

Термография атмосферных фантомов. Ч. 2. Эксперимент

В. П. ХОДУНКОВ, А. И. ПОХОДУН, Г. Н. ДУЛЬНЕВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева,
С.-Петербург, Россия, e-mail: walkerearth@mail.ru

Приведены результаты измерений и анализ неизвестных ранее фантомных явлений аномальной анизотропии спектральной энергетической яркости в локальном слое атмосферы, обнаруженных при приборной регистрации в длинноволновом инфракрасном диапазоне. Рассмотрены авторская версия причин возникновения указанных фантомов и их практическая значимость.

Ключевые слова: энергетическая яркость, инфракрасное излучение, анизотропия, фантом, резонансное рассеяние, приборная регистрация.

The measurement results and the analysis of previously unknown phantom events of anomalous anisotropy of spectral energy brightness in the local layer of atmosphere revealed at instrumental registration in longwave IR range — are presented. The author's version of these phantoms origin and their practical significance are considered.

Key words: energy brightness, IR radiation, anisotropy, phantom, resonance scattering, instrumental registration.

В [1] рассмотрено новое явление в атмосфере, наблюдающееся при выполнении тепловизионных измерений. Внешне явление выражается в следующем: на снимках, полученных в инфракрасном (ИК) диапазоне длин волн 8—14 мкм, отчетливо присутствует некое яркостное изображение, нависающее над морским техническим объектом и имеющее довольно причудливую форму. Обнаруженное явление авторы назвали атмосферным фантомом [2]. Единственное похожее по своему конечному результату явление вызывает «эффект Нарцисса». Подробный анализ данного эффекта выполнен в [3, 4]. Его суть состоит в следующем. При большой разности между излучением холодной фокальной плоскости приемника и его более теплым окружением на экране регистрирующего устройства могут наблюдаться как истинное, так и мнимое (в виде темного пятна) изображения исследуемого объекта. Форма темного пятна, обусловленного «эффектом Нарцисса», зависит от качества фокусировки и вида охлажденной поверхности оптической системы. В практических случаях этот эффект может возникать вследствие отражения от входных окон, деталей корпуса приемника излучения, элементов сканирующей системы и от поверхностей линз, расположенных в различных частях системы. Для случая простой линзы в [3] приведено следующее расчетное соотношение полной интегральной разности $\Delta P'_{o-ф}$ потока излучения, обусловленного «эффектом Нарцисса» с истинной полной интегральной разностью $\Delta P_{o-ф}$ потока излучения исследуемой теплой поверхности по отношению к фоновому излучению:

$$\left(\Delta P'_{o-ф}/\Delta P_{o-ф}\right)_p = r(ab/R^2)/(\Delta T_{o-ф}\alpha\beta\tau_\lambda) \times \\ \times \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left[\frac{c_1}{\lambda^5(e^{c_2/(\lambda T_o)} - 1)} - \frac{c_1}{\lambda^5(e^{c_2/(\lambda T_x)} - 1)} \right] d\lambda / \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial W_{o,\lambda}(T_o)}{\partial T} d\lambda, \quad (1)$$

где r — коэффициент отражения тыльной поверхности линзы объектива приемника; a , b — линейные размеры чувствительной поверхности приемника, находящейся в фокальной плоскости; R — радиус кривизны внутренней поверхности линзы, для простой линзы $R = f$; f — фокусное расстояние внутренней поверхности линзы; α , β — угловые размеры объекта, для простой линзы $\alpha\beta = ab/R^2$; τ_λ — коэффициент пропускания линзы (оптической системы); $\lambda_1 = 8$ мкм, $\lambda_2 = 14$ мкм; c_1 , c_2 — постоянные в законе Планка; λ — длина волны; $W_{o,\lambda}$, $\Delta T_{o-ф} = (T_o - T_\phi)$ — спектральная поверхностная плотность потока излучения и истинный температурный контраст между исследуемым объектом-фоном, соответственно; T_ϕ , T_x , T_o — температуры фона (среды, окружающей объект), фокальной плоскости линзы (холодной поверхности) и поверхности исследуемого объекта (теплой поверхности).

