

# ФИЗИЧЕСКАЯ ОПТИКА

---

УДК 621.397.3: 536.3

## КОРРЕЛЯЦИЯ ЯРКОСТИ В ИК И ВИДИМОМ ДИАПАЗОНАХ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ТЕХНОГЕННЫХ И ПРИРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ, НАХОДЯЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА

© 2008 г. **Н. И. Павлов**, доктор техн. наук; **Е. Э. Эльц**

Научно-исследовательский институт комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем,  
г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.

E-mail: contact@niiki.ru

Представлены приближенные аналитические выражения, которые позволяют прогнозировать поведение корреляционных характеристик (коэффициентов корреляции и линейной регрессии) яркости в ИК и видимом диапазонах длин волн в зависимости от оптико-физических параметров наблюдаемых объектов, условий теплообмена, спектральных интервалов аппаратуры съемки. Результаты модельных расчетов показывают, что корреляционная связь яркости в указанных диапазонах у техногенных объемных объектов и плоских фрагментов ландшафта имеет принципиально разный характер.

Коды OCIS: 280.0280.

*Поступила в редакцию 15.05.2008.*

Одновременная регистрация изображений в инфракрасном (ИК) и видимом диапазонах спектра широко используется при решении задач дистанционного зондирования земной поверхности (см., например, [1–3]). В работах [3–7] для описания совместной статистики полей яркости в ИК и видимом диапазонах было предложено использовать известную характеристику – коэффициент корреляции, а также однозначно связанные с ним коэффициенты линейной регрессии. Были установлены аналитические соотношения между указанными корреляционными характеристиками с одной стороны и параметрами объектов и условий наблюдения с другой стороны. При выводе аналитических соотношений наблюдаемая поверхность представлялась состоящей из однородных пластин-фасеток конечной толщины, оптико-физические параметры которых могли случайным образом изменяться при переходе от фасетки к фасетке в соответствии с изменениями состава, структуры и геометрии поверхности. Вывод соотношений связи осуществлялся в два этапа. На первом этапе с использованием найденного приближенного решения стационарного уравнения теплообмена или стационарного уравнения теплопроводности устанавливалась зависимость температуры пластины-фасетки от ее оптико-физических параметров и условий теплообмена. При этом нижняя грань пластины-фасетки при рас-

смотрении фрагментов земного ландшафта предполагалась расположенной на изотермической подложке, в других случаях на нижней грани учитывался конвективный теплообмен. Теплообменом между фасетками пренебрегалось. На основе зависимости, установленной для температуры, определялась функциональная взаимосвязь интегральной яркости пластины-фасетки в ИК диапазоне с соответствующей яркостью в видимом диапазоне. На втором этапе устанавливалась корреляционная зависимость между двумя полями яркости для протяженной поверхности, состоящей из статистически значимой совокупности разнородных пластин-фасеток. Вывод аналитических соотношений для корреляционных характеристик яркости осуществлялся с учетом заданного описания случайного характера изменения оптико-физических параметров поверхности при переходе от фасетки к фасетке.

В настоящей статье установленные ранее аналитические соотношения для корреляционных характеристик обобщаются для техногенных объектов с внутренними источниками тепла мощностью, сравнимой с передаваемой при естественном теплообмене, и искусственной вентиляцией. При этом для установления функциональной зависимости температуры наблюдаемой верхней грани пластин-фасеток от их оптико-физических параметров и условий теплообмена используется приближенное решение

стационарного уравнения теплопроводности с учетом теплового баланса объекта в целом с внешней средой. Приводятся результаты модельных расчетов дневного изменения значений корреляционных характеристик яркости в ИК и видимом спектральных диапазонах для фрагментов ландшафта с плоским рельефом и техногенных объемных объектов.

