В дополнение к другим техническим средствам тепловизионные приборы позволяют наблюдение осуществлять в темноте и давать оператору возможность определять степень опасности, которую представляет собой тот или иной человек, держащий в одной или же в двух руках оружие или предметы, похожие на оружие. В некоторых ситуациях может быть обнаружено оружие, спрятанное в кармане или под тонкой одеждой.

Техническая суть проблемы состоит в том, что для наилучшего распознавания угрозы требуется наиболее подробное изображение опасного предмета. Ограничение здесь связано с тем, что стандартное тепловизионное изображение содержит достаточно малое количество элементов (пикселей), обычно не более 640×480. Поэтому для получения подробного изображения объекта (изображения с высокой разрешающей способностью) необходимо уменьшать поле зрения ТВП либо за счёт использования более длиннофокусной оптической системы, либо за счёт уменьшения дистанции до объекта наблюдения. Существует противоречие между необходимостью получать детализированное изображение объектов и необходимостью иметь широкую зону контроля. Критерием выбора компромисса выступает надёжность распознавания изображения оператором, выражаемая, как правило, величиной вероятности правильного распознавания. Выбор конкретного значения величины вероятности правильного распознавания (0,5 или же 0,9) производится по «договорным правилам».

Значения величины вероятности правильного распознавания зависят от величины ОСИ в изображении, времени наблюдения и количества элементов пикселей, формирующих такое изображение объекта, которое достаточно для распознавания опасных предметов. В [8] приводятся результаты специальных исследований данного вопроса.

На рис. 4.13 а–в показаны предметы, которые необходимо было распознать (оценить степень опасности) при естественном дневном освещении с помощью телевизионной камеры и без освещения (ночью) с помощью тепловизионного прибора диапазона 3–5 мкм (б). Задним фоном служит металлическая дверь гаража. Визуальное изображение (а), (в) получено с помощью цифровой фотокамеры с форматом кадра 2048×1888 пикселей, то есть заведомо более высокого разрешения, чем стандартные ТВ и ТВП приборы.

В работе использовались телевизионная наблюдательная камера – цветная камера Canon EOS D60 и тепловизионная камера TVS – 8500 MWIR. Изображения содержали 12 предметов. Каждый предмет в руке наблюдался с

12 точек зрения. Общее число «картинок» составляло 144. Они составляли выборку, на основании которой рассчитывались вероятностные характеристики распознавания. В качестве наблюдателей выступали 10 военных операторов, прошедших предварительную тренировку по идентификации данных предметов с вероятностью не хуже 0,95.

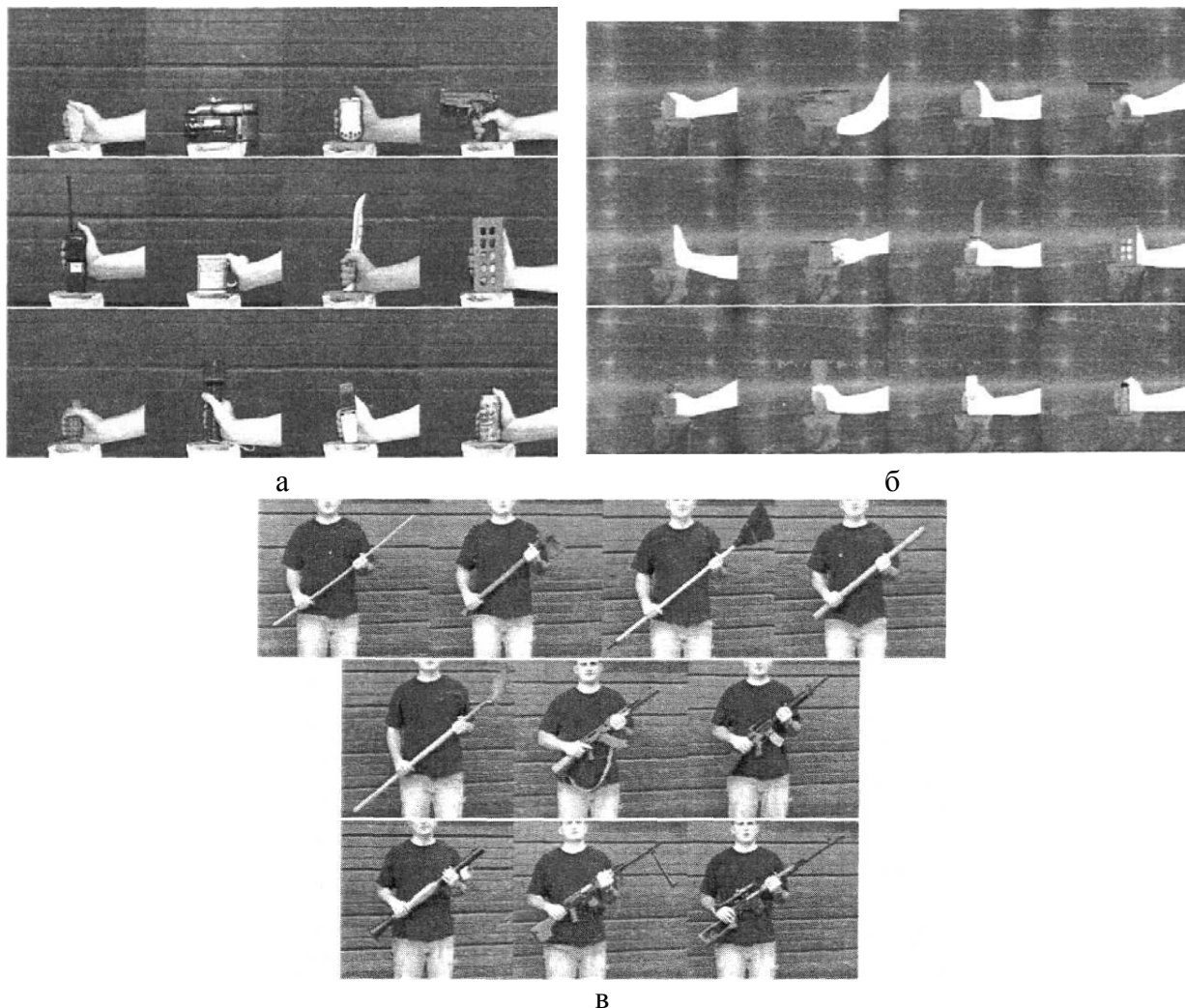


Рисунок 4.13 – Визуальные и тепловизионные изображения предметов, которые необходимо распознать оператору: «а» – телевизионные изображения опасных предметов; «б» – тепловизионные изображения предметов по рис. 4.13 а; «в» - телевизионные изображения человека с оружием и предметами, похожими на оружие.

Результаты исследований свидетельствует о том, что для правильного распознавания предметов, находящихся в руках у человека, необходимо иметь в его изображении не менее 5 пикселей в одном направлении, соответствующем «критическому» размеру. При этом вероятность правильного распознавания близка к 0,8 в ИК диапазоне и к 0,95 в видимом диапазоне.

4.3 Применение тепловизионных приборов для дистанционной диагностики электрооборудования

К настоящему времени накоплен большой практический опыт применения тепловидения для дистанционного обследования промышленного электроэнергетического оборудования, результаты которого обобщены в ряде нормативных документов, регламентирующих порядок проведения и критерии оценки результатов тепловизионной диагностики [18, 19]. Тепловизионные обследования электроэнергетического оборудования являются составной частью методов и средств его технической диагностики. Они могут использоваться как самостоятельно, так и в совокупности с результатами обследований другими контактными и неконтактными средствами диагностики (вибродиагностика, газовый химический анализ, диагностика в УФ диапазоне и др.). Задачей диагностики является выработка прогнозов о состоянии обследуемого электроэнергетического оборудования и выработка рекомендаций по регламенту профилактических и ремонтных работ. Содержательная информация тепловизионного изображения должна обеспечивать достоверность интерпретации распределения температур в тепловом портрете и основанную на ней гарантированную надёжность прогнозов технического состояния обследуемых объектов на весь период до следующего обследования. Как всякое техническое средство, тепловидение может однозначно ответить лишь на вполне определённый круг вопросов и не может простым образом быть использовано для решения других задач дистанционного зондирования. В этих случаях существует целый набор способов совместного использования тепловизионной информации, но она уже носит комплексный характер, помогающих решить задачу в совокупности с другими средствами.

Задачи, решаемые оператором при выполнении обследований, относятся к категории многоальтернативных задач. Для их успешного решения привлекается разнообразная дополнительная информация, а процедуры измерения тепловых полей объектов, как правило, дублируются оператором с некоторыми изменениями условий измерений для парирования случайных помех. Важнейшим условием правильного понимания смыслового содержания результатов обследования является знание устройства и режимов работы объекта наблюдения. Вторым неперенным условием выработки достоверного прогноза является привлечение количественных данных анализируемого теплового поля объекта, в первую очередь, температуры и размеров областей тепловых аномалий на его поверхности. В отличие от других областей, для дистанционной диагностики промышленного электроэнергетического оборудования применяются исключительно измерительные ТВП, дополняющие тепловизионное изображение количественной информацией о значениях параметров теплового поля. Современный приборный парк для дистанционного обследования промышленного электроэнергетического оборудования состоит главным образом из универсальных ТВП диапазона 8–12 мкм. Универсальные ТВП диапазона 3–5 мкм имеют более ограниченное

применение, а специализированные ТВП, работающие в узких спектральных диапазонах, используются для решения ограниченного круга задач, например, определения утечек элегаза.

Практика показывает, что в подавляющем большинстве рутинных операций тепловизионного обследования промышленного электроэнергетического оборудования достаточно проводить сравнительные измерения, то есть сопоставление температур одинаковых по устройству элементов. Определение абсолютных значений температуры наблюдаемого элемента требуется лишь в сложных случаях анализа теплового поля, но в этих случаях уже нет другого инструментального способа неразрушающего контроля, позволившего бы решить задачу и сделать правильные выводы. Поскольку тепловизионное изображение предметов отличается от привычного для человека изображения в видимом свете, то требуются некоторые навыки и знания об особенностях формирования теплового излучения объектов, чтобы правильно интерпретировать результаты измерений и извлекать из них полезную содержательную информацию.

Качество и долговременность достоверного прогноза зависят от двух составляющих: насколько правильно были произведены измерения и сколь правильно оператор смог понять и интерпретировать полученные результаты.

Современные ТВП и программы обработки результатов позволяют достаточно надёжно измерять распределение температур по поверхности диагностируемых объектов. Но при интерпретации полученных данных существуют две главные проблемы. Это проблема влияния фоновых помех на погрешности определения термодинамической температуры и проблема взаимосвязи измеряемой температуры поверхности объекта с процессами, протекающими в глубине его.

Решение первой проблемы связано с поиском методов уменьшения в конкретных условиях погрешностей измерения температуры конкретных объектов. Основные погрешности результатов измерений радиационной температуры связаны с достаточно произвольным вводом в программу пересчёта значений излучательной способности поверхности наблюдаемого объекта и значений радиационной температуры излучения фона, что обуславливает неточности учёта соотношения, собственного и отражённого ИК излучения объекта. Полученное после соответствующих пересчётов значение может оказаться больше, меньше или равным значению термодинамической температуры обследуемого объекта, на основании которой оператор делает все выводы и заключения о его состоянии. Поэтому погрешности прогнозов прямым образом связаны с не формализуемыми приёмами учёта вклада в наблюдаемое тепловое поле собственного и отражённого ИК излучения предмета. Технически в современных ТВП этот учёт сводится к установке оператором значений коэффициента излучения поверхности наблюдаемого объекта ε . При этом используются данные, полученные в лабораторных условиях, не учитывающие реальную степень загрязнения поверхности и угловые зависимости (индикатрисы) коэффициента излучения ε .

Вводимое оператором для расчётов значение излучательной способности наблюдаемого объекта ε является наиболее произвольно выбираемой величиной, оказывающей в то же время наибольшее влияние на погрешности интерпретации результатов измерения радиационной температуры. Завышение вводимого в программу расчёта значения ε по отношению к его истинному значению приводит к занижению оценки температуры, и наоборот. Например, если оператор ввёл в программу расчёта значение $\varepsilon = 0.86$, в то время как истинное значение составляет $\varepsilon = 0.70$, то он получит заниженное значение оценки температуры. Если же оператор введёт в программу расчёта значение $\varepsilon = 0.60$, то он получит в результате завышенное значение температуры.

Результаты измерений пересчитываются в значения термодинамической температуры (в единицах К или градусов Цельсия $^{\circ}\text{C}$) и предьявляются оператору несколькими способами:

- в виде условных цветов и яркости изображения (например, чем ярче светится точка, тем она теплее);
- в виде термопрофилей, то есть графического распределения температуры по указанной оператором траектории;
- в цифровом виде, соответствующем значению температуры в одной или нескольких указанных оператором точках.

При проведении относительных измерений в подавляющем большинстве практических ситуаций этого вполне достаточно, чтобы делать удовлетворительные выводы и подтверждающиеся прогнозы относительно диагностируемого оборудования. Тепловые поля нормально работающего оборудования не имеют больших перепадов радиационной температуры и обладают достаточно спокойным распределением яркости тепловизионного изображения. Это происходит потому, что конструкция всех узлов, выделяющих тепло, специально рассчитана на естественный теплообмен с окружающей средой, чтобы не было заметного нагрева оборудования. Зоны с повышенной температурой (рис. 4.14) заметно выделяются на тепловизионном изображении и должны обследоваться в первую очередь.

Исключение составляют лампы накаливания или светодиодные излучатели (в светофорах и фонарях), но они рассчитаны на такой режим работы, и это нужно учитывать при их обследовании.

Всякий фрагмент тепловизионного изображения (рис. 4.15 а–в), обладающий повышенной яркостью (или цветом, более близким к белому) по сравнению с окружающим фоном, может рассматриваться как тепловая аномалия.

Она обусловлена избыточным выделением тепловой энергии, которая не полностью рассеивается путём естественного теплообмена и вызывает повышенный нагрев наблюдаемого участка. Оператор должен сделать прогноз, будет ли нагрев продолжаться дальше и приведёт к внештатной ситуации, или же обнаруженный нагрев лежит в пределах нормы и не приведёт к аварии.