Из анализа соотношения (1) следует, что при малых разностях температур T_o , T_x значение интеграла в числителе близко к нулю и, следовательно, влияние «эффекта Нарцисса» несущественно. В то же время при значительном разнице между T_o , T_x данным эффектом пренебрегать нельзя. Например в [3] выполнен расчет для $T_o = 300$ К и $T_x = 77$ К по соотношению

$$\left(\Delta P'_{o-ф}/\Delta P_{o-ф}\right)_p = 66r/\Delta T_{o-ф}. \quad (2)$$

При минимальных значениях $r = 0,01$ (с учетом просветления поверхности линзы) и $\Delta T_{o-ф} = 0,01$ К в [3] было установлено, что блик от холодной поверхности линзы должен превышать пороговый полезный сигнал в 66 раз, что недопустимо. Здесь следует заметить, что приведенная выше оценка соответствует наихудшему случаю, когда центр кривизны поверхности линзы расположен в фокальной плоскости. На практике поверхности линз обычно таковы, что обратное отражение расфокусировано и это приводит к уменьшению «эффекта Нарцисса».

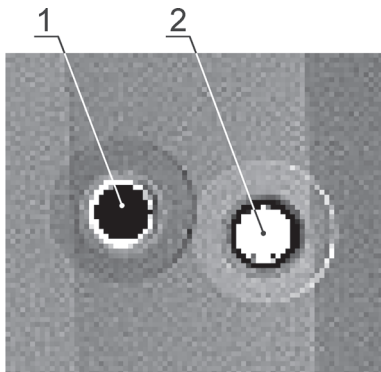


Рис. 1. Тепловой портрет излучателя в спектральном диапазоне 8—14 мкм: 1 — мнимое изображение при $T = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 — истинное при $T = 463\text{ }^{\circ}\text{C}$

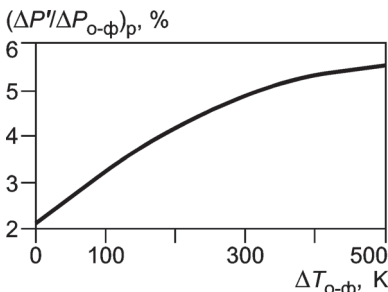


Рис. 2. Расчетная зависимость отношения плотностей мнимого и истинного контрастных радиационных потоков от фоновое температурного контраста объекта

больших температурных контрастах между исследуемым объектом и оптической регистрирующей системой, а именно, при $\Delta T_{o-x} = (T_o - T_x) \geq 400\text{ K}$ (для неохлаждаемой матрицы $\Delta T_{o-x} = \Delta T_{o-ф}$), что наглядно иллюстрирует полученный тепловой портрет (рис. 1).

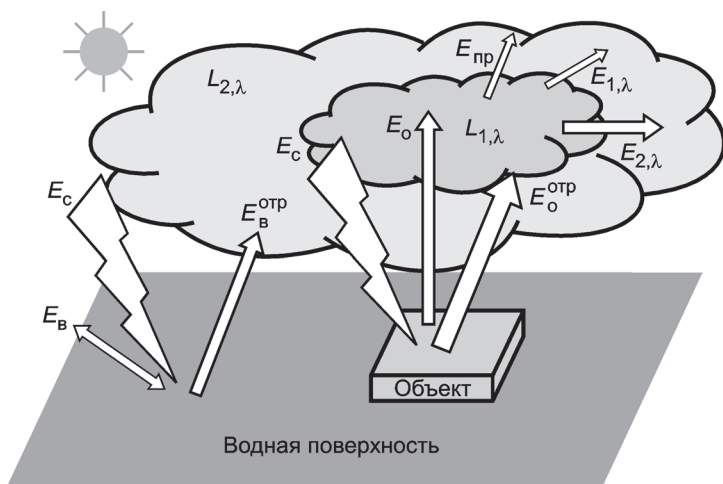


Рис. 3. Схематичное представление баланса радиационных потоков при теплообмене излучением в системе атмосфера—объект—водная поверхность

Из изложенного следует, что этот эффект должен наблюдаться лишь при значительных разностях $T_o - T_x$ между исследуемым объектом и элементами оптической системы приемника излучения. Для дополнительной проверки данного утверждения был выполнен лабораторный эксперимент с привлечением следующей аппаратуры: тепловизора IR 913+ с микроболометрической неохлаждаемой матрицей «FRA» размером 320×240 пикселей ИК-диапазона 8—14 мкм, ПЭВМ с программным обеспечением «Guide IR» и модели абсолютно черного тела М-310. В ходе эксперимента ставилась задача зарегистрировать «эффект Нарцисса» на тепловом портрете излучающей полости.