### Зависимость температуры замещающих пластин-фасеток от оптико-физических параметров и условий теплообмена

Представим оболочку техногенного объекта с помощью  $n$  замещающих пластин-фасеток. Температуру  $T_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) внешней поверхности замещающей  $i$ -ой пластины толщиной  $l_i$  определим из стационарного уравнения теплопроводности

$$\frac{d^2 T_i(z)}{dz^2} = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (1)$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} \Lambda_i \frac{dT_i}{dz} \Big|_{z=0} &= \alpha_i (T_i - T_a) + \varepsilon_i \sigma T_i^4 - (1 - \rho_i)(E_n \cos \nu_i + E_d) - \varepsilon_i E_{ir} \\ \Lambda_i \frac{dT_i}{dz} \Big|_{z=l_i} &= \alpha_{\text{вн},i} (T_{\text{вн}} - T_i) \end{aligned} \quad (2)$$

В формуле (2) использованы обозначения:  $\rho_i$  – коэффициент отражения солнечной радиации,  $E_n$  – энергетическая облученность пластины, ориентированной перпендикулярно к падающим солнечным лучам, за счет прямой радиации,  $\nu_i$  – угол падения прямой солнечной радиации, измеряемый от нормали к пластине,  $E_d$  – вклад в общую облученность рассеянной составляющей солнечной радиации,  $\varepsilon_i$  – коэффициент теплового излучения,  $E_{ir}$  – энергетическая облученность за счет падающей ИК радиации,  $\sigma$  – постоянная Стефана–Больцмана,  $\Lambda_i$  – коэффициент теплопроводности,  $\alpha_i$  и  $\alpha_{\text{вн},i}$  – коэффи-

циент конвективного теплообмена на внешней и внутренней грани пластины соответственно,  $T_a$  – температура окружающего воздуха,  $T_{\text{вн}}$  – температура воздуха внутри объекта. Для определения неизвестной температуры воздуха  $T_{\text{вн}}$  внутри объекта воспользуемся уравнением теплового баланса [8]

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [\alpha_i (T_i - T_a) + \varepsilon_i \sigma T_i^4 - \varepsilon_i E_{ir} - \\ - (1 - \rho_i)(E_n \cos \nu_i + E_d)] S_i - P_{\text{вн.ист}} + \\ + c_{\text{в}} (T_{\text{вн}} - T_a) N = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $P_{\text{вн.ист}}$  – энергия внутренних источников тепла,  $c_{\text{в}}$  – объемная теплоемкость воздуха (при постоянном давлении),  $N$  – объем воздуха, выводимого из объекта в единицу времени при наличии искусственной вентиляции,  $S_i$  – площадь  $i$ -ой пластины-фасетки.

Найдем приближенное аналитическое решение уравнений (1–3), воспользовавшись следующим представлением для абсолютной текущей температуры:  $T_i = T_a + \theta_i = T_a(1 + \theta_i/T_a)$ . Здесь  $\theta_i$  – искомая температура, отсчитываемая от некоторой постоянной температуры, в качестве которой будем брать температуру окружающего воздуха. Предполагая малость величины  $\theta_i/T_a$  и переписав, пренебрегая членами второго порядка малости, систему уравнений (1–3) для нахождения неизвестной величины  $\theta_i$ , получим следующее выражение:

$$\theta_i \Big|_{z=0} = \frac{(1 - \rho_i)(E_n \cos \nu_i + E_d) + \varepsilon_i E_{ir} - W_{a,i} + X_i}{A_i + B_i}, \quad (4)$$

где

$$X_i = (T_{\text{вн}} - T_a) B_i, \quad W_{a,i} = \varepsilon_i \sigma T_a^4, \quad A_i = \alpha_i + 4W_{a,i}/T_a, \quad (5)$$

$$B_i = \frac{\Lambda_i / l_i}{1 + \Lambda_i / (l_i \alpha_{\text{вн},i})},$$

$$T_{\text{вн}} - T_a = \left\{ \frac{P_{\text{вн.ист}} + \sum_{i=1}^n [(1 - \rho_i)(E_n \cos \nu_i + E_d) + \varepsilon_i E_{ir} - W_{a,i}] \left( \frac{B_i}{A_i + B_i} \right) S_i}{c_{\text{в}} N + \sum_{i=1}^n \frac{A_i B_i}{A_i + B_i} S_i} \right\}. \quad (6)$$

Как видно из (6), энергия внутренних источников тепла может играть заметную роль во вкладе в разность  $T_a - T_{\text{вн}}$  между температурами воздуха снаружи и внутри объекта и тем самым влиять согласно (4) на температуру внешней поверхности объекта.