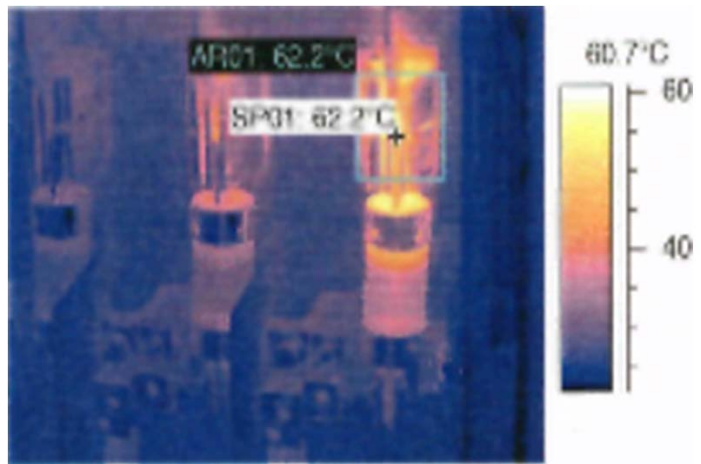
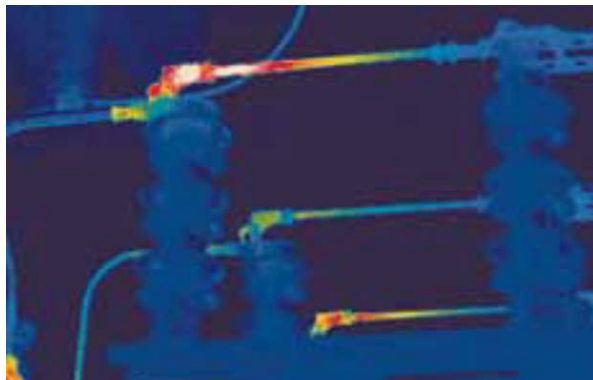
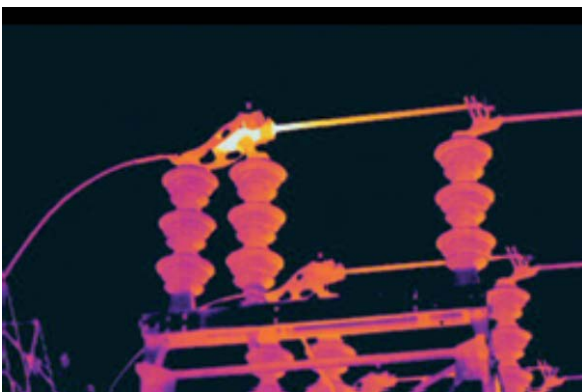


Рисунок 4.14 – Иллюстрация из материалов фирмы FLIR. Применение ТВП FLIR Exx-Series для обследования электроэнергетического оборудования. Видны зоны с повышенной температурой оборудования

Наличие тепловых аномалий на тепловизионном изображении означает необходимость более тщательного обследования этого оборудования, поскольку обнаружение аномалий само по себе не достаточно, чтобы сделать тот вывод, ради которого, собственно и проводятся тепловизионные обследования.



а



б



в

Рисунок 4.15 – Иллюстрация из материалов фирмы FLIR. Применение ТВП FLIR Exx-Series для обследования электроэнергетического оборудования: «а», «б» – тепловизионное изображение, «в» – телевизионное изображение

Задача тепловизионной диагностики состоит в выработке прогноза дальнейшего поведения данного узла или блока. Конечная цель обследования в

том, чтобы определить, насколько опасны выявленные дефекты в данный момент и сколько времени есть в запасе у обслуживающего персонала, чтобы ликвидировать эти дефекты прежде, чем наступят необратимые последствия. Прогноз должен быть достоверным, а период предсказания должен давать возможность предпринимать упреждающие меры, если ситуация развивается в нежелательном направлении.

Особенность тепловизионных обследований электрооборудования связана с тем, что влияние окружающей среды как источника фоновых оптических помех значительно меньше, чем в большинстве других областей применения дистанционного наблюдения. Возможность проведения обследований в отсутствие солнечной подсветки и изменений пропускания атмосферной трассы позволяют выявить повторяющиеся источники помех при проведении тепловизионных обследований. Эти помехи можно исключить или же значительно уменьшить путём применения достаточно простых приёмов при измерениях и при обработке.

Нет формализованных решений проблемы правильного понимания той информации, которая содержится в тепловизионном изображении. Даже при высокой точности измерений температуры оператор может неправильно интерпретировать местоположение источника перегрева. Для устранения этой ошибки наиболее распространённым методом является использование телевизионных изображений, зарегистрированных одновременно с тепловизионными (рис. 4.16) В профессиональных ТВП для дистанционных обследований встраивается ТВ камера, дающая оператору впоследствии определить местоположение обследуемого фрагмента сюжета.

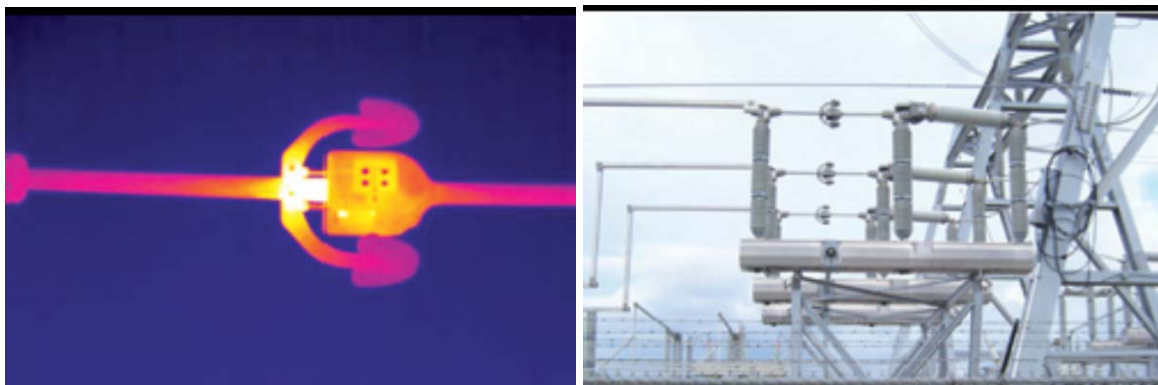


Рисунок 4.16 – Иллюстрация из материалов фирмы FLIR. Применение ТВП FLIR Exx-Series для обследования электроэнергетического оборудования

На рис. 4.17 наиболее нагретый фрагмент трёхфазного болтового соединения перекрыт поперечной шиной, экранирующей его от непосредственного наблюдения. На поперечной шине, в свою очередь, видно отражённое изображение элементов окружающего фона. Измерить температуру и определить, является ли соединение дефектным, можно лишь косвенным способом, используя знания устройства обследуемого узла.

Наибольшие сложности интерпретации связаны с тем, что многие потенциально опасные с точки зрения избыточного нагрева узлы или детали

закрыты от непосредственного их наблюдения при тепловизионном обследовании (находятся внутри изделия, в специальных шкафах или закрыты кожухами и т.п.). Дефекты имеют тенденцию развиваться внутри электрического оборудования, узлов и устройств. Тепловизионное изображение содержит информацию о распределении потоков тепловой энергии внутри тела в той мере, в какой данные потоки достигают его наблюдаемой поверхности. Выделяющаяся при этом избыточная тепловая энергия перетекает к менее нагретым областям, рассеиваясь «по пути» к наблюдаемой оператором поверхности. Поэтому на начальной стадии развития (когда повышение температуры невелико) дефект можно обнаружить лишь по косвенным признакам, но достаточно трудно точно измерить температуру самого нагретого дефектного узла.

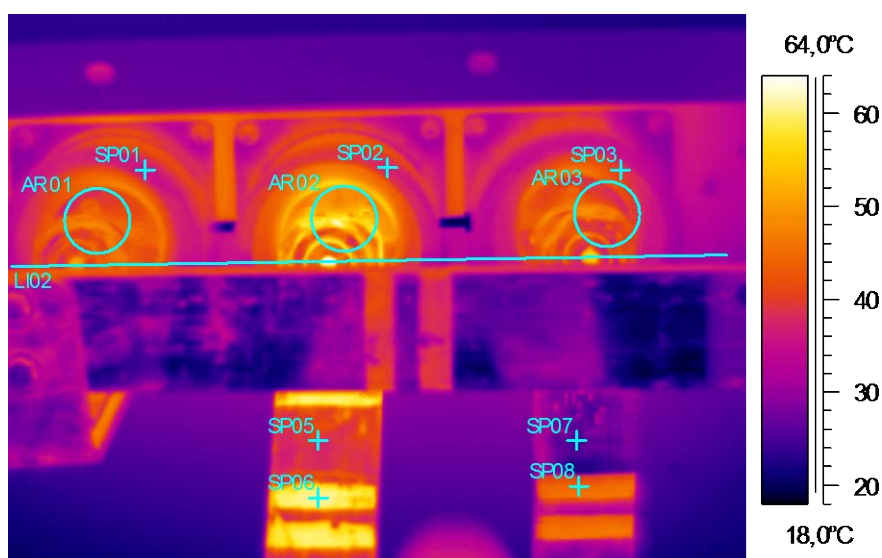


Рисунок 4.17 – Тепловизионное изображение, полученное с помощью ТВИ FLIR 640, представлено сотрудниками ФГАОУ «ПЭиПК»

На рис. 4.18, взятом из рекламных материалов по применению ТВИ FLIR Exx-Series для обследования электроэнергетического оборудования, источником избыточного тепловыделения является подшипник, температура которого является критерием работоспособности электродвигателя. Оператор регистрирует температуру только внешней части конструкции и должен сделать выводы о наличии и степени развития дефекта, если он действительно имеет место. Установить устойчивые связи между температурами подшипника и наблюдаемой поверхности корпуса можно только экспериментально. Поэтому в дополнение к объективно измеренному параметру (температуре корпуса) оператор должен накопить и использовать базу знаний, чтобы сформулировать окончательный вывод о состоянии оборудования.

Другим примером необходимости объединять результаты конкретного измерения с накопленной базой знаний может служить тепловой портрет распределительного шкафа, стенки которого не имеют заметного перегрева, но

подводящие кабели в непосредственной близости от шкафа нагреты больше, чем эти же кабели на большом удалении от него.

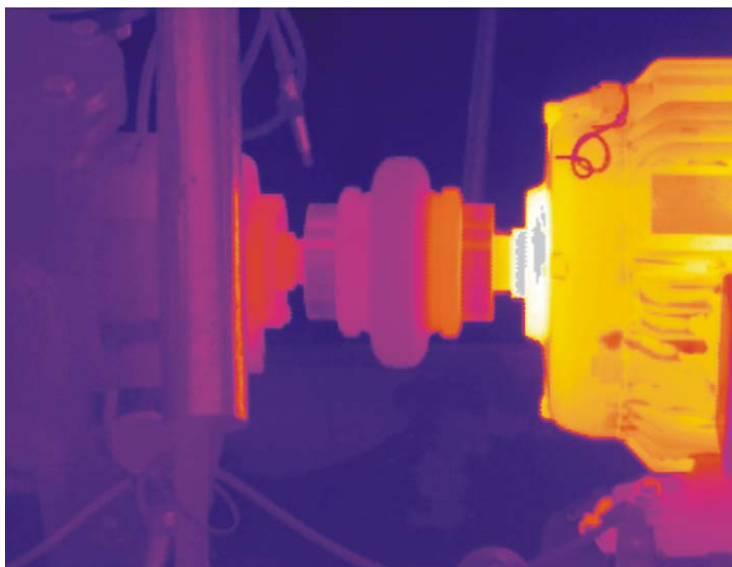


Рисунок 4.18 – Из рекламных материалов по применению ТВИ FLIR Exx-Series для обследования электроэнергетического оборудования

Тепловая энергия от дефектного соединения внутри шкафа (рис. 4.19) за счёт теплопроводности распространяется (отводится) по кабелю и приводит к повышению его температуры за пределами шкафа.

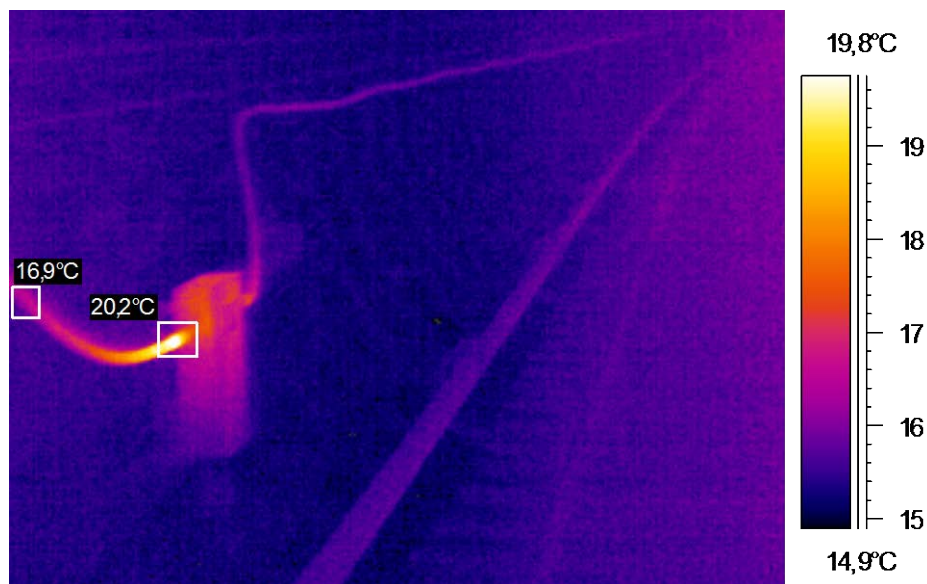


Рисунок 4.19 – Тепловизионное изображение распределительного шкафа. Материал предоставлен АО «Спектр» в 2003 году

Сложность задачи оператора состоит в том, чтобы определить, вызвано ли повышение температуры кабеля выделением тепла при протекании по нему номинального тока и является нормальным для данного режима работы, или же повышение температуры кабеля есть результат перегрева дефектного соединения внутри шкафа. В общем случае шкаф, как правило, закрыт, и

дефект болтового соединения кабеля может быть выявлен только косвенно по нагреву кабеля. При наличии явных тепловых аномалий на изображении объекта или на изображении одного из нескольких одинаковых объектов эти аномалии подлежат более тщательному обследованию с применением всех других технических средств и визуального наблюдения. В приведённом случае специалисты рекомендуют дальнейший анализ проводить при $\Delta T > 2^\circ\text{C}$.

Особенность применения тепловидения в электроэнергетике в том, что когда проводящий тепловизионную диагностику оператор не может принять твёрдого решения, существуют ли признаки дефекта в полученном изображении, в его распоряжении, как правило, есть возможность получить тепловой портрет аналогичного узла или устройства, работающего в таких же условиях и при таких же нагрузках заведомо без дефектов. Этот тепловой портрет можно использовать как эталон для сравнения с портретом объекта, вызывающего сомнения у оператора.