Выполним теоретическую оценку экспериментальных данных. Из рис. 1. следует, что при температуре излучающей полости $T_o \approx 463\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\Delta T_{o-ф} = \Delta T_{o-x} \approx 443\text{ K}$, $T_{ф} = T_x = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) температура мнимого холодного изображения (1, рис. 1) составляет $T'_o \approx -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ему соответствует перепад температур по отношению к фону $\Delta T'_{o-ф} \approx 20 - (-3) = 23\text{ K}$. Воспользуемся выражением (2), теоретически рассчитаем зависимость значений соотношения $\Delta T'_{o-ф} / \Delta T_{o-ф}$ от $\Delta T_{o-ф}$, т. е. $(\Delta T'_{o-ф} / \Delta T_{o-ф})_p \approx (\Delta P'_{o-ф} / \Delta P_{o-ф})_p = f(\Delta T_{o-ф})$, приняв при этом $r = 0,01$; $\tau_n \approx 1$. Результаты расчетов представлены на рис. 2, откуда следует, что для наблюдаемого в эксперименте значения температурного контраста объекта $\Delta T_{o-ф} = \Delta T_{ox} \approx 443\text{ K}$ справедливо соотношение $(\Delta T'_{o-ф} / \Delta T_{o-ф})_p \approx (\Delta P'_{o-ф} / \Delta P_{o-ф})_p \approx 0,055$, а искомая разность температур $(\Delta T'_{o-ф})_p = 24,4\text{ K}$ практически совпадает с экспериментально измеренным значением $(\Delta T'_{o-ф})_э = 23\text{ K}$. Из рис. 2 также следует: при малых температурных контрастах объекта и фона $\Delta T_{o-ф} \approx 1\text{ K}$ проявление «эффекта Нарцисса» должно приводить к возникновению холодной зоны с $(\Delta T'_{o-ф})_p \approx 0,02\text{ K}$, что ниже чувствительности современных тепловизионных приборов, поэтому данная зона будет полностью перекрываться фоновыми атмосферными помехами. Отметим, что для общего случая вогнутой поверхности одиночной линзы приемника $R > f$ (обычно $R \approx 1,7f$) значения $(\Delta T'_{o-ф})_p$, получаемые из (2), будут еще меньше.

Таким образом, можно утверждать, что применительно к слабоконтрастным объектам влияние «эффекта Нарцисса» чрезвычайно мало, поэтому вопрос о его регистрации современной аппаратурой для условий натурного эксперимента представляется весьма сложной проблемой. Следовательно, рассмотренный эффект не может быть причиной появления аномальных зон энергетической яркости на тепловом изображении морских объектов. В дополнение обратим внимание на тепловые изображения, получаемые для сильно удаленных от наблюдателя объектов, которые находятся вне зоны видимости и не являются непосредственными источниками излучения, регистрируемыми приемной частью тепловизионного устройства.

Попытаемся определить условия существования рассмотренного выше явления, для этого воспользуемся рис. 3. Условно разделим атмосферу (фон), окружающую объект, на две виртуальные области: внутреннюю, в которой происходит поглощение всех отраженных от поверхности объекта квантов энергии, и обволакивающую ее внешнюю область, в которой поглощаются кванты энергии, отраженные от водной поверхности. Каждая область характеризуется своим энергетическим состоянием и имеет свою среднюю температуру: T_1 для внутренней области и T_2 — для внешней. Найдем выражение для расчета разности температур

$\Delta T_{\phi} = T_2 - T_1$. Для этого аналогично [5] определим разницу плотностей потоков излучения из данных областей:

$$(L_{1,\lambda} - L_{2,\lambda}) \pi \approx 0,227(T_1/100)^3 \Delta T_{\phi}, \quad (3)$$

где $L_{1,\lambda}$, $L_{2,\lambda}$ — энергетические яркости внешней и внутренней областей атмосферы, соответственно (здесь коэффициент излучения атмосферы принят равным единице).

Энергетические облученности областей составляют:

для внутренней области $E_{1,\lambda} = E_c + E_o^{\text{отр}} + E_o$ при $\lambda = 8 \dots 14$ мкм, где E_c , $E_o^{\text{отр}}$, E_o — энергетические облученности внутренней области из-за прямого и отраженного от объекта солнечного излучения, собственного излучения объекта, соответственно;

для внешней области $E_{2,\lambda} = E_c + E_b + E_b^{\text{отр}}$ при $\lambda \leq 4$ мкм,

где $E_b^{\text{отр}}$, E_b — энергетические облученности внешней области из-за отраженного и собственного излучений водной поверхности (при этом энергетической облученностью от внутренней области $E_{\text{пр}}$ пренебрегаем).