В случае фрагмента земной поверхности граничное условие (2) для нижней грани пластины-фасетки принимает вид  $T_i|_{z=l_i} = T_{\text{и}}$ , где  $T_{\text{и}}$  – температура изотермической подложки. Соответственно приближенное решение уравнений (1) и (2) имеет вид, ана-

логичный (4), но с другими параметрами  $B_i$  и  $X_i$ :  $B_i = \Lambda_i/l_i$ ,  $X_i = (T_{\text{н}} - T_{\text{а}})B_i$ .

### Аналитические выражения для корреляционных характеристик

Выведенная для температуры зависимость (4) определяет функциональную взаимосвязь интегральной яркости замещающей пластины-фасетки в ИК диапазоне  $L_{\text{ir}}$  с соответствующей интегральной яркостью в видимом диапазоне  $L_{\text{vis}}$ , поскольку та и другая в данном случае зависят от интенсивности падающей солнечной радиации:  $L_{\text{v},i} = (1/\pi)\eta_{\text{p}}\rho_i(E_{\text{н}}\cos\vartheta_i + E_{\text{д}})$ ,  $L_{\text{ir},i} = (1/\pi)\eta_{\text{e}}\varepsilon_i\sigma T_i^4$ .  $\eta_{\text{p}}$  и  $\eta_{\text{e}}$  – нормированные индикатрисы видимого и ИК излучения соответственно. Для привязки к определенным рабочим спектральным интервалам оптико-электронной аппаратуры введем в рассмотрение спектрально-зональные характеристики яркости [6]

$$L_{\text{v},i}^{\Delta\lambda'} = \frac{\eta_{\text{p}}}{\pi} \rho_i^{\Delta\lambda'} (E_{\text{н}}^{\Delta\lambda'} \cos\vartheta_i + E_{\text{д}}^{\Delta\lambda'}), \quad (7)$$

$$L_{\text{ir},i}^{\Delta\lambda} (T_i) = \eta_{\text{e}} \varepsilon_i^{\Delta\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{2hc^2}{\lambda^5 (\exp(hc/k\lambda T_i) - 1)} d\lambda \cong \frac{\eta_{\text{e}}}{\pi} \varepsilon_i^{\Delta\lambda} W_{\text{a}} \frac{15}{\pi^4} \left[ c_1^{\Delta\lambda} + \frac{1}{T_{\text{a}}} (4c_1^{\Delta\lambda} + c_2^{\Delta\lambda}) \theta_i \right], \quad (8)$$

где

$$c_1^{\Delta\lambda} = F \left( \frac{hc}{\lambda_1 k T_{\text{a}}} \right) - F \left( \frac{hc}{\lambda_2 k T_{\text{a}}} \right),$$

$$c_2^{\Delta\lambda} = -F' \left( \frac{hc}{\lambda_1 k T_{\text{a}}} \right) \frac{hc}{\lambda_1 k T_{\text{a}}} + F' \left( \frac{hc}{\lambda_2 k T_{\text{a}}} \right) \frac{hc}{\lambda_2 k T_{\text{a}}},$$

$F(x)$  – первообразная от функции  $f(x) = x^3/(e^x - 1)$ .

При рассмотрении поверхности объекта, состоящей из статистически значимой совокупности разнородных (в том числе отличающихся ориентацией по отношению к падающим солнечным лучам) пластин-фасеток, можно говорить о корреляционной зависимости между двумя полями яркости в соответствующих спектральных диапазонах. Представляет интерес, в том числе с точки зрения поиска новых информативных признаков, зависимость характера и силы корреляционной связи от оптико-физических характеристик объекта наблюдения, включая особенности его геометрической формы. Для исследования этого вопроса воспользуемся следующим описанием случайного характера изменения оптико-физических параметров поверхности при переходе от фасетки к фасетке (см. также [3, 4, 6]):

$$\rho_i = \overline{\rho_i}(1 + \xi_i), \rho_i^{\Delta\lambda'} = \overline{\rho_i^{\Delta\lambda'}}(1 + \xi_i), B_i = \overline{B_i}(1 + \delta_i),$$

$$\cos\vartheta_i = \overline{\cos\vartheta_i}(1 + \vartheta_i), \varepsilon_i = \overline{\varepsilon_i}(1 + \tau_i), \varepsilon_i^{\Delta\lambda} = \overline{\varepsilon_i^{\Delta\lambda}}(1 + \tau_i),$$

$$\overline{\xi_i} = \overline{\vartheta_i} = \overline{\delta_i} = \overline{\tau_i} = 0, \overline{\xi_i^2} = \sigma_{\rho}^2, \quad (9)$$

$$\overline{\vartheta_i^2} = \sigma_{\vartheta}^2, \overline{\delta_i^2} = \sigma_{\delta}^2, \overline{\tau_i^2} = \sigma_{\tau}^2.$$