Наибольшая достоверность интерпретации результатов и наиболее точные прогнозы получаются тогда, когда обследуются объекты при номинальной нагрузке и в номинальных условиях работы. При прочих равных условиях предпочтительнее проводить обследование оборудования в периоды высоких нагрузок. Однако значительная часть электрооборудования работает в условиях сложной динамики нагрузок. Существующие методики пересчёта тепловых режимов и электрической нагрузки [19] не обладают высокой точностью для всех условий и снижают надёжность прогнозов. Как правило, именно пересчёты такого рода вносят основной вклад в уменьшение достоверности рекомендаций, сделанных с использованием результатов тепловизионных обследований. Поэтому при выработке рекомендаций и составлении выводов по результатам диагностики целесообразно воспользоваться несколькими вариантами методик пересчётов (например, вариантами методик пересчётов теплового режима оборудования при 100% и 50% нагрузках). Предпочтительными следует считать методики, основанные на экспериментальных данных, полученных для обследуемого оборудования. Для ознакомления с характером методик пересчётов приводятся извлечения из материалов [19], рекомендуемых для предварительной ориентировки операторов при анализе результатов обследований.

«Для контактов и болтовых контактных соединений пересчет превышения измеренного значения температуры к нормированному при токах нагрузки $(0,6-1,0)I_{ном}$ осуществляется исходя их соотношения:

$$\frac{\Delta T_{ном}}{\Delta T_{раб}} = \left(\frac{I_{ном}}{I_{раб}} \right)^2,$$

где $\Delta T_{ном}$ — превышение температуры при $I_{ном}$; $\Delta T_{раб}$ — то же, при $I_{раб}$.

Тепловизионный контроль электрооборудования и токоведущих частей при токах нагрузки $0,3I_{ном}$ и ниже не способствует выявлению дефектов на ранней стадии их развития.

Для контактов и болтовых контактных соединений при токах нагрузки (0,3–0,6) $I_{ном}$ оценка их состояния проводится по избыточной температуре. В качестве норматива используется значение температуры, пересчитанное на $0,5 \cdot I_{ном}$.

Для пересчета используется соотношение:

$$\frac{\Delta T_{0,5}}{\Delta T_{раб}} = \left(\frac{0,5 \cdot I_{ном}}{I_{раб}} \right)^2,$$

где $\Delta T_{0,5}$ – избыточная температура при токе нагрузки $0,5 I_{ном}$.

При оценке состояния контактов и болтовых КС по избыточной температуре и токе нагрузки $0,5 I_{ном}$ различают следующие области по степени неисправности.

Избыточная температура 5–10°C. Начальная степень неисправности, которую следует держать под контролем и принимать меры по её устранению во время проведения ремонта, запланированного по графику,

Избыточная температура 10–30°C. Разившийся дефект. Принять меры по устранению неисправности при ближайшем выводе электрооборудования из работы.

Избыточная температура более 30°C. Тепловизионное изображение аварийного дефекта представлено на рис. 4.20. Дефект требует немедленного устранения».

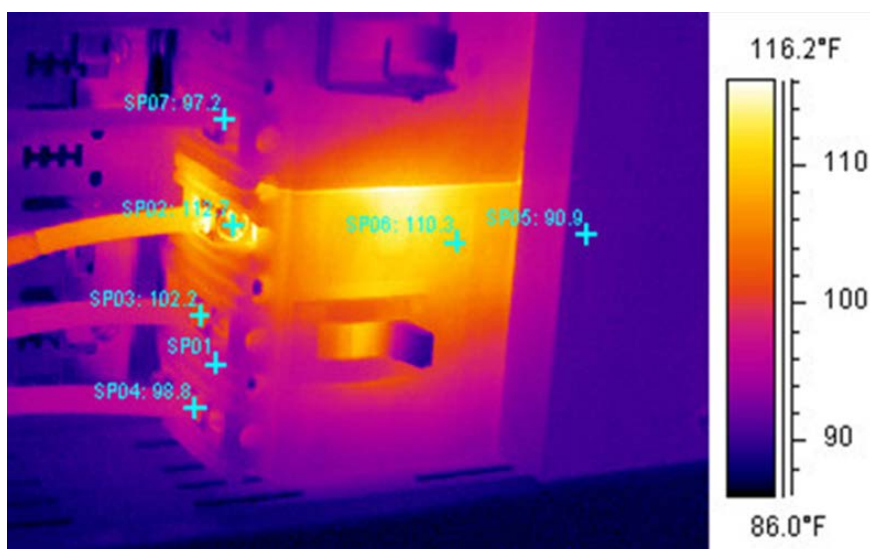


Рисунок 4.20 – Иллюстрация изображения ТВП FLIR Exx-Series аварийного дефекта из рекламных материалов фирмы FLIR

Практика использования данного нормативного документа [19] свидетельствует, что использование показателя степени «2» оправдывает себя лишь в некоторых ситуациях. Специалистами приводятся результаты собственных исследований, которые дают лучшее совпадение с экспериментальными данными, если показатель степени изменялся от значений 1,1 до 2,4 в зависимости от конкретных условий. Это свидетельствует о том, что процессы теплообмена в конструкциях, нагреваемых джоулевым теплом,

могут быть описаны столь простыми соотношениями лишь в самом первом приближении и с неконтролируемыми погрешностями. Тепловое поле наблюдаемых объектов зависит от совокупности целого ряда факторов, которые могут оказывать взаимно усиливающее или взаимно подавляющее влияние. Учесть все факторы и количественно определить степень их влияние в каждом конкретном случае, как правило, трудно. Чувствительность современных ТВП к регистрируемому перепаду радиационных температур столь велика, что они во многих ситуациях реагируют на изменение условий проведения обследований в большей степени, чем применяемые специализированные средства и приборы. Это относится в первую очередь к физическим параметрам среды, влияющим на конвекционный обмен тепловой энергией, наличие источников фоновой ИК подсветки и т.п.

Вариации скорости воздушных потоков вблизи наблюдаемых поверхностей могут существенным образом сказаться на достоверности интерпретации результатов тепловизионного обследования. Температурный контраст, измеренный при скорости ветра 5 м/сек, будет приблизительно вдвое меньше, чем температурный контраст того же объекта, но измеренный при скорости ветра 1 м/сек. При скорости ветра 8 м/сек температурный контраст будет приблизительно в два с половиной раза ниже, чем измеренный при скорости ветра 1 м/сек. Фирмой FLIR Systems приводятся экспериментально найденные корректирующие коэффициенты, которые нужно учитывать при обработке результатов натурных измерений.

Применение вышеприведённых коэффициентов можно продемонстрировать на следующем примере. Если оператор провёл измерения контраста радиационных температур некоторого элемента и фона при скорости устойчивого ветрового потока 3 метра в секунду и получил разность, составляющую 2 К, то для получения значения реального контраста наблюдаемого элемента (без учёта его конвекционного охлаждения) нужно умножить 2 К на значение коэффициента из таблицы 4.2. Итоговое значение составляет 3.28 К.

Таблица 4.2 – Корректирующие коэффициенты

Скорость ветра, м/сек	1	2	3	4	5	6	7	8
Корректирующий коэффициент	1	1,36	1,64	1,86	2,06	2,23	2,40	2,54

Изменение расстояния до объекта обследования определяет сразу несколько причин, от которых зависит достоверность интерпретации его результатов. Недостаточно точная фокусировка оптической системы ТВП вносит случайную погрешность в измерения радиационной температуры, устранить которую при последующих обработках невозможно. Помимо изменения ракурса наблюдения объекта, изменяется длина атмосферной трассы, определяющая ослабление полезного лучистого потока от объекта и вклад собственного (помехового) ИК излучения атмосферы в общий

оптический сигнал. Кроме того, видимый угловой размер наблюдаемого объекта определяется расстоянием до него. Общее правило состоит в том, что радиационная температура объектов (с малыми угловыми размерами) измеряется с тем большей погрешностью, чем меньше его угловой размер. Это типично для всех оптико-электронных систем, хотя для каждого типа ТВП количественные соотношения будут разными. Для ТВП, использующих матричные микроболометрические фотоприёмники, измеренная радиационная температура объекта, занимавшего размер 1×1 пиксель на $\sim 2,3$ К, может отличаться от радиационной температуры того же объекта, когда он занимает размер тепловизионного изображения 9×9 пикселей. В самом общем случае можно ориентироваться на следующее правило: для того, чтобы погрешность измерения радиационной температуры не превышала паспортную величину, размер усредняемой зоны тепловизионного изображения должен занимать область не меньшую, чем, приблизительно, 10×10 пикселей.

Помимо собственно дистанции до наблюдаемого объекта в каждом конкретном случае может изменяться ракурс его наблюдения. Вместе с ним изменяется подстилающий фон и доля отражаемого от объекта фонового излучения (рис. 4.21).

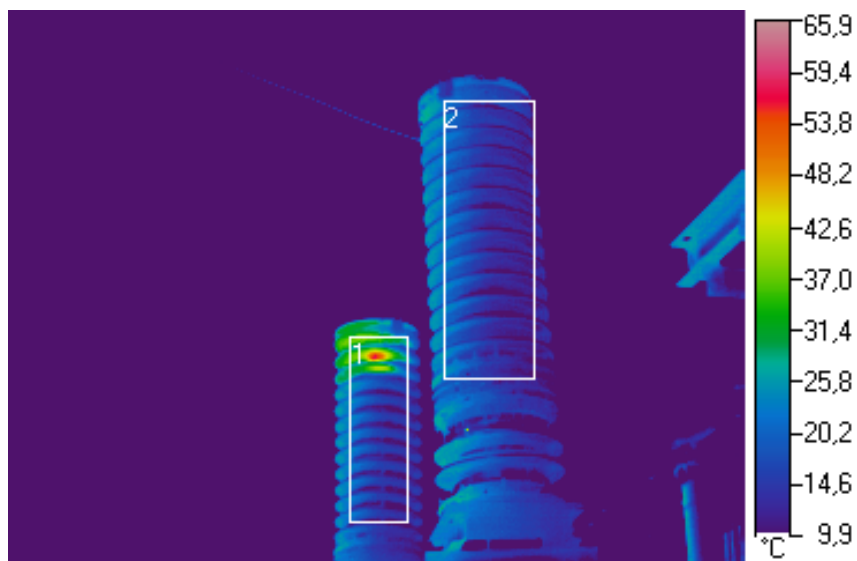


Рисунок 4.21 – Иллюстрация изображения ТВП FLIR Exx-Series дефекта из дидактических материалов фирмы FLIR

Оптические характеристики всех наблюдаемых тел обладают значительной угловой зависимостью, что и обуславливает изменение относительного вклада собственного и отражённого излучения. При наличии больших неоднородностей излучения фона (например, при наличии нагретых ламп или других высокотемпературных объектов) даже небольшие изменения ракурса наблюдения могут существенным образом исказить тепловое поле наблюдаемого объекта за счёт случайного попадания, отражённого от его поверхности блика.

Техническая суть проблемы состоит в том, что для наилучшего определения степени угрозы аномалии теплового поля для нормального

функционирования объекта требуется наиболее подробное её изображение. Однако стандартное тепловизионное изображение содержит достаточно малое количество элементов (пикселей): от 120×160 до 640×480. Поэтому для получения подробного изображения объекта (изображения с высокой детализацией) необходимо уменьшать поле зрения ТВП либо за счёт использования более длиннофокусного объектива, либо за счёт уменьшения дистанции до объекта наблюдения. Существует противоречие между необходимостью получать детализированное изображение объектов и необходимостью иметь широкую зону контроля. Критерием выбора компромисса выступает надёжность выявления оператором дефекта по тепловизионному изображению, сформированному ограниченным числом пикселей.

Существуют ситуации, когда изменение излучательной способности поверхности тела связано с внутренними дефектами и способствует их выявлению с помощью ТВП. Однако в большей степени следует обратить внимание на тот факт, что радиационная температура участков равномерно нагретой поверхности может оказаться заметно разной из-за существенной угловой зависимости её оптических характеристик. При использовании ТВП с широким углом поля зрения у большинства поверхностей реальных тел, и в особенности покрытых конденсированной влагой, участки в центре поля зрения и на периферии поля зрения ТВП будут по-разному отражать ИК излучение фона, приходящее из разных участков окружающего пространства. Из-за этого поле радиационных температур будет иметь сложную структуру, не соответствующую распределению температуры поверхности. Особенно это заметно при тепловизионных обследованиях поверхностей, имеющих большую кривизну.

Например, у тепловизоров ThermaCAM P60 и ThermaCAM P25, комплектуемых объективами с углом поля зрения 45°×34°, неоднородность показаний измеренной температуры может достигать 0,6 К при наблюдении одного и того же объекта в центре и на периферии поля зрения. Это значительно больше паспортной пороговой чувствительности ТВП и должно учитываться оператором при проведении сравнительных оценок состояния однотипного оборудования, поскольку неравномерность 0,6 К превышает отдельные отбраковочные критерии норм тепловизионного контроля электрооборудования [18, 19].

Критерии вырабатываются на основе обобщения экспериментальных данных и различны для разных групп оборудования. Общим является характер их применения к результатам обследований, которые используются для принятия решений двух уровней:

- выявление аварийного или предаварийного состояния объекта и выработка на этом основании рекомендаций о сроках проведения его ремонта (плановый или внеплановый);

- включение результатов в базу данных в рамках мониторинга и выработка прогнозов относительно дальнейшего состояния (жизненного цикла) объекта обследования в штатных и в нештатных условиях.

Первостепенной важностью обладает предотвращение аварийных ситуаций. С этой целью, как правило, устанавливаются три стандартных диапазона температур обследуемых элементов. Выбираются два значения температуры типового элемента T_1 и T_2 , и его измеренное значение T сравнивается с этими стандартизованными значениями (Таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Критерии принятия решения по соотношению температур

Соотношение температур	Состояние оборудования	Рекомендуемые мероприятия
$T \geq T_2$	Аварийное или предаварийное состояние	Остановка функционирования и срочный ремонт
$T_1 \leq T \leq T_2$	Наличие дефекта	Подробное обследование. Ремонт в плановом порядке
$T < T_1$	Зарождение дефектов	Обследование в плановом порядке

Наиболее простыми на практике являются случаи, когда дефекты оборудования явно выражены и вызывают заметный перегрев узла. Основные трудности для интерпретации связаны с анализом пограничных ситуаций, когда зафиксированная аномалия теплового поля явным образом превышает норму, но оператор не может сделать вывод о том, насколько велико это превышение в реальности. Поэтому оценка оператором возможных погрешностей измерения температур прямым образом влияет на достоверность прогнозов в ситуациях, когда измеренная температура T близка к T_1 или T_2 . Иллюстративны в этом отношении дефекты, скрытые от непосредственного наблюдения экранами или элементами конструкции. При выявлении температурных аномалий на тепловизионном изображении задача оператора - убедиться, что они свидетельствуют о существовании перегрева зоны, а не блика отражённого ИК излучения. Методический приём, часто помогающий справиться с этой задачей, состоит в том, чтобы измерить значения радиационных температур зоны возможного перегрева и окружающих объектов, которые могут давать подсветку наблюдаемого фрагмента.