Разность облученностей указанных областей

$$E_{1,\lambda} - E_{2,\lambda} = E_o + E_o^{\text{отр}} - (E_b + E_b^{\text{отр}}). \quad (4)$$

Пренебрежем собственным излучением водной поверхности (это справедливо для случаев, когда температура воды ниже температуры атмосферы). По аналогии с (3) преобразуем (4) к виду

$$E_{1,\lambda} - E_{2,\lambda} = 0,227\epsilon_o(T_1/100)^3(T_o - T_1) + (\epsilon_b - \epsilon_o)E_c, \quad (5)$$

где ϵ_o , ϵ_b — спектральные коэффициенты теплового излучения объекта и водной поверхности, соответственно (примем $\epsilon_b = 0,95$).

Приравняем (5) и (3), после преобразований получим

$$\Delta T_{\phi} = T_2 - T_1 = \frac{4,4(0,95 - \epsilon_o)E_c}{(T_1/100)^3} + \epsilon_o(T_o - T_1). \quad (6)$$

Очевидно, что выполнение условия $\Delta T_{\phi} = 0$ предполагает полное отсутствие анализируемого явления. Рассмотрим возможные варианты.

1. Излучательная способность поверхности объекта меньше излучательной способности водной поверхности, $\epsilon_o < \epsilon_b \approx 0,95$. В этом случае всегда $\Delta T_{\phi} > 0$ и, следовательно, будет наблюдаться градиент энергетической яркости в слое атмосферы, прилегающем к объекту. Полное отсутствие эффекта достижимо, когда одновременно отсутствуют внешняя (солнечная) засветка и температурный контраст $\Delta T_{o-\phi}$ объекта с фоном.

2. Излучательная способность поверхности объекта превышает излучательную способность водной поверхности:

$\epsilon_o^3 \geq \epsilon_b \approx 0,95$, тогда при отсутствии температурного контраста объекта с фоном температурный перепад в атмосферных областях $\Delta T_{\phi} = T_2 - T_1$ будет иметь отрицательный знак. Это означает, что средняя температура внутренней области

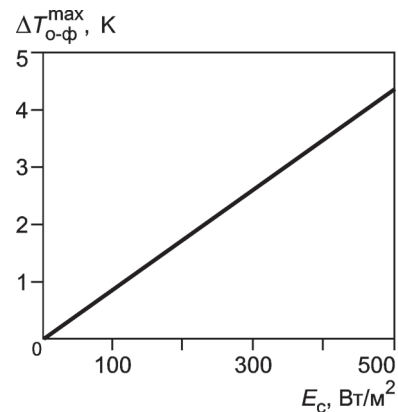


Рис. 4. Зависимость максимально допустимого перепада температуры между объектом и фоном от уровня падающей солнечной радиации

атмосферы выше температуры ее внешней области и полностью определяется интенсивностью солнечной радиации;

при наличии некоторого положительного температурного контраста объекта с фоном и уровня солнечной радиации может наступить полное исчезновение рассматриваемого фантомного явления, что наиболее вероятно при малых температурных контрастах объект—фон (порядка 1 К).

Таким образом, для $\epsilon_o < 0,95$ указанное явление практически всегда будет наблюдаться в атмосфере как в дневное, так и в ночное время, поскольку почти все морские объекты имеют температуру пусть незначительно, но превышающую температуру атмосферного фона. При солнечной радиации данное явление еще более выражено и будет устойчиво регистрироваться современными тепловизионными средствами. Применительно к морским техническим объектам таким, как корабли, суда и другие, лакокрасочные покрытия которых обладают коэффициентом излучения $\epsilon_o \approx 0,7 \dots 0,8$ [6, 7], данное явление будет присутствовать всегда. Из (6) следует, что для обеспечения минимальной заметности морских объектов необходимо, чтобы $\epsilon_o \approx 1,0$. При этом также появляется возможность иметь некоторый «запас» по температурному контрасту между объектом и атмосферным фоном, для которого явление еще практически отсутствует. На рис. 4 представлена зависимость $\Delta T_{o-\phi}$ от E_c , рассчитанная по (6) для $\epsilon_o = 1,00$; $T_o = 293$ К. Из рис. 4 следует, что, например, при термографировании объекта, имеющего $\epsilon_o = 0,8$ и $\Delta T_{o-\phi} = 1$ К, даже при полном отсутствии солнечной радиации проявляется затемненная область с $\Delta T_{\phi} = 0,8$ К относительно основной фоновой температуры атмосферы, следовательно, наблюдаемая разница температур $\Delta T'_{o-\phi} = T_o - T'_\phi = \Delta T_{o-\phi} + \Delta T_{\phi}$ будет выше, поэтому объект более заметен на ИК-снимке. Таким образом, формула (6) фактически определяет требования к коэффициенту теплового излучения поверхности морского технического объекта по параметру его заметности в ИК-диапазоне.