В формуле (9) использованы обозначения:  $\xi$ ,  $\vartheta$ ,  $\delta$  и  $\tau$  – независимые безразмерные переменные с нулевыми средними значениями и дисперсиями, равными  $\sigma_{\rho}^2$ ,  $\sigma_{\vartheta}^2$ ,  $\sigma_{\delta}^2$ ,  $\sigma_{\tau}^2$  соответственно; горизонтальная черта над переменными обозначает операцию пространственного усреднения по окрестности рассматриваемой фасетки. Предполагается, что интегральным и спектрально-зональным коэффициентам отражения и излучения свойственна одинаковая пространственная изменчивость ( $\rho_i/\overline{\rho_i} = \rho_i^{\Delta\lambda'}/\overline{\rho_i^{\Delta\lambda'}}$ ,  $\varepsilon_i/\overline{\varepsilon_i} = \varepsilon_i^{\Delta\lambda}/\overline{\varepsilon_i^{\Delta\lambda}}$ ). Случайное изменение параметра  $B_i$  связано с изменением отношения  $\Lambda_i/l_i$  при переходе от одной пластины-фасетки к другой. Изменением коэффициентов конвективного теплообмена  $\alpha_i$  и  $\alpha_{\text{вн},i}$  будем пренебрегать.

Для описания корреляционной связи между спектрально-зональной яркостью  $L_{\text{v},i}^{\Delta\lambda'}$  в видимом диапазоне и спектрально-зональной яркостью  $L_{\text{ir},i}^{\Delta\lambda}$  в ИК диапазоне воспользуемся известным коэффициентом корреляции  $c_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  и связанными с ним коэффициентами линейной регрессии  $r_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  и  $r_{\text{v-ir}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$

$$c_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'} = \frac{m_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}}{(\sigma_{\text{v}}^{\Delta\lambda'}) (\sigma_{\text{ir}}^{\Delta\lambda})}, r_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'} = \frac{m_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}}{(\sigma_{\text{v}}^{\Delta\lambda'})^2}, \quad (10)$$

$$r_{\text{v-ir}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'} = \frac{m_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}}{(\sigma_{\text{ir}}^{\Delta\lambda})^2},$$

где  $m_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'} = \overline{(L_{\text{ir},i}^{\Delta\lambda} - \overline{L_{\text{ir},i}^{\Delta\lambda}})(L_{\text{v},i}^{\Delta\lambda'} - \overline{L_{\text{v},i}^{\Delta\lambda'}})}$  – величина, называемая корреляционным моментом,  $(\sigma_{\text{v}}^{\Delta\lambda'})^2 = \overline{(L_{\text{v},i}^{\Delta\lambda'} - \overline{L_{\text{v},i}^{\Delta\lambda'}})^2}$  и  $(\sigma_{\text{ir}}^{\Delta\lambda})^2 = \overline{(L_{\text{ir},i}^{\Delta\lambda} - \overline{L_{\text{ir},i}^{\Delta\lambda}})^2}$  – соответственно дисперсии яркости в заданных спектральных интервалах видимого и ИК диапазонов. Горизонтальная черта над величинами яркости, как и выше, обозначает операцию пространственного усреднения по окрестности рассматриваемой пластины-фасетки.