Экспериментально установлено, что с ростом нагрузки температура растёт медленнее, чем это предсказывает закон Джоуля – Ленца, согласно которому количество выделяемой тепловой энергии Q пропорционально произведению квадрата силы тока I^2 на сопротивление R за время действия t : $Q = 0,24 I^2 R t$. В зависимости от теплопроводности и теплоёмкости компонент меняется величина отклонения от квадратичной зависимости. Эмпирическая формула выглядит следующим образом:

$$\Delta T(100\%) = \Delta T_{\text{изм}} * \left\{ \frac{\text{Ток максимальной нагрузки}}{\text{Ток в момент измерения}} \right\}^a,$$

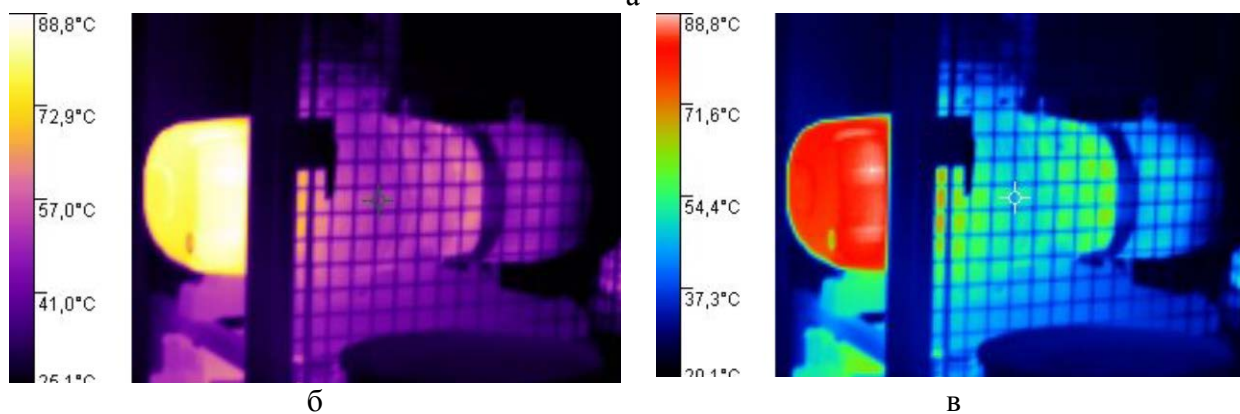
$a = 1,6$ для хорошей теплопроводности; $a = 1,8$ для средней теплопроводности; $a = 2$ для плохой теплопроводности; $\Delta T_{\text{изм}}$ – превышение температуры в момент измерений.

Фактором, способным внести погрешности в результаты тепловизионного обследования, является индукционный нагрев элементов. Например, в магнитном материале вдоль токового пути (в металлических пластинах основания изоляторов) может формироваться зона высокого перегрева. Эта зона является местом возможного возникновения дефекта, но важно выявить причину возникновения такого дефекта.

Встречаются условия проведения тепловизионных обследований, при которых наблюдение производится сквозь металлическую сетку защитного ограждения (рис. 4.22 а–в).



а



б

в

Рисунок 4.22 – Тепловизионные и телевизионные изображения влияния сеточного ограждения на погрешности измерения температур: «а» - телевизионное изображение; «б» - тепловизионное изображение в псевдоцветовой палитре Iron; «в» - тепловизионное изображение в псевдоцветовой палитре Rainbow. Заимствовано из рекламных материалов фирмы FLUKE

При визуальном наблюдении (рис. 4.22 а) этот фактор не нуждается в специальном количественном учёте, однако в таком случае формирование теплового поля существенно усложняется и требует особого учёта. ИК излучение обследуемого объекта ослабляется пропорционально соотношению площади его неэкранированного изображения и площади экранирующих элементов сетки. Сами экранирующие элементы дополнительно нагреваются тепловым излучением обследуемого объекта, участвуют в естественном

теплообмене с окружающей средой и дают свой вклад в суммарное ИК излучение, регистрируемое ТВП. Полученное значение температуры объекта будет заниженным (рис. 4.22 б, в), причём большую долю изображения сюжета занимает сетка (чем дальше от неё оператор), тем больше.

Применение тепловидения для дистанционного обследования промышленного электроэнергетического оборудования имеет множество аспектов, исследованию и описанию которых к настоящему времени посвящено большое количество публикаций, раскрывающих те особенности, которые в обязательном порядке должны учитываться при диагностике конкретного типа оборудования. Общим является вывод о том, что тепловидение как инструментарий диагностики требует от оператора не только владения собственно прибором, но и подробным знанием устройства обследуемого оборудования и особенностями режимов его работы. Роль априорного знания в данной области применения тепловидения (в отличие от некоторых других) чрезвычайно велика и носит определяющий характер с точки зрения достоверности прогнозов.

4.4 ТВП для обнаружения утечек газов

Развитие ИК техники, выразившееся в достижении высоких значений пороговой чувствительности приборов, позволило создать целый ряд приборов, позволяющих регистрировать ИК излучение в очень узких спектральных полосах $\Delta\lambda$, соизмеримых с полосами собственного излучения/поглощения отдельных газов.

В число современных ТВП, имеющих уже не универсальное, а узко специфическое назначение, следует отнести группу приборов, предназначенных для обнаружения избыточной концентрации в атмосфере определённого газа, например, CO_2 , SF_6 и др. Специализация достигается путём введения в состав МФПУ ТВП охлаждаемого узкополосного ИК фильтра, полоса пропускания которого совпадает с полосой излучения данного газа при естественной температуре. В области дистанционного тепловизионного обследования прибор применяется для обнаружения утечек газа, в частности, (элегаза) газонаполненных высоковольтных разрядников. На формирование контрастного ИК излучения оказывает влияние не только изменение оптических характеристик области атмосферы в районе повышенной концентрации газа, но и охлаждение среды из-за расширения газа при утечках.

В основе создания «газовизоров» лежат два достижения современного оптико-электронного приборостроения: обеспечение высокой чувствительности ТВП, использующих МФПУ с криогенным охлаждением, и внедрение в эти МФПУ глубоко охлаждаемых полосовых спектральных фильтров, обеспечивающих устойчивое выделение полезного сигнала нужной длины волны и подавляющих ИК излучение всех других длин волн с нужным коэффициентом ослабления. Фирма FLIR разработала и выпустила на рынок серию ТВП GF под фирменным названием GasFindIR, позволяющих обнаруживать природные и антропогенные газы. Иллюстрации призваны

показать, как с помощью ТВП в узкой спектральной полосе наблюдаются утечки газов в промышленных конструкциях и как при этом наблюдаются фрагменты окружающей обстановки. Измеряемая при этом величина контраста энергетической яркости должна интерпретироваться в единицах яркостной температуры с указанием длины волны.

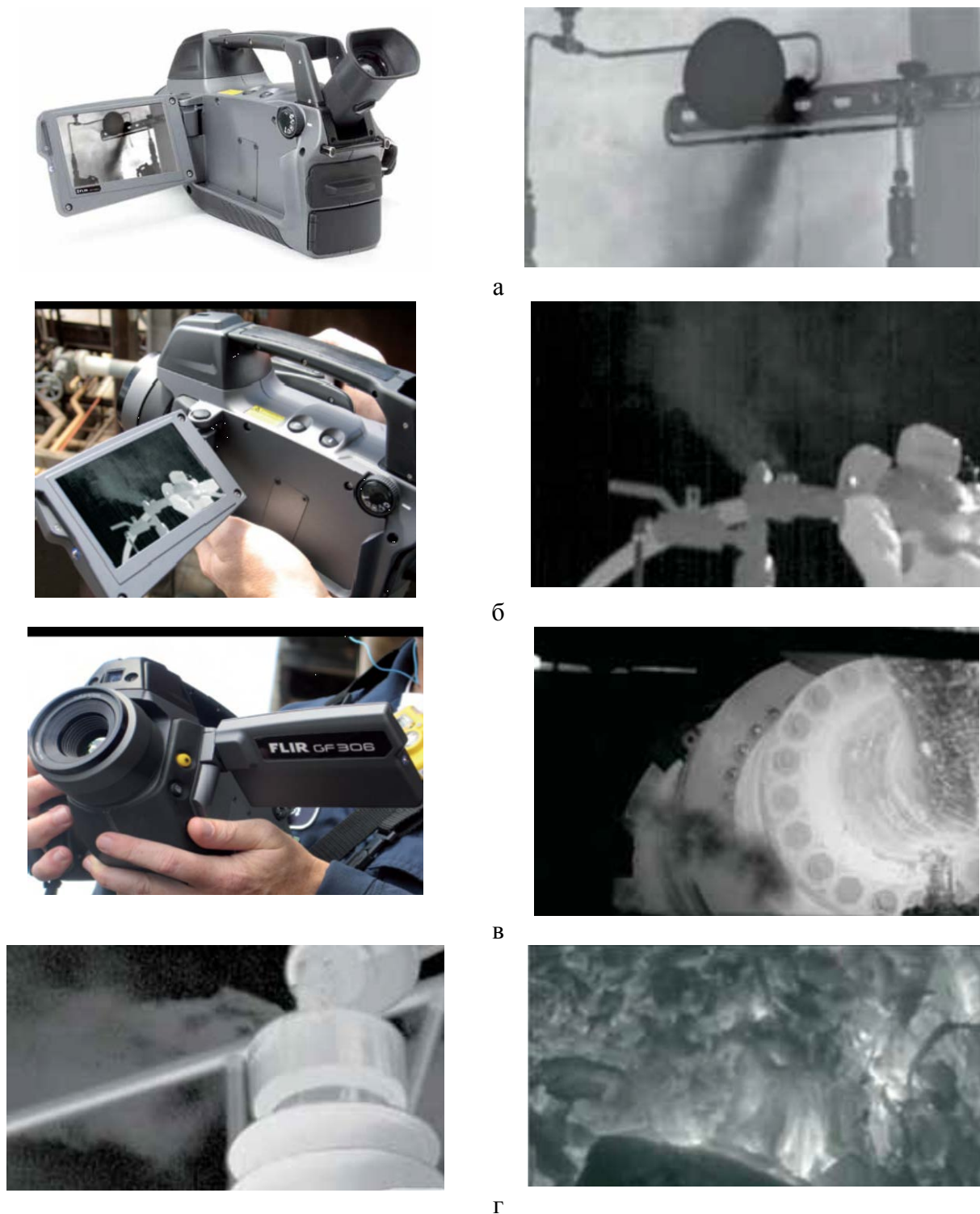


Рисунок 4.23 – ThermaCAM™ GasFindIR Spectral range Cooled InSb / 3.2–3.4 мкм. «а», «б», «в» – изображения тепловизора и пример полученного с его помощью изображения конструкций газового оборудования; «г» – примеры тепловизионных изображений газовых зон, где происходит выпуск газа. Заимствовано из рекламных материалов фирмы FLIR.

На рис. 4.23 а–г видны области аномального контрастного ИК излучения, обусловленные не только изменением оптических характеристик области атмосферы в районе повышенной концентрации газа, но и охлаждением среды из-за расширения газа из-за утечек. При наблюдении с помощью ТВИ ThermoCAM™ GasFindIR Spectral range Cooled InSb с узким спектральным фильтром 3.2–3.4 мкм получено изображение внутренней полости, где происходит интенсивное горение (рис. 4.24а, 4.24.б). Это позволяет подавить оптическое излучение помехи от разогретых газов и регистрировать сквозь пламя только ту часть оптического поля, которая несёт полезную информацию о состоянии объектов наблюдения.

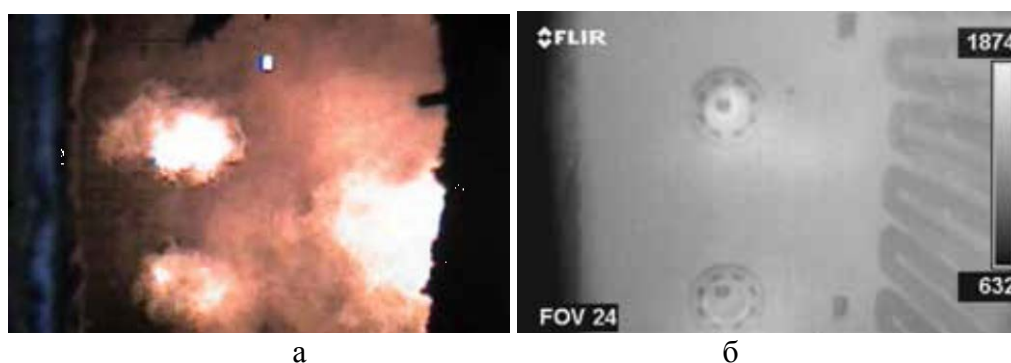


Рисунок 4.24 – Изображение внутренней полости, где происходит интенсивное горение. Изображение а – телевизионное; б – тепловизионное изображение получено с помощью ТВИ ThermoCAM™ GasFindIR Spectral range Cooled InSb с узким спектральным фильтром 3.2–3.4 мкм фирмы FLIR

Имеются сведения о выпуске китайских неохлаждаемых (болومترических) ТВИ, работающих в MWIR диапазоне и использующихся для регистрации выбросов газов по принципу «газовизоров» на криогенных фотоприёмниках. Такой технический успех стал возможен за счёт достижения сверхвысокой чувствительности микроболومترических матриц в диапазоне 2–5 мкм и введения в конструкцию специализированных узкополосных спектральных фильтров. Следует ожидать дальнейшее расширение приборного парка для тепловизионного обнаружения утечек или выделения различных газов.

Определённую пользу ТВИ данного типа могут принести при дистанционном зондировании выбросов газов из промышленных труб (рис. 4.25) или при наблюдении выхлопных газов у двигателей внутреннего сгорания разных видов.