Выводы. Проведенный анализ показывает, что в диапазоне длин волн 8—14 мкм обнаруженное явление искусственно увеличивает контраст морских объектов. Для диапа-

зона длин волн 3—5 мкм следует ожидать уменьшения влияния данного эффекта и соответствующей ему наблюдаемой разницы температур $\Delta T'_{\text{с-ф}}$. Как показывают натурные исследования, размеры аномальной области намного (в 5—10 и более раз) превышают размеры самого морского объекта. Теоретически оценить размеры указанной зоны представляется довольно сложной, но выполнимой задачей.

Практическая значимость указанного явления заключается в возможности обнаружения и поиска морских объектов на больших (по сравнению с традиционными ИК-методами обнаружения) расстояниях по их мнимому тепловому изображению в атмосфере. Безусловно, эффект от данного явления необходимо учитывать при радиометрических измерениях спектрального коэффициента пропускания атмосферы. В этом случае придется несколько изменить методику выполнения измерений, а возможно, и состав регистрирующей аппаратуры.

Схожесть рассмотренного явления с известными для видимого спектра свидетельствует о целесообразности введения единого критерия заметности по электромагнитным полям, по крайней мере, в диапазоне 0,38—14 мкм (оптико-локационное поле и ИК-поле) для большей унификации методик выполнения измерений. В этом случае полезным направлением для решения поставленной задачи может стать использование теории калибровочных полей [8], введение в рассмотрение известного понятия энтропии и относительно нового — негэнтропии [9—11].

Таким образом, несмотря на то, что в последние годы созданы физико-математические модели для различных морских технических объектов, описывающие процессы пространственно-временного формирования их тепловых полей, новое явление потребует внести соответствующие коррективы в модели и методики выполнения измерений параметров электромагнитных полей ИК-диапазона. В данной статье приведены лишь основные выводы и заключения, более подробное описание обнаруженного явления и практические результаты приведены в [12].

Авторы статьи готовы обсудить обозначенную тему и надеются, что результаты представленного исследования будут весьма полезны специалистам в области изучения тепловых полей морских технических объектов и оптики атмосферы.

Литература

1. Ходунков В. П., Походун А. И., **Дульнев Г. Н.** Термография атмосферных фантомов. Ч. 1. Теоретические аспекты // Измерительная техника. 2014. № 2. С. 41—44.
2. Ходунков В. П. Явление анизотропии спектральной энергетической яркости в локальном слое атмосферы, охватывающем протяженный морской объект // Высокие технологии, исследования, образование, экономика: Сб. статей 14-й междунар. науч.-практ. конф. СПб.: Изд-во СПб. политехн. ун-та, 2012. Т. 2. С. 173—175.
3. Ллойд Дж. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.
4. Горный В. И., Шилин Б. В., Ясинский Г. И. Тепловая аэрокосмическая съемка. М.: Недра, 1993.
5. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения. М.-Л.: Машгиз, 1957.
6. Температурные измерения: Справ. пособие / Под ред. А. Н. Гордова. Киев: Наукова Думка, 1984.
7. Дерибере М. Практические применения инфракрасных лучей / Пер. с фр., под ред. И. Б. Левитина. М.: Госэнергоиздат, 1959.
8. Утияма Р. К чему пришла физика (от теории относительности к теории калибровочных полей) / Пер. с яп. М.: Знание, 1986.
9. Дульнев Г. Н., Крашенюк А. И. От синергетики к информационной медицине. СПб.: Ин-т биосенсорной психологии, 2010.
10. Шипов Г. И. Математические основы калибровочной модели физического вакуума. М., 1987. Деп. в ВИНТИ 01.01.87, № 5326-B87.
11. Бобров А. В. Полевые информационные взаимодействия // Сб. трудов Орлов. гос. техн. ун-та. Орел, 2003. С. 211—221.
12. Ходунков В. П. Термометрия и инфракрасная радиометрия многофазных и многообъектных систем. СПб.: Политехника, 2013.

Дата принятия 29.11.2013 г.