Приближенные аналитические выражения для описания зависимости коэффициентов корреляции  $c_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  и линейной регрессии  $r_{\text{ir-v}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  от оптико-физических параметров наблюдаемой поверхности, условий освещения и теплообмена, спектральных интервалов съемки, полученные на основе формул

(4, 6–9), имеют следующий вид (вид коэффициента линейной регрессии  $r_{v-ir}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  легко получить, воспользо-

зовавшись известным соотношением  $(c_{i-v}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'})^2 = r_{ir-v}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'} r_{v-ir}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$ ):

$$c_{iv}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'} = \frac{(\bar{\rho})^{-1} - 1 - \mu \left(1 + \frac{E_d}{E_n \cos \nu}\right) \left(1 + \frac{E_d^{\Delta\lambda'}}{E_n^{\Delta\lambda'} \cos \nu}\right)}{\sqrt{1 + \mu \left(1 + \frac{E_d^{\Delta\lambda'}}{E_n^{\Delta\lambda'} \cos \nu}\right)^2} \sqrt{\left((\bar{\rho})^{-1} - 1\right)^2 + \mu \left(1 + \frac{E_d}{E_n \cos \nu}\right)^2 + \nu C^2 + \gamma(C + D^{\Delta\lambda})^2}}, \quad (11)$$

$$r_{iv}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'} = \frac{\eta_\varepsilon}{\eta_\rho} \frac{15}{\pi^4} \frac{\bar{\varepsilon}^\lambda}{\bar{\varepsilon}} \frac{\bar{\rho}}{\rho^{\lambda'}} \frac{E_n}{E_n^{\Delta\lambda'}} \frac{(\bar{\rho})^{-1} - 1 - \mu \left(1 + \frac{E_d}{E_n \cos \nu}\right) \left(1 + \frac{E_d^{\Delta\lambda'}}{E_n^{\Delta\lambda'} \cos \nu}\right)}{1 + \mu \left(1 + \frac{E_d^{\Delta\lambda'}}{E_n^{\Delta\lambda'} \cos \nu}\right)^2} \frac{\bar{W}_a (4c_1^{\Delta\lambda} + c_2^{\Delta\lambda})}{\bar{\alpha} T_a + 4W_a}, \quad (12)$$

В формулах (10, 11) использованы обозначения:

$$C = \frac{(1 - \bar{\rho})(E_n \cos \nu + E_d) + \bar{\varepsilon} E_{ir} - \bar{W}_a \left[1 - (4\bar{B}/\bar{\alpha})((T_{вн} - T_a)/T_a)\right]}{\bar{\rho} E_n \cos \nu} \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha} + 4W_a/T_a}, \quad (13)$$

$$D^{\Delta\lambda} = \frac{\bar{\varepsilon} E_{ir} - (T_{вн} - T_a) \bar{B} + [c_1^{\Delta\lambda} \bar{\alpha} T_a - c_2^{\Delta\lambda} \bar{W}_a] / (4c_1^{\Delta\lambda} + c_2^{\Delta\lambda})}{\bar{\rho} E_n \cos \nu}, \quad (14)$$

$$\mu = \sigma_\rho^2 / \sigma_\rho^2, \quad \nu = \sigma_\chi^2 / \sigma_\chi^2, \quad \gamma = \sigma_\varepsilon^2 / \sigma_\varepsilon^2. \quad (15)$$

Формулы (11–15) представляют собой математическую модель, которая устанавливает закономерности поведения корреляционных характеристик яркости в зависимости от свойств наземных объектов, параметров процесса теплообмена, а также от условий наблюдения с учетом выбранных спектральных интервалов съемки в видимом и ИК диапазонах. Установленные закономерности с одной стороны позволяют прогнозировать поведение корреляционных характеристик в изменяющихся условиях теплообмена, а с другой стороны могут служить для оценки информативности этих характеристик при совместном анализе изображений, получаемых одновременно в видимом и ИК диапазонах.

### Результаты модельных расчетов корреляционных характеристик яркости

Опуская специфику теплопередачи, а также предполагая отсутствие внутренних источников тепла, оценим влияние формы наблюдаемой поверхности

на поведение корреляционных характеристик яркости. Для этого на основе модели (11–15) рассчитаем дневной ход корреляционных характеристик яркости в видимом (0,5–0,7 мкм) и ИК (8–12 мкм) диапазонах для фрагментов фона с ровной поверхностью и объектов с объемными формами, характерными для авиационной техники и наземных транспортных средств.