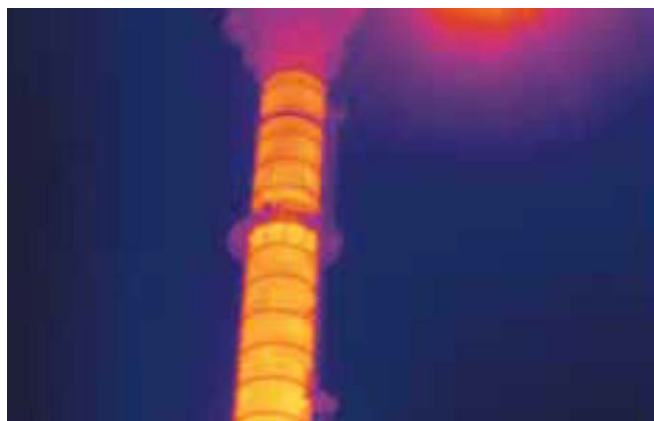


Рисунок 4.25 – Тепловизионное изображение дымовых выбросов, полученное ThermoCAM™ GasFindIR. Дидактические материалы фирмы FLIR

4.5 Тепловизионные обследования зданий и сооружений

Практический опыт применения тепловидения для дистанционного обследования промышленных зданий и сооружений позволяет объединить большинство решаемых задач в несколько условных групп. Первая из них направлена на количественную оценку тепловых потерь разнообразных сооружений: здания, трубопроводы (рис. 4.26) в промышленных предприятиях и тепловых коммуникационных сетях и т.п.



Рисунок 4.26 – Иллюстрация применения ТВП FLIR для получения теплового портрета конструкций в нефтехимической промышленности заимствована из дидактических материалов фирмы FLIR

Роль тепловидения в этих задачах заключается в получении количественных исходных данных, в первую очередь, абсолютных значений температуры теплообмена зон тепловых неоднородностей и размеров этих зон на поверхности объекта.

Вторая группа задач связана с выявлением внутренних дефектов объектов наблюдения, влияющих на прочность, долговечность и другие его конструктивно-механические показатели. В этих задачах тепловидение не даёт однозначной расшифровки скрытых дефектов, но играет характерную для неразрушающего контроля роль их первичного дистанционного обнаружителя,

подробное исследование которых в дальнейшем производится с привлечением других средств.

Ещё одна группа задач может быть выделена как самостоятельная из-за множества специфических особенностей их решения и включает в себя такие задачи, как определение мест протечек воды в домах и на трассах трубопроводов, обнаружение повышенной воздухопроницаемости из-за недостаточного уплотнения стыков окон, дверей и т.п.

Так же, как и в тепловизионных обследованиях электроэнергетического оборудования, в этих областях накоплен большой практический опыт, позволивший обобщить его в ряде нормативных документов, которые регламентируют порядок проведения и критерии оценки результатов тепловизионной диагностики [20–23]. Более того, в ряде стран существуют нормативные документы, имеющие статус «теплового паспорта здания», пополняющийся в течение всего жизненного цикла здания от постройки до вывода из эксплуатации.

Современный приборный парк для дистанционного обследования зданий и промышленных сооружений состоит из универсальных ТВП диапазона 8-12 мкм. С их помощью получают основные количественные исходные данные, которые затем используются в разнообразных теплофизических расчётах. Для некоторых задач дистанционное измерение температур с помощью ТВП является единственным способом обнаружения дефектов и получения количественных исходных данных (рис. 4.27 а-в). Вместе с тем, для получения необходимых результатов обследования к данным от тепловизионных измерений должны привлекаться количественные данные от других измерительных приборов (например, измерителей теплового потока) и выполняться методические приёмы проведения измерений, уменьшающие их погрешности, обусловленные нестационарным характером теплообмена зданий и сооружений с окружающей средой.

Общие черты в различных задачах тепловизионной диагностики зданий и сооружений проявляются в необходимости измерять абсолютные значения температуры. От точности определения абсолютных значений температуры, например, наружной и внутренней поверхностей стен зданий зависит точность определения их теплового сопротивления и тепловых потерь, то есть зависит содержательный вывод о необходимости улучшения тепловой изоляции объекта. В основе всех методик использования данных тепловизионных измерений температур лежат фундаментальные закономерности теплового обмена, применяемые к конкретным условиям с учётом теплофизических характеристик реальных конструкций. Погрешности измерений в сочетании с упрощениями при переходе от идеальных тепловых схем к реальным конструкциям обуславливают достаточно широкий доверительный интервал получаемых значений. Однако тепловизионные обследования дают важную возможность корректировать исходные данные и методики расчётов, сравнивая тепловые портреты объектов, например, до осуществления мероприятий по ликвидации избыточных тепловых потерь и после их осуществления.

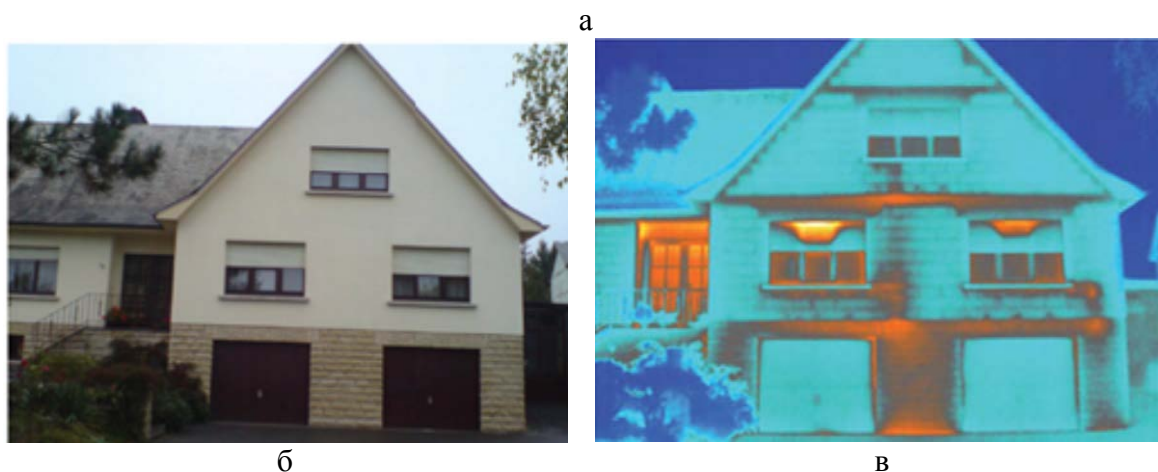


Рисунок 4.27 – Иллюстрации применения ТВИ FLIR B660 для получения теплового портрета здания заимствованы из рекламных материалов фирмы FLIR: «а» – внешний вид ТВИ; «б» – телевизионное изображение здания; «в» – тепловизионное изображение здания

Для повышения достоверности результатов тепловизионных обследований зданий и сооружений сформулирован набор достаточно общих методических требований и рекомендаций, имеющих физическое обоснование. В частности, рекомендация проводить обследования зданий в отопительный сезон [20–23] основана на подразумеваемом при этом устойчивый однонаправленный тепловой поток изнутри здания в сторону внешней холодной поверхности. Все перечисленные определения (устойчивый, однонаправленный и т.д.) весьма важны, хотя на практике выполняются не часто, что приводит к вынужденным отступлениям от строгих решений и к погрешностям. В частности, в [23] «Тепловой контроль технических устройств, сооружений и их элементов в реальных условиях их эксплуатации рекомендуется проводить при разности температур (наличии температурного напора ΔT) между температурами внутреннего объема объекта контроля T_{int} и наружного воздуха T_{ext} не менее чем 10°C . Наличие температурного напора $\Delta T = (T_{int} - T_{ext})$ обуславливает образование на исследуемой поверхности температурного поля, качественный и количественный анализ которого позволяет выявлять дефекты, производить оценку качества и определять характеристики контролируемого объекта». На практике разнонаправленные

тепловые потоки через наружные ограждающие конструкции в ночное и в дневное (утреннее и вечернее) время при интерпретации результатов тепловизионных обследований не дают возможность руководствоваться большинством рекомендаций [23], которые созданы для устойчивых однонаправленных процессов с периодом установления в сутки и более.

Характерной особенностью применения тепловидения в диагностике состояния зданий и сооружений является прямая связь с метеорологическими условиями проведения обследований. В материалах Пособия, посвящённых оценкам влияния оптических характеристик объектов на значения измеренной их радиационной температуры, показано, сколь существенно сказывается присутствие осадков на поверхности стен, освещение и нагрев их Солнцем, конвекционный теплообмен обдувом и т.д. Индикатрисы коэффициентов излучения и отражения большинства типов ограждающих поверхностей зданий и сооружений принимаются ламбертовскими в пределах углов визирования $\pm 60^\circ$ от нормали [1]. Однако это в полной мере относится к сухим материалам. Реальные погодные условия даже без осадков обуславливают появление на внешних стенах изморози и влаги, которые распределены по поверхности неравномерно и существенным образом искажают тепловые портреты зданий. Суточный и сезонный ход температуры создают условия, когда «точка росы» находится на внешней поверхности здания. При нормальном атмосферном давлении и температуре воздуха $+20^\circ\text{C}$ содержащийся в нём водяной пар достигает состояния насыщения и начинает конденсироваться в жидкой фазе на поверхностях, охлаждённых до $+12^\circ\text{C}$ (при 60% относительной влажности) и до $+16,5^\circ\text{C}$ (при 80% относительной влажности). Геометрическая форма конденсата весьма разнообразна и в количественной мере характеризуется величиной «краевого угла смачивания». Плоские плёнки на гидрофильных и полусферические капли на гидрофобных поверхностях отражают излучение разных участков окружающего фона с разными значениями коэффициентов отражения, что приводит к различному соотношению собственного и отражённого излучения в тепловом поле наблюдаемого фрагмента стены. Казалось бы, объективная характеристика - измеренная радиационная температура - у равномерно нагретой поверхности может оказаться разной за счёт угловой зависимости оптических характеристик фрагментов. При использовании ТВП с широким углом поля зрения у покрытых изморозью или конденсированной влагой поверхностей реальных тел области в центре и на периферии поля зрения ТВП будут по-разному отражать ИК излучение фона, приходящее из разных участков окружающего пространства [1]. Из-за этого поле радиационных температур будет иметь сложную структуру, не соответствующую распределению термодинамической температуры поверхности. Особенно это заметно при тепловизионных обследованиях высоких зданий в зимнее время с наземной точки наблюдения. Для правильной интерпретации полученных результатов оператор должен выполнять измерения при нескольких ракурсах наблюдения, изменяя, по возможности, условия отражения фонового излучения, чтобы в дальнейшем его выявить и компенсировать.

Количественный учёт ИК излучения верхней полусферы (раздел 1.1) при измерениях температуры внешних ограждающих покрытий требует привлечения дополнительных данных, характеризующих конкретные условия измерения. Общеизвестны оценки радиационной температуры поверхностей листа бумаги при его визировании с верхней и нижней стороны тепловизором диапазона 8–14 мкм при ясном небосводе. Результаты измерений отличаются на 2 К при термодинамической температуре листа, равной температуре воздуха.

Долговременные (сезонные) изменения температуры создают условия, при которых «точка росы» находится внутри стены или даже на её внутренней поверхности (рис. 4.28). Теплопроводность стены при этом изменяется. По имеющимся сведениям, перенос тепловой энергии, например, свежей кирпичной кладки (обладающей большей влажностью) в 2 раза выше, чем у «сухой» кладки, причём процесс «высыхания» кирпичной кладки занимает не меньше одного года.

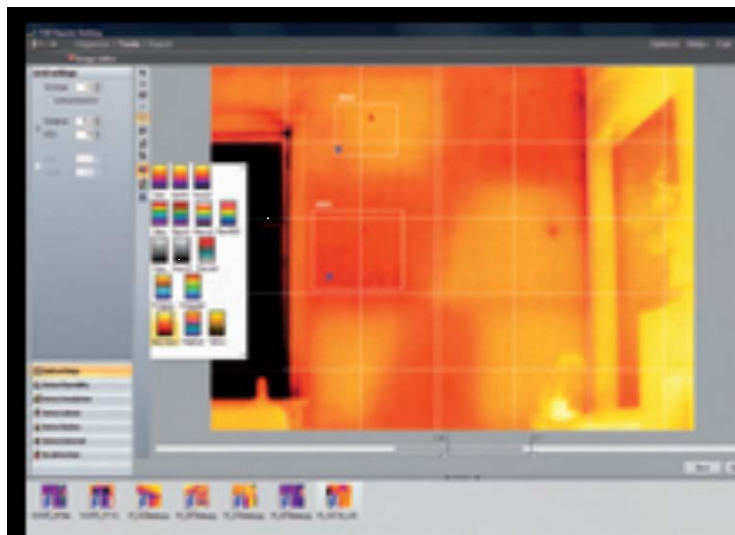


Рисунок 4.28 – Иллюстрации применения ТВП фирмы FLUKE для обследования внутренних помещений. Материалы взяты из рекламных проспектов фирмы

Существуют ситуации, когда изменение теплового поля поверхности тела, связанного с наличием внутренних скрытых дефектов, отличить от конструктивных особенностей можно лишь с привлечением технической документации. С точки зрения особенностей тепловизионного обследования зданий следует отметить, что при составлении достоверных выводов и прогнозов они имеют то преимущество, что могут привлекать дополнительную (априорную) информацию от других инструментальных средств, проектных документов и, что наиболее важно, не обязаны выдавать окончательные решения в реальном масштабе времени. Разработанные к настоящему времени разнообразные методики обработки результатов тепловизионных измерений, приёмы совместной обработки данных с результатами обследований в видимом диапазоне (рис. 4.29) и возможность повторных обследований для корректировок исходных данных позволяют отнести тепловизионный метод к одному из основных методов дистанционной диагностики состояния зданий и сооружений.

Вместе с тем, развитие строительных технологий строительства зданий диктует совершенствование и технологии их обследований. Особый интерес представляет теплообмен зданий со светопрпускающими ограждениями. Оптические характеристики фасадных и оконных стёкол обуславливают различные тепловые портреты в MWIR и LWIR диапазонах работы ТВП и разные физические процессы при формировании теплового обмена за счёт излучения.

