ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ АНОМАЛИЙ, ОБУСЛОВЛЕННЫХ ЗАГЛУБЛЕННЫМИ В ГРУНТ ИНОРОДНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Н.И. Павлов, Е.Э. Эльц
НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор

На основе аналитических и численных решений уравнения теплопроводности исследовано влияние параметров процесса естественного теплообмена, теплофизических свойств грунта и заглубленных в него объектов на температуру поверхностного слоя.

Введение

Регистрация инфракрасных (ИК) изображений позволяет обнаруживать источники собственного теплового излучения, выявлять подземные коммуникации и пустоты, заглубленные в грунт объекты, обнаруживать нарушенные и затем вновь восстановленные участки почвы (см., например, [1,2]). В последние годы возрос интерес к исследованиям по дистанционному обнаружению заглубленных взрывных устройств, в частности, мин, по температурным аномалиям нагреваемой солнцем поверхности грунта [3]. Известно, что заглубление мины в грунт влияет на процесс теплообмена находящегося над ней тонкого слоя почвы с ниже лежащими слоями, обуславливая тем самым возможность возникновения локальной температурной аномалии. Успешное решение проблемы дистанционного обнаружения заглубленных инородных объектов связывают с многоспектральными приборами, обладающими повышенной температурной чувствительностью в ИК диапазоне. Для обоснования требований к температурной чувствительности ИК канала оптико-электронной аппаратуры этого типа представляют интерес данные о закономерностях поведения температурных аномалий, обусловленных заглубленными объектами и наблюдаемых в разных условиях естественного теплообмена.

В работе [4] нами был выполнен теоретический анализ поведения указанных температурных аномалий в условиях стационарного солнечного нагрева и получены данные о возможности их дистанционного обнаружения ИК каналом авиационного малогабаритного оптико-электронного сканирующего прибора [5]. При анализе использовались модели трехслойной и однослойной теплоактивной поверхности на изотермической подложке [6,7], которые описывали соответственно фрагменты фона с заглубленным инородным объектом и без него. Суммарная толщина теплоактивных слоев, определяемая глубиной солнечного прогрева земной поверхности, оценивалась величиной 30…50см [6]. На основе решений стационарного уравнения теплопроводности выведены аналитические выражения, которые определяли поведение одномерного (по глубине) температурного поля для однослойной и трехслойной поверхности в зависимости от условий естественного теплообмена и теплофизических свойств грунта и заглубленного в него инородного объекта. Выведенные зависимости использовались для оценки величин температурных аномалий и вероятности их обнаружения ИК аппаратурой.

В настоящем докладе представлены результаты исследований, проведенных в развитие работы [4] и касающихся как учета нестационарности процесса естественного теплообмена, так и уточнения используемых теплофизических моделей. Для получения данных о динамике температурных аномалий используются численные решения нестационарного уравнения теплопроводности для трехслойной и однослойной моделей, соответствующих фрагменту земной поверхности с заглубленным инородным

объектом и без него. Как и в работе [4], при анализе с применением трехслойной модели рассматриваются два крайних случая промежуточного инородного слоя: с высокой теплопроводностью, присущей металлам, и с низкой теплопроводностью, свойственной изоляторам, в частности, пластикам. Вычисление одномерного (по глубине) температурного поля выполняется с использованием разностных уравнений, составленных по явной конечно-разностной схеме [8]. Проводится сравнительный анализ результатов, полученных на основе решений стационарного и нестационарного уравнений теплопроводности.

Теплофизическая модель

При скачкообразном включении (выключении) солнечного нагрева трехслойной поверхности «грунт-объект-грунт» динамика возникающего распределения температур T_1, T_2 и T_3 по глубине, описываемой координатой x, описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = \dfrac{\lambda_1}{c_1\gamma_1}\dfrac{\partial^2 T_1(x,t)}{\partial x^2} \quad при \quad 0 < x < x_1 \\ \lambda_1 \left.\dfrac{dT_1}{dx}\right|_{x=0} = \alpha_1 (T_1|_{x=0} - T_a) + \varepsilon_1 \sigma T_1^4\big|_{x=0} - \varepsilon_1 E_{ir} - (1-\rho_1)E_s \\ T_1|_{x=x_1} = T_2|_{x=x_1} \\ \lambda_1 \left.\dfrac{dT_1}{dx}\right|_{x=x_1} = \lambda_2 \left.\dfrac{dT_2}{dx}\right|_{x=x_1} \\ \dfrac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = \dfrac{\lambda_2}{c_2\gamma_2}\dfrac{\partial^2 T_2(x,t)}{\partial x^2} \quad при \quad x_1 < x < x_2 \\ T_2|_{x=x_2} = T_3|_{x=x_2} \\ \lambda_2 \left.\dfrac{dT_2}{dx}\right|_{x=x_2} = \lambda_3 \left.\dfrac{dT_