Предположим, что дискретное изменение интегральной прямой облученности  $E_n$  в интервале времени с 10 часов до 17 часов с шагом в один час имеет вид  $E_n = [100, 300, 500, 600, 700, 500, 350, 200 \text{ Вт/м}^2]$ , а отношение рассеянной составляющей  $E_d$  к прямой  $E_n$  составляющей солнечной радиации описывается аналогичной дискретной зависимостью  $E_d/E_n = [0,6; 0,6; 0,6; 0,2; 0,2; 0,2; 0,6; 0,6]$ . Прямую и рассеянную составляющие солнечного излучения в рабочем диапазоне видимого канала оптико-электронной аппаратуры съемки оценим следующим образом:  $E_{n,d}^{\Delta\lambda}(t) = 0,6E_{n,d}(t)$ , где через  $t$  обозначена дискретная временная переменная. Параметры, описывающие инфракрасную подсветку за счет атмосферной радиации, нормированные индикатрисы отражения поверхности объекта и фона,

среднюю дневную температуру, выберем постоянными и равными соответственно  $E_{\text{ir}} = 200 \text{ Вт/м}^2$ ;  $\eta_{\varepsilon} = \eta_{\rho} = 1$ ;  $T_a = 300 \text{ К}$ . Значения коэффициентов  $c_1$  и  $c_2$ , рассчитанные с использованием закона Планка для излучения абсолютно черного тела, имеют для спектрального диапазона 8–12 мкм следующие значения:  $c_1 = 1,708$ ,  $c_2 = 1,558$ .

Значения  $\overline{\cos\psi}$  и  $\sigma_{\psi}^2$  для выбранной объемной формы техногенных объектов рассчитывались методом трехмерного компьютерного моделирования применительно к условиям надирной съемки. Оказалось, что для обоих выбранных типов объектов параметр  $\sigma_{\psi}$  меняется незначительно, оставаясь в указанном интервале времени равным  $\approx 0,05$ . Дискретная зависимость  $\overline{\cos\psi}$  от времени имела следующий вид:  $\overline{\cos\psi} = [0,7; 0,7; 0,7; 0,8; 0,8; 0,7; 0,7]$  для объемной формы самолета,  $\overline{\cos\psi} = [0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 0,9; 0,8; 0,7; 0,6]$  для объемной формы объекта наземной транспортной техники.

Значения других параметров выберем равными  $\bar{\rho} = 0,25$ ,  $\rho^{\lambda} = 0,3$ ,  $\bar{\varepsilon} = 0,8$ ,  $\varepsilon^{\lambda} = 0,8$ ,  $\bar{\alpha} = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{град)}$  – в случае объекта транспортной техники;  $\bar{\rho} = 0,8$ ,  $\rho^{\lambda} = 0,8$ ,  $\bar{\varepsilon} = 0,2$ ,  $\varepsilon^{\lambda} = 0,2$ ,  $\bar{\alpha} = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{град)}$  – в случае самолета. В предположении однородной окраски и материала поверхности техногенных объектов значения параметров  $\sigma_{\rho}$ ,  $\sigma_{\lambda}$  и  $\sigma_{\varepsilon}$  должны быть существенно меньше, чем  $\sigma_{\psi}$ . Полагая их значения равными 0,01, получим следующие оценки для отношений дисперсий:  $\mu = \nu = \gamma = 0,04$ .