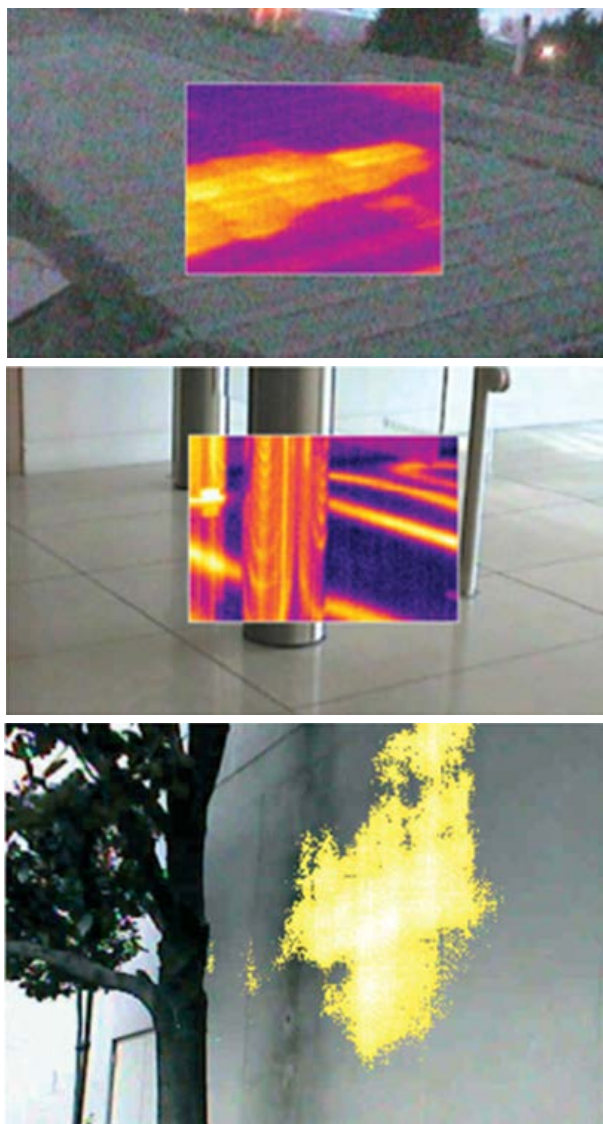


Рисунок 4.29 – Иллюстрация совместной обработки ИК и видимого изображения из рекламных материалов фирмы FLIR

Поскольку стеклянные элементы пропускают ИК излучение примерно до 3–4 мкм, то ИК излучение изнутри здания будет проходить сквозь стёкла наружу (с соответствующим коэффициентом пропускания стёкол), то есть охлаждать внутреннюю его часть радиационным путём при более низкой температуре снаружи. В LWIR диапазоне 8–12 мкм излучение изнутри здания наружу не выходит, поглощаясь во внутренних слоях стёкол и повышая термодинамическую температуру только стёкол и стен. Традиционно этот физический фактор не принимается во внимание при оценках теплового

излучения светопропускающих ограждений, которое приравнивается к тепловому излучению бетонных или кирпичных стен в LWIR диапазоне. Дополнительные погрешности в оценку теплового баланса зданий и сооружений вносит отсутствие учёта нагревания внутренней поверхности (за светопропускающим ограждением) излучением Солнца снаружи во всём оптическом диапазоне от видимого до 4 мкм.

Отдельный аспект носит учёт индикатрисы излучательной/отражательной способности стекла. Для чистых стеклянных поверхностей угловые зависимости этих оптических характеристик ближе к индикатрисам полированных металлов, чем к индикатрисам поверхностей из кирпича и бетона. Неламбертовский характер проявляется уже при углах $\pm 40^\circ$, и при их увеличении коэффициент излучения быстро падает и растёт коэффициент отражения. Однако внешние стеклянные поверхности большую часть времени покрыты аэрозолями (пылью). Из-за этого характер индикатрис излучательной/отражательной способности светопропускающих ограждений становится диффузно-зеркальным, сложным образом изменяя баланс потоков ИК излучения внутрь здания и наружу в дневное и ночное время. Роль этого фактора возрастает для современных зданий и сооружений, у которых основная доля внешней поверхности выполнена из светопропускающих элементов. Указанный аспект в явном виде относится к оптическим процессам рассеяния ИК излучения в слоистых полупрозрачных средах с активным участием динамики процессов теплопроводности и конвекции. Понимание содержательной структуры экспериментальных данных, полученных в MWIR и LWIR диапазонах по отдельности и в двух диапазонах вместе, не имеет убедительного научно-методического обоснования и в настоящее время ориентируется на практический опыт оператора.

Для современных зданий и сооружений характерна ещё одна особенность конструкций, которая ещё не нашла подробного освещения в методиках проведения их тепловизионных обследований. Для уменьшения тепловых потерь и для улучшения влагозащитных свойств ограждающих конструкций применяются «колодцевые кладки» с воздушными полостями и «вентилируемые фасады». При всех отличиях в назначении и способах создания эти элементы зданий и сооружений объединяет внесение ими радикальных отличий в тепловой портрет зданий по сравнению с тепловыми портретами традиционных сооружений. Выявление смыслового содержания результатов тепловизионного обследования в настоящее время возлагается в каждом конкретном случае на оператора и опирается на выявление корреляционных связей между количественными значениями температуры фрагментов зданий и особенностями конструкции их фасадов.

Имеющийся опыт обследования воздухопроницаемых зон (стыки окон, дверей, чердачные зоны и т.п.) показывает, что на их долю приходится основная часть тепловых потерь в холодное время. Выявление тепловых аномалий, связанных с повышенной теплопроводностью и воздухопроницаемостью из-за плохой изоляции, как правило, не вызывает сложностей. Основная же сложность состоит в правильном определении

абсолютных температур таких зон (рис. 4.30), от чего, в свою очередь, зависит достоверность составляемых прогнозов и выводов.

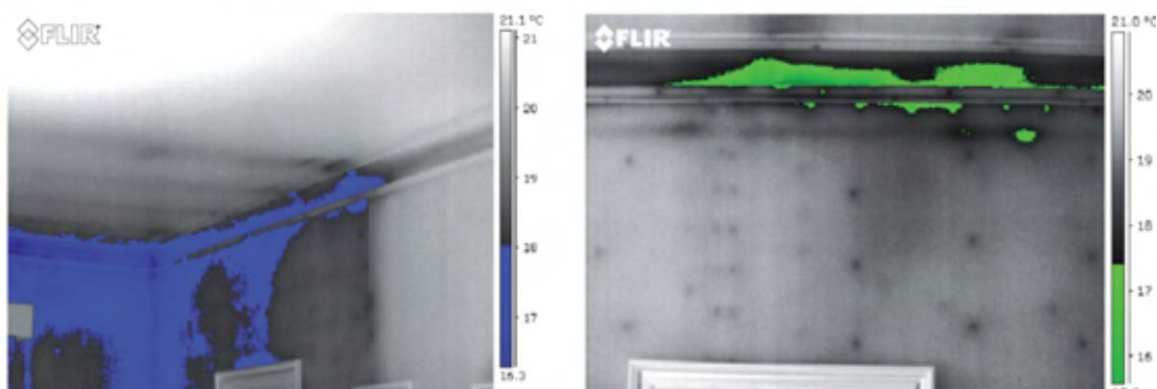


Рисунок 4.30 – На тепловизионных изображениях цветом выделены зоны, «представляющие риск образования конденсированной влаги», как это указано в рекламных материалах фирмы FLIR, откуда заимствованы данные иллюстрации

Содержательная информация при проведении бесконтактных обследований тепловых полей зданий и сооружений во многом зависит от методики проведения наблюдений. Особенность формирования изображения на экране ТВП связана с желанием их разработчиков представить оператору максимально подробную полутонную картину наблюдаемого сюжета. Из-за этого тепловизионное изображение, например, внутреннего стыка окна со стеной автоматически отображается на экране одинаково контрастно при перепаде температур в 1 К и при перепаде температур 10 К. При отсутствии практических навыков обследований такие изображения могут восприниматься малоопытным оператором как одинаково опасные дефекты. Именно поэтому измерения количественных значения абсолютных температур являются необходимым условием для принятия даже первичных решений при обследовании зданий и сооружений. Без анализа численных данных информация о наличии или отсутствии дефектов не является достоверной.

4.6 Применение тепловизионных приборов для контроля движения транспорта на железной дороге

Дистанционное обследование железнодорожных транспортных средств применялось с первых шагов развития тепловидения. Широко известны примеры автоматического тепловизионного наблюдения перегретых деталей подвижного состава, тормозных колодок неисправных электроизоляторов, дефектов теплоизоляции вагонов – рефрижераторов и т.п. В состав оснащения скоростных железных дорог автоматизированные комплексы тепловизионного контроля состояния ходовой части движущихся вагонов входят обязательной составной частью (например, железнодорожная трасса Москва–Санкт–Петербург). Кроме того, существуют автоматизированные оптико-электронные комплексы, с помощью которых создаётся электронный видеопаспорт конкретного железнодорожного состава и всех вагонов в нём, который сопровождает его передвижение от пункта формирования до пункта конечного

назначения. В видеопаспорте, помимо видеоизображений с номерами и надписями на внешней поверхности, фотографиями пломб на дверях и люках, содержатся тепловизионные изображения вагонов и цистерн.

Тепловидение выступает как один из способов дистанционного неразрушающего контроля, который, в отличие от большинства других способов, использует исключительно естественный теплообмен между вагонами и окружающей средой и не требует дополнительных воздействий на объект наблюдения типа подсветки, нагрева и т.д. [1]. Физические предпосылки возможности наблюдения за состоянием жидких и сыпучих грузов внутри цистерн и вагонов связаны с особенностями динамики теплового обмена достаточно инерционного в тепловом смысле груза внутри вагона с его внутренней поверхностью и сравнительно малоинерционной внешней поверхностью вагона, находящейся в постоянном тепловом обмене с окружающей средой. На внешней поверхности вагона образуется тепловой профиль, повторяющий конфигурацию груза внутри вагона. Этот тепловой профиль наблюдается снаружи вагона с помощью ТВП и несёт информацию о количестве, расположении и характере груза внутри вагона или цистерны.

На практике на поверхности вагонов и, особенно, цистерн наблюдается сложное тепловое поле, формирующееся как за счёт их собственного излучения, так и за счёт отражённого ИК излучения верхней и нижней полусфер. В разных участках теплового портрета эти составляющие могут иметь различную интенсивность, и поэтому в изображении присутствуют различающиеся по яркости участки, которые могут затруднить правильное выделение оператором теплового профиля груза. Примером может служить часто наблюдаемая горизонтальная линия перепада контраста почти по центру цистерны по всей её длине. Она обусловлена особенностями зеркально-диффузного отражения ИК излучения небосвода и земли от поверхности цилиндрической цистерны, как правило, покрытой слоем естественных загрязнений. Если ТВП перемещать в вертикальном направлении, то линия перепада контраста изменяет своё положение на тепловизионном изображении цистерны.

Такие ложные тепловые профили присутствуют в тепловом портрете тем чаще, чем выше чувствительность ТВП, и чтобы правильно интерпретировать результаты наблюдения, необходимы современные приёмы обработки изображений. Они используют физические особенности динамики формирования теплового профиля в зоне контакта груза с внутренней поверхностью стенки вагона или цистерны. В области, непосредственно прилегающей к границе раздела груз/воздух внутри вагона или цистерны, основной механизм теплового обмена в зоне контакта груза со стенкой – теплопроводность, а в зоне над грузом – конвекционный обмен и излучение. Снаружи для всей внешней поверхности теплообмен определяется, главным образом, конвекционными процессами и излучением. В процессе естественного теплообмена из-за теплопроводности стенок цистерн или вагонов в продольном направлении градиент температуры внешней (наблюдаемой) поверхности стенки в зоне границы груза выше, чем градиенты радиационной температуры в

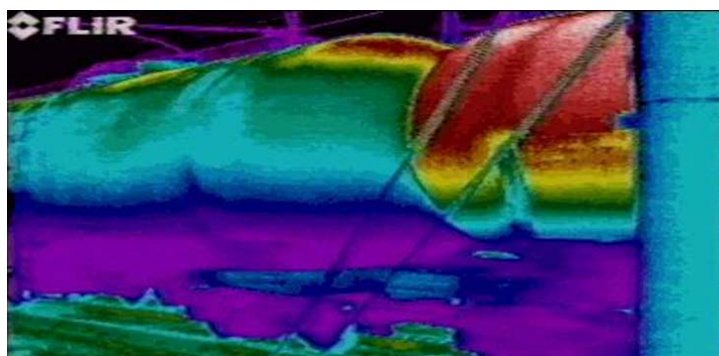
зонах, обусловленных фоновыми помехами. Кроме того, на тепловизионном изображении существуют зоны высокого градиента теплового контраста, который соответствует контурам самих вагонов и цистерн и конструктивным деталям на них (лестницы, защитные экраны и т.д.).

Обработка тепловизионного изображения на первом этапе состоит в выделении зон с максимальным градиентом теплового контраста. В результате такой обработки выявляется тепловой профиль груза и конструктивные элементы вагонов и цистерн. На следующем этапе привлекается изображение того же объекта, полученное в видимом диапазоне с помощью телевизионного канала (в ночное время возможна подсветка). Поскольку оно содержит изображение только внешних конструктивных элементов вагонов и цистерн, то совместная обработка этих двух изображений позволяет выделить тепловой профиль перевозимого груза.

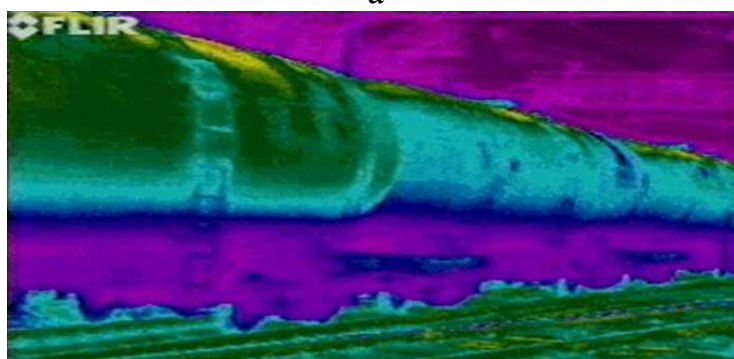
Измерение радиационных температур не является необходимой операцией, поскольку численное значение и знак теплового контраста между заполненной и пустой частями вагона или цистерны изменяются во времени и не несут содержательной информации, дополняющей уже полученные сведения. Существенно более полезным является обеспечение возможности наблюдать несколько одинаковых объектов и сравнивать их тепловые портреты. Это иллюстрируется на рис. 4.31 а, б, в, где видны цистерны, различающиеся по уровню заполнения.

Как правило, наблюдения производятся на небольших расстояниях, когда ослабление ИК излучения атмосферной трассой незначительно. Однако метеорологические условия определяют динамику градиента температуры в зоне границы груза, что обуславливает прямую зависимость эффективности применения ТВП от погодных условий.