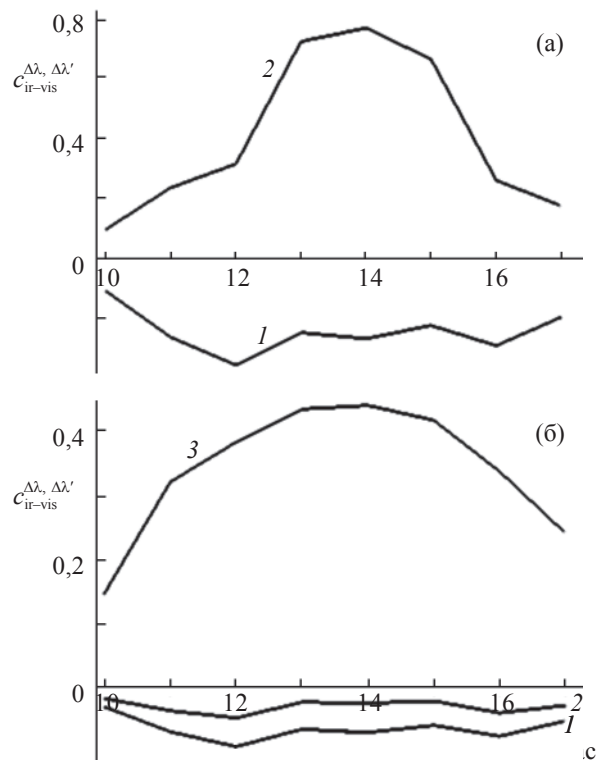
Для всех рассмотренных фрагментов фоновых образований с ровной поверхностью воспользуемся одинаковыми значениями следующих параметров:  $\overline{\cos\psi} = 1$ ,  $\bar{\varepsilon} = 0,9$ ,  $\varepsilon^{\lambda} = 0,9$ ,  $\bar{\alpha} = 10 \text{ Вт/(м}^2\text{град)}$ . С учетом предполагаемого однородного и ровного рельефа фрагментов фона отношения дисперсий выберем равными  $\mu = 4$ ,  $\nu = 4$ ,  $\gamma = 4$ . Коэффициенты отражения солнечной радиации возьмем равными  $\bar{\rho} = \rho^{\lambda} = 0,3$  для бетонной площадки,  $\bar{\rho} = 0,3$  и  $\rho^{\lambda} = 0,4$  для травяной площадки,  $\bar{\rho} = \rho^{\lambda} = 0,3$  для песчаной площадки.

На рис. 1 представлен дневной ход коэффициентов корреляции  $c_{\text{ir-vis}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  между яркостью в видимом диапазоне (0,5–0,7 мкм) и яркостью в длинноволновом ИК диапазоне (8–12 мкм), рассчитанный с использованием представленной выше математической модели (10–13). Кривые 1 и 2 на рис. 1а описывают дневной ход коэффициента корреляции для бетонной полосы и объемного объекта с формой самолета. Кривые 1, 2 и 3 на рис. 1б рассчитаны соответственно для травяной и песчаной площадок и объемного объекта с формой транспортного средства. На рис. 2 представлен дневной ход коэффициентов линейной регрессии между яркостью в види-

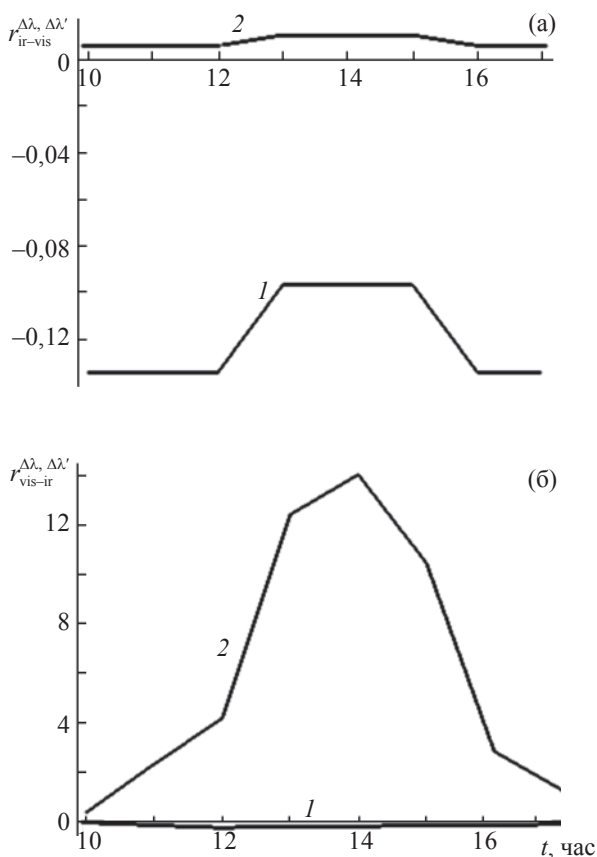
мом диапазоне (0,5–0,7 мкм) и яркостью в длинноволновом ИК диапазоне (8–12 мкм) – коэффициенты  $r_{\text{vi}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  на рис. 2а и коэффициенты  $r_{\text{vi}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  на рис. 2б. Кривые 1 и 2 рассчитаны для бетонной полосы и объемного объекта с формой самолета.

Полученные расчетные кривые коэффициента корреляции  $c_{\text{ir-vis}}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  на рис. 1 для фоновых фрагментов находятся в качественном соответствии с аналогичной экспериментальной зависимостью, полученной в работе [9] (условия эксперимента отличались примерно в 2 раза меньшим, чем при расчете, значением прямой облученности, другим рабочим ИК участком спектра, который охватывал интервал 2–20 мкм, а также неоднородностью наблюдаемого фрагмента при его достаточно ровном рельефе).

Численные оценки показывают, что при выбранных выше параметрах модели включение в теплообмен внутренних источников тепла значительной мощности (когда  $T_{\text{вн}} - T_a \geq 10$  градусов), как правило, снижает абсолютные значения корреляционных характеристик, влияние внутренних источников теп-



**Рис. 1.** а – рассчитанный дневной ход коэффициента корреляции для бетонной полосы (1) и самолета (2). б – рассчитанный дневной ход коэффициента корреляции для травяной (1) и песчаной (2) площадок и объекта транспортной техники (3).



**Рис. 2.** Рассчитанный дневной ход линейных коэффициентов регрессии для бетонной полосы (1) и самолета (2).

ла малой мощности практически не сказывается на их поведении.

### Обсуждение полученных результатов

Полученные результаты указывают на различный характер корреляционной связи у объемных объектов сложной формы и фрагментов фоновых образований с ровным рельефом. Если у первых наблюдается положительная корреляция яркости в инфракрасном и видимом диапазонах, то вторым свойственна отрицательная корреляция. Важным является также то, что характер корреляции сохраняется на протяжении всего дня. Можно также отметить, что специфика формы объемного объекта в сочетании с оптическими характеристиками поверхности отражается на силе корреляционной связи,

выражаемой абсолютным значением коэффициента корреляции.

Кривые на рис. 2 показывают, что коэффициенты линейной регрессии  $r_{vi}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  и  $r_{iv}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  могут существенно различаться по абсолютной величине (для выбранных модельных условий значения коэффициентов линейной регрессии  $r_{vi}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$  оказываются примерно на два порядка больше, чем коэффициенты линейной регрессии  $r_{iv}^{\Delta\lambda, \Delta\lambda'}$ ). Соответственно, это может отразиться на контрасте карт линейной регрессии при их визуализации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Gowerd S.N., Cruickshanks G.D., Hope S. Observed relation between thermal emission and reflected spectral radiance of a complex vegetated landscape // Remote Sens. Environ. 1985. V. 18. P. 137–145.
2. Zhiyong L., Zhi-Hui L., Weiping Y. Method of visual-infrared sensor fusion for target recognition // Proc. SPIE. Signal Processing, Sensor Fusion and Target Recognition. 1997. V. 3068. P. 591–596.
3. Павлов Н.И., Шеволдин В.А., Шуба Ю.А., Ясинский Г.И. Совместный анализ изображений сцен в тепловом и видимом диапазонах с использованием физических моделей // Оптический журнал. 1998. Т. 65. № 12. С. 113–118.
4. Agassi E., Ben-Yosef N. Relation between thermal infrared and visible/near infrared images of ground terrain // Opt. Eng. 1997. V. 36. № 3. P. 862–873.
5. Pavlov N.I. Nature of image correlation in visible and IR thermal ranges // Opt. Commun. 1999. V. 161. P. 193–196.
6. Павлов Н.И. Закономерности корреляции яркости объектов в спектральных интервалах видимого и ИК диапазонов // Оптический журнал. 2004. Т. 71. № 4. С. 65–68.
7. Павлов Н.И., Эльц Е.Э. Исследование закономерностей корреляции яркости в инфракрасном и видимом спектральных диапазонах // Изв. ВУЗов. Радиоэлектроника. 2007. Т. 50. № 4. С. 12–21.
8. Мочалин В.Д. Моделирование тепловизионных изображений наземных объектов // Оптический журнал. 2008. Т. 75. №1. С. 28–31.
9. Павлов Н.И., Сакия А.С., Сидоровский Н.В., Силантьев А.Н., Старченко А.Н. Дневное поведение коэффициента корреляции для яркости фрагмента земной поверхности в инфракрасном и видимом диапазонах // Оптический журнал. 2000. Т. 67. № 10. С. 13–15.