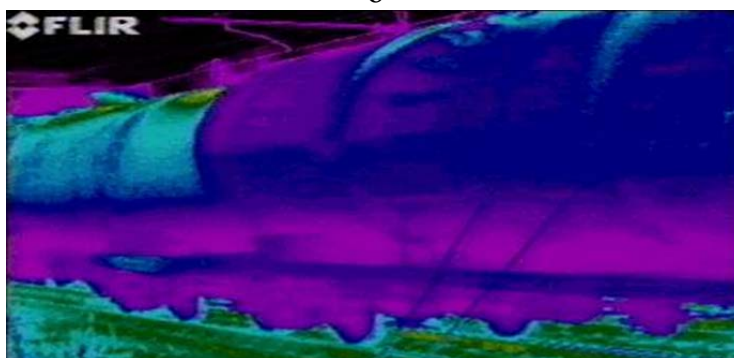
Два физических природных фактора определяют, в основном, динамику теплового поля вагонов и находящихся в них грузов. Во-первых, достаточно медленный процесс нагрева или остывания вагонов и грузов в них за счёт суточного хода солнечного излучения и связанного с ним нагрева или остывания воздуха. Во-вторых, локально неоднородный и быстро протекающий процесс конвекционного теплообмена, связанный с обдувом внешней поверхности вагона ветром или при движении составов. В самом первом приближении время установления равновесного режима теплообмена определяется, в основном, толщиной и теплопроводностью стенок вагона, и это время составляет не менее нескольких (до 10) часов [2]. В естественных условиях дополнительно к этому вагоны и цистерны находятся в состоянии конвекционного теплообмена за счёт обдува воздухом. Общим следствием обдува воздухом на цистерны и закрытые вагоны при их движении и при ветре является выравнивание тепловых контрастов, обусловленных всеми другими факторами, кроме внутреннего теплообмена [1]. Из-за этого в тепловом портрете внешней поверхности вагона или цистерны более чёткой становится тепловая граница, повторяющая границу прилегающего к ней жидкого или сыпучего груза (рис. 4.32).



а



б



в

Рисунок 4.31 – Тепловизионное изображение получено с помощью ТВП FLIR P680. Цистерны различаются по уровню заполнения

При увеличении скорости движения воздуха относительно стенок вагона на 40 км/час теплоотдача с их боковой поверхности увеличивается на 10–20%. Лобовая поверхности вагонов и цистерн (по отношению к направлению движения состава) также имеет аномалию (охлаждение), но она заметным образом проявляется лишь в пустой части цистерны или вагона. Заполненные цистерны имеют достаточно однородное внешнее тепловое поле по направлению длины цистерны, в то время как равномерное по высоте тепловое поле вагона свидетельствует от отсутствии в нём груза.

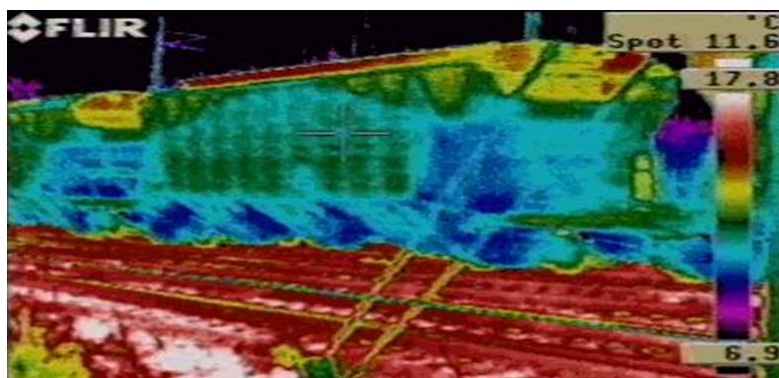


Рисунок 4.32 – Тепловизионное изображение получено с помощью ТВП FLIR Р640. Ракурс наблюдения около 45°. Тепловой профиль сыпучего груза свидетельствует о его относительно равномерном распределении по вагону

Вследствие одновременного действия нескольких факторов теплообмена тепловые профили грузов могут наблюдаться длительное время, несмотря на суточные изменения температуры. Вместе с тем при некоторых сочетаниях условий, особенно при дожде, контрасты уменьшаются («сглаживаются») и становятся меньше чувствительности ТВП. Используя данные по климатическим нормам регионов, оценка суммарного времени, в течение которого возможно использование ТВП для дистанционного контроля за наличием жидких и сыпучих грузов при их транспортировке, будет составлять не менее 87% от годового или сезонного периода.

С помощью современных ТВП завершённое решение имеют три группы задач, которые можно условно обозначить как технологические, фискальные и контроль безопасности движения.

Примером технологических задач может служить наблюдение за уровнем налива жидкостей в цистерны или степенью заполнения вагона сыпучими грузами, как это видно из рис. 4.31–4.34.

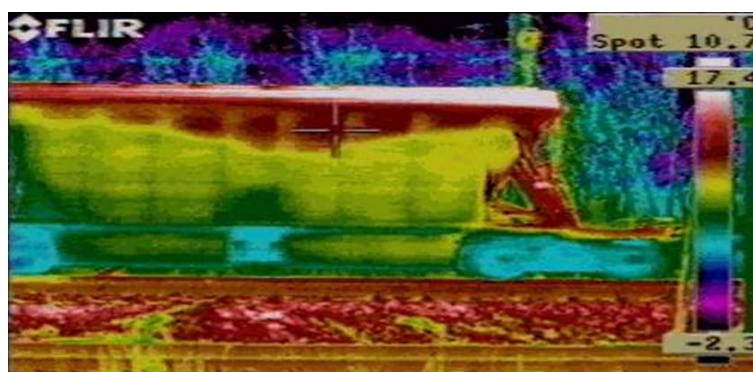


Рисунок 4.33 – Тепловизионное изображение бортовой проекции движущегося вагона. Тепловой профиль сыпучего груза свидетельствует о штатной загрузке через два отверстия, расположенных ближе к краям вагона

По тепловизионному изображению и без привлечения дополнительной информации оператор может принимать решения о прекращении, например, загрузки цистерны (рис. 4.34) или о мерах по более равномерному размещению груза по вагону (рис. 4.35).

Точность определения этого уровня остатков жидкости в цистернах должна составлять не более 1–3 см, поэтому для обнаружения избыточных остатков требуется поиск специального ракурса и расстояния, наиболее выгодных для дистанционного контроля теплового профиля вблизи дна цистерны. Применимость наиболее распространённых в настоящее время промышленных ТВП с форматом фотоприёмной матрицы 240×320 элементов достигается лишь при небольших дистанциях наблюдения, или же при использовании узкопольных длиннофокусных объективов. Технологические задачи можно отнести к наиболее простым, решаемым автономными ТВП. Они не требуют привлечения других технических средств и персонала высокой квалификации.

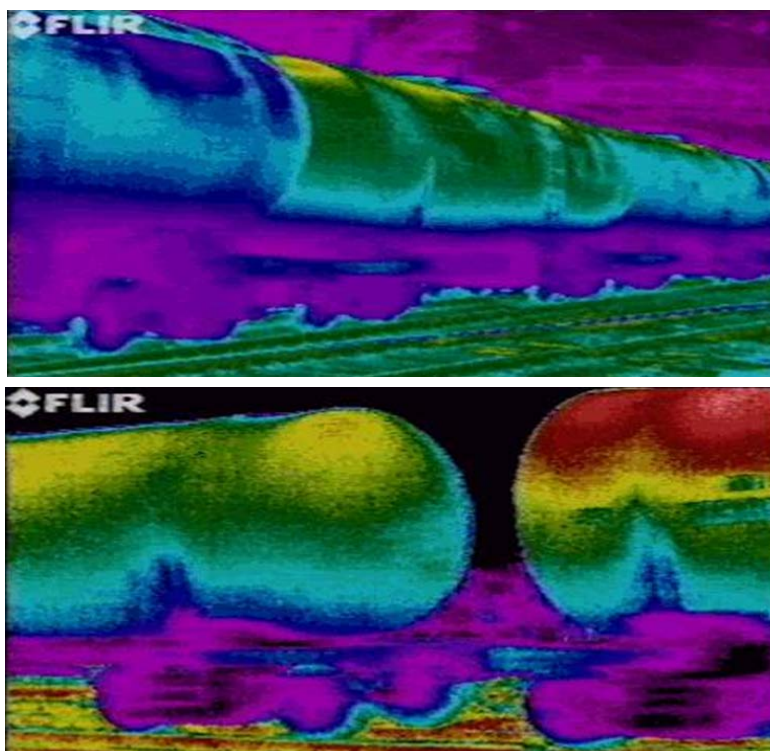


Рисунок 4.34 – Иллюстрация разного уровня заполнения движущихся цистерн. Получено при недемонстративном тепловизионном наблюдении с использованием ТВП FLIR P680

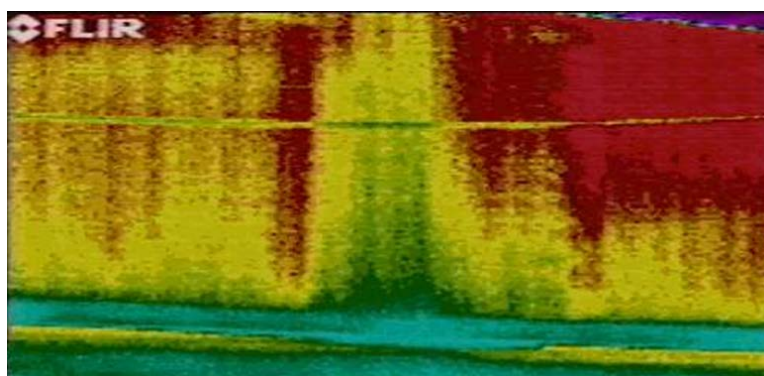


Рисунок 4.35 – Тепловизионное изображение бортовой проекции движущегося вагона свидетельствует о неравномерном размещении груза в вагоне. Получено с применением ТВП FLIR P680

Фискальные задачи связаны с недемонстративными методами контроля за соответствием декларированных и фактических объёмов перевозимых грузов. Характеристики современных ТВП обеспечивают достоверный контроль за сохранностью или фактом утраты грузов на всех этапах их перемещения от отправителя до получателя. На рис. 4.34 приведены примеры различия уровня заполнения цистерн, которые в наибольшей степени применимы к рассматриваемой задаче.

Тепловизионное и телевизионное изображения вагонов и цистерн являются самостоятельными сопроводительными документами каждого из них. Телевизионное изображение содержит полную информацию о внешнем виде, номерах и других отметках на бортах вагонов и цистерн, а тепловизионное – об их содержимом. Совмещение изображений, как в случае выделения тепловых профилей, не предусматривается, но обработка изображений заключается в сопоставлении последовательности отдельно тепловизионных и отдельно телевизионных кадров, полученных на разных этапах передвижения состава. Таким образом в случае необходимости обеспечивается возможность локализовать время и место утраты груза.

Применение тепловидения в обеспечении безопасности движения имеет много аспектов. В дополнение к известным способам обнаружения зон избыточного нагрева механического и электрического оборудования, ТВП дают уникальную возможность дистанционного обнаружения неравномерности распределения и места концентрации остатков сухих грузов, создающих неравномерность загрузки осей и ухудшающих устойчивость вагонов при движении. Тепловизионный метод является единственным реально осуществимым на практике методом дистанционного контроля остатков сухих грузов, налипших в угрожающих объёмах (например, цемента или минеральных удобрений).

Особенно следует подчеркнуть повышение безопасности операторов при решении всех этих задач, поскольку наблюдение производится дистанционным способом.

Следует также отметить, что применение ТВП для решения аналогичных задач при автомобильной логистике имеет общие физические предпосылки, однако конструктивные различия транспортных средств могут внести существенные коррективы в методику тепловизионного наблюдения и его эффективность.

4.7 Применение тепловизионных приборов для медицинских обследований

Одним из первых объектов наблюдения при зарождении тепловидения являлся человек, как правило, из числа создателей прибора. Эта традиция продолжается до настоящего времени, поскольку подавляющее большинство разработчиков МФПУ и ТВП в качестве иллюстрации своих достижений приводят тепловизионные изображения самих авторов. Как и большинство вновь созданных технических средств (рентгенокопия, ультразвуковая диагностика и т.п.), тепловидение после первых впечатляющих демонстраций

тепловых портретов людей породило множество проектов медицинского применения, как правило, не оправдавшихся. В 2000 году «Канадская Академия термографии» выпустила официальный релиз, в котором заключала, что «теповидение как средство первичной диагностики в медицине не оправдало возлагавшихся на него надежд». Несмотря на очень высокие технические параметры ТВП и опубликованный громадный объём экспериментальных исследований, практическая медицинская тепловизионная диагностика не может конкурировать с рентгеновскими, томографическими и ультразвуковыми методами диагностики. Вместе с тем сохраняется уверенность, что причиной тому является недостаточная разработанность области причинно-следственных связей между процессами в живом организме и их проявлениями на его поверхности в виде собственного ИК излучения. В качестве иллюстрации приводится тепловизионное изображение на рис. 4.36а–г.

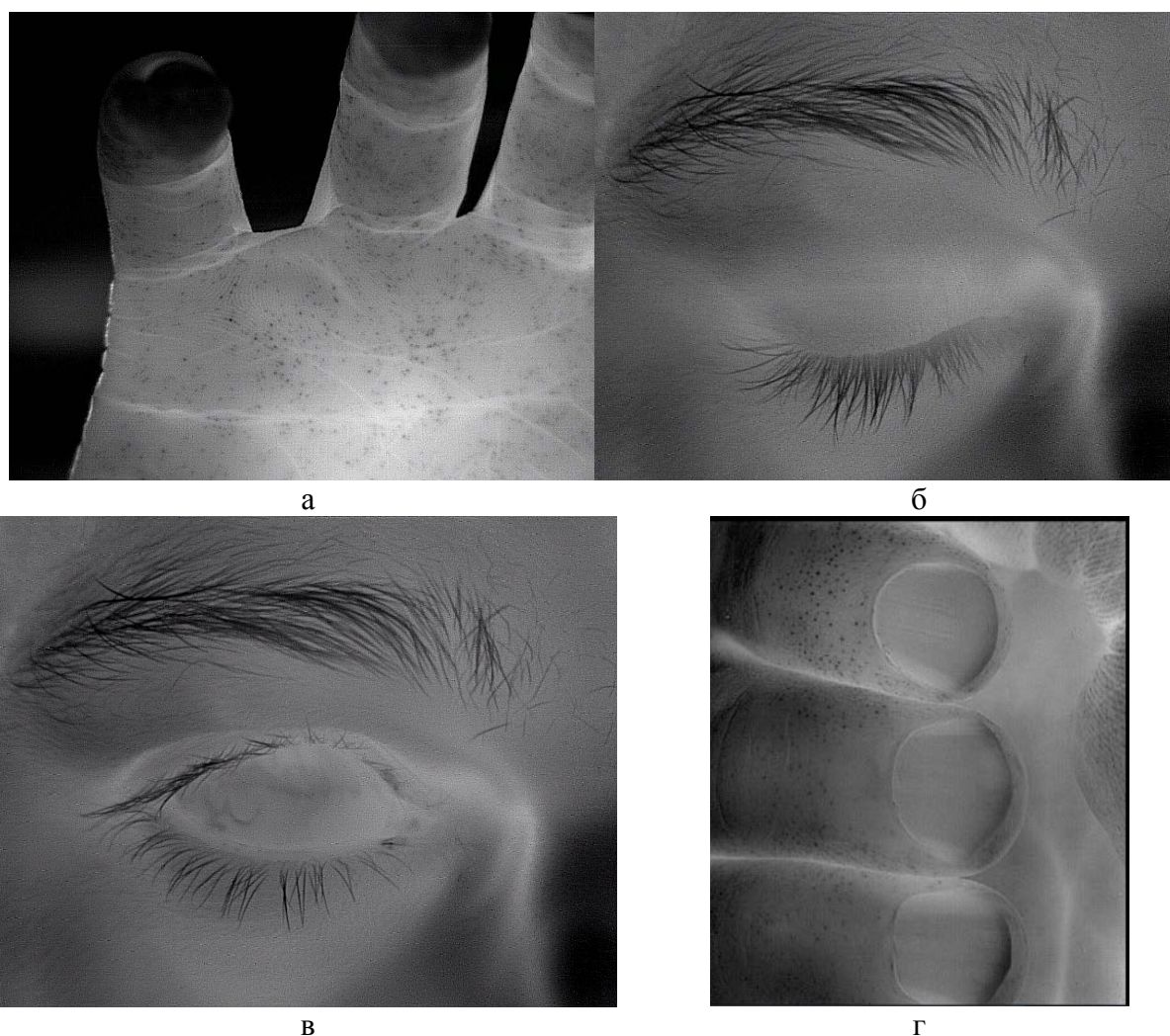


Рисунок 4.36 – Тепловизионное изображение получено ТВП специалистами АО «НПО «Орион» (г. Москва) с МФПУ MWIR диапазона. «а», «г» – поверхность руки с хорошо заметными порами; «б», «в» – закрытый и открытый глаз человека

Высококачественное ИК изображение позволяет различить отдельные поры на ладони и глазные кровеносные сосуды. Существует ряд исследований с применением ТВП диапазона SWIR (в области 2,5 мкм), которые

демонстрируют хорошую визуализацию кровеносных сосудов на глубине в несколько миллиметров под поверхностью кожи человека (рис. 4.37а, б) Параметры современных ТВП позволяют визуализировать тонкую структуру теплового поля поверхности тела биологических объектов и уверенно обнаруживать неоднородности весьма малых контрастов ИК излучения. Однако однозначная расшифровка полученных тепловых портретов, дающая новую существенную информацию дополнительно к уже полученной при первичной диагностике традиционными методами, наблюдается лишь в редчайших случаях.

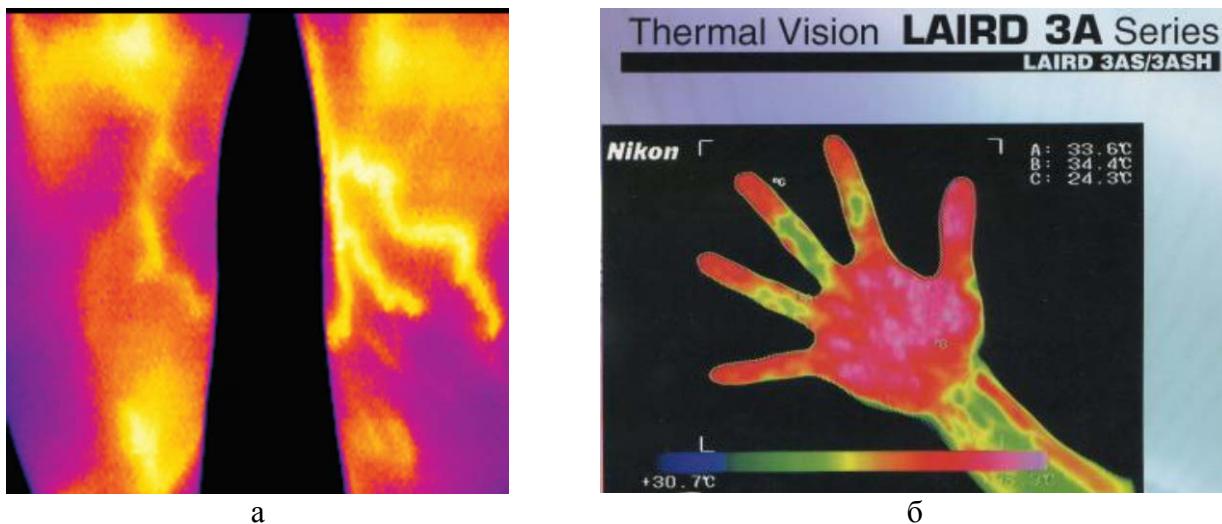


Рисунок 4.37 – Иллюстрации применения ТВП фирмы FLIR SC660 и ТВП фирмы Nikon для получения теплового портрета человеческого тела: «а» - тепловизионное изображение ног человека; «б» – тепловое поле руки человека. Материалы взяты из рекламных проспектов указанных фирм

Очевидно, что механизмы внутренних «обратных связей» процессов, протекающих внутри организма, не допускают их простого отображения в тепловом поле поверхности биологических объектов. Например, проведённые практические эксперименты показали, что при наблюдении человека, выпивающего стакан горячего чая, на поверхности его тела (по пояс) никаких тепловых аномалий не появляется. При употреблении им 0,5 кг мороженого тепловой портрет человека также не изменялся. Это говорит о том, что механизм тепловой стабилизации организма достаточно хорошо компенсирует внутренние тепловые воздействия в широком диапазоне их температур. Однако наличие на коже человека царапин, родинок, прыщей и других доброкачественных образований даёт на тепловизионном изображении такой же контрастный тепловой сигнал, что и наличие подкожных недоброкачественных образований (маммология). Большое количество «ложноположительных» сигналов («ложных тревог») послужило причиной отказа от использования тепловидения в массовом профилактическом осмотре. При этом в качестве вторичного диагностического инструмента тепловидение показывает хорошие результаты, позволяя визуализировать для врача области воспаления щитовидной железы, воспалительные процессы внутренних

органов и другие отклонения от нормы, когда пациент уже пришёл к нему с жалобой на неудовлетворительное самочувствие.

Наиболее убедительное современное применение ТВП в области медицины связано с ситуациями, когда пациент не может самостоятельно общаться с врачом, например, малолетние дети, люди в бессознательном состоянии и т.п. Области ожоговых поражений, переломы и другие травмы с помощью ТВП фиксируются быстро и надёжно. Следует отметить, что измерения температуры не несут никакой дополнительной смысловой информации по существу диагноза. К данному варианту применения ТВП примыкает их использование в ветеринарии.

Существуют публикации, демонстрирующие тепловизионные изображения семян по мере их прорастания. На них уверенно различаются самые первые стадии развития растения из семени.

Заключение

В силу ряда физических и технологических ограничений тепловизионные приборы до настоящего времени являются дорогими техническими устройствами. Даже при массовом производстве ТВП существенно превышают по стоимости телевизионные приборы аналогичного класса. Практическое применение ТВП выделяет лишь малый круг задач, где применение тепловидения оказывается безальтернативным и рентабельным, однако эти задачи крайне важны. Применение тепловидения оправдывает себя, в первую очередь, в военном деле. Поэтому наибольший научно-технический задел накоплен именно в этой области. Хотя степень сложности выявления содержательного смысла тепловизионного изображения невелика, велика цена ошибки решения двухальтернативной задачи: «свой – чужой», вырождающаяся в выбор решения «стрелять – не стрелять». Усложняет задачу целенаправленная маскировка целей, создание ложных противодействующих или выводящих из строя помех. Всё это определило достаточно специфический характер накопленных знаний относительно оптических полей антропогенных и природных объектов и фонов, на которых они наблюдаются при военном применении ТВП.

Все другие области применения тепловидения стали развиваться лишь после того, как его военное применение накопило достаточный опыт и приобрело все признаки общепринятого технического средства. Несомненно, наибольшая преэминентность наблюдается при решении задач, которые трудно разделить с военным применением, в частности, охраны рубежей и объектов.

По степени общественного согласия на высокую стоимость аппаратуры идёт медицинское применение тепловидения. Несмотря на многообещающие демонстрации тепловизионных изображений тепловых полей биологических объектов, практическая польза от тепловидения как средства первичной диагностики оказалась невысокой, а результаты обследований не могут составить конкуренцию другим техническим средствам, таким как рентгенография, ультразвуковые исследования, томография. Недостаточное понимание причинно-следственных связей между протекающими в биологическом объекте процессами и их отображением в тепловом поле на его поверхности лежит в основе малой эффективности современного применения тепловидения в медицине. При этом тепловизионные изображения содержат множество деталей, которые не обнаруживаются при визуальном, телевизионном или другом обследовании биологических объектов и, скорее всего, содержат ценную информацию, для выявления которой до настоящего времени не хватает комплексных теоретических и эмпирических знаний.

Ценность промышленного применения тепловидения основывается на возможности дистанционного измерения характеристик теплового поля наблюдаемых объектов. На основании количественных данных и выработанных методик расчётов выявляется содержательная информация такого рода, который невозможно получить другими техническими средствами. Тепловизионные изображения содержат информацию о динамике

энергетического состояния объекта, которая дополняет привычный для человека его образ в видимом свете. Вместе с тем задачи в электроэнергетике, строительстве, транспорте и др. относятся к многоальтернативным. Успешное их решение обеспечивается привлечением дополнительных сведений (например, о конструкции и режимах работы обследуемого объекта) и количественных данных от других технических средств (например, измерения вибраций).

Освоение накопленных сведений и приёмов их использования призвано обеспечить оператору квалификацию, достаточную для принятия решений разных степеней сложности в задачах военного применения, в медицине, при экологическом мониторинге и в промышленности.

Список контрольных вопросов

№	Вопрос
1	Какова радиационная температура небосвода в зените в диапазоне 8–12 мкм?
2	Какова радиационная температура небосвода непосредственно над линией горизонта?
3	Каковы особенности тепловизионного наблюдения объектов днём в диапазонах 3-5 мкм и 2 – 12 мкм?
4	Какие объекты обнаруживаются и распознаются лучше: неподвижные или движущиеся? Почему?
5	Каковы физические причины того, что чувствительность ИК приборов, применяемых для дистанционного зондирования тепловых полей, зависит от интенсивности ИК излучения того фона, на котором наблюдается объект?
6	Каков физический механизм формирования теплового профиля насыпного или жидкого груза на внешней поверхности вагона (цистерны)?
7	Перечислите области применения тепловидения, в которых измерения радиационной температуры необходимы, а в которых – нет. Почему?
8	В каких областях целесообразно применение псевдоцветового тепловизионного изображения, а в каких – чёрно-белого? Почему?
9	Какие приборы нужно применить, чтобы организовать обследование промышленного оборудования для дистанционного поиска утечек элегаза (SF_6)?
10	Какие приборы нужно использовать, чтобы исследовать динамику горения топлива дистанционным способом?
11	Какова физическая природа влияния сеточного ограждения перед высоковольтным электроэнергетическим оборудованием на результаты дистанционного измерения его температуры?

Литература

1. Белоусов Ю.И., Постников Е.С. Инфракрасная фотоника. Часть I. Особенности формирования и распространения ИК излучения. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. 82 с.
2. Белоусов Ю.И., Постников Е.С. Инфракрасная фотоника. Часть II. Особенности регистрации и анализа тепловых полей. Учебное пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. 101 с.
3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г., Введение в проектирование оптико-электронных приборов: системный подход, М., Университетская книга, 2016 г. 486 с.
4. Балоев В.А., Ильин Г.И., Овсянников В.А., Филиппов В.Л., Эффективность, помехозащищённость и помехоустойчивость видовых оптико-электронных систем, Казань, Издательство Казанского Гос. Тех. университета, 2015 г., 424 с.
5. Белоусов Ю.И., Иванов Д.В., Утенков А.Б., Инфракрасное излучение взволнованной морской поверхности, СПб, «Своё издательство», 2013 г., 396 с.
6. Мазин И.П., Хргиан А.Х., Облака и облачная атмосфера. Справочник. Ленинград, Гидрометеиздат, 1989 г., 648 с.
7. Малинников В.А., Попов С.М., Стеценко А. Ф. Спектрометрирование ландшафтов // Учебное пособие для студентов М.; Изд. МИИГАиК. УПП «Репрография», 2010 г., 120 с.
8. Филиппов В.Л., Иванов В.П., Яцык В.С., Атмосфера и моделирование ОЭС в динамике внешних условий, Казань, 2015 г., 632 с.
9. Иванов В.П., Курт В.И., Овсянников В.А. Филиппов В.Л., Моделирование и оценка современных тепловизионных приборов, Казань, «Отечество», 2006 г., 594 с.
10. Мирошников М.М. Теоретические основы оптико-электронных приборов, М., Машиностроение, 1983 г., с. 696.
11. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988 г., с.400
12. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М., Мир, 1978, с. 414
13. Тарасов В.В. Якушенков Ю.Г., Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приёмниками излучения М, Университетская книга, Логос, 2007 г. – 192 с.
14. Тарасов В.В. Торошина И.П., Якушенков Ю.Г., Инфракрасные системы 3-го поколения М, , Логос, 2011 г. – 240 с
15. Справочник по ИК технике. Под ред. У. Волфа, Г. Цисиса: М.: Мир, 1995, с.606.
16. Шарков Е. А. Обрушающиеся морские волны: структура, геометрия, электродинамика, М.: Научный мир, 2009, - 304 с.
17. Листратов А.В., Сидоров В.И., Корабельные оптико-локационные системы, М., ФГОУ «Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)», 2007 г., с. 470.с.

18. "Объём и нормы испытаний электрооборудования" РД 34.45-51.300-97;
19. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ" РД 153-34.0-20.363-99.
20. ГОСТ 26629-85 "Метод тепловизионного контроля качества. Теплоизоляция ограждающих конструкций"
21. ГОСТ 25380-82 "Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающую конструкцию "
22. ГОСТ 26254-84 "Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций "
23. РД-13-04-2006 «Методические рекомендации о порядке проведения теплового контроля технических устройств и сооружений, применяемых и эксплуатируемых на опасных производственных объектах»

Белоусов Юрий Иванович
Постников Евгений Сергеевич

Инфракрасная фотоника
Часть III

**Особенности дистанционной регистрации и анализа
тепловых полей природных образований и антропогенных
объектов**

Учебное пособие

В авторской редакции
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО
Зав. РИО
Подписано к печати
Заказ №
Тираж
Отпечатано на ризографе

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел
Университета ИТМО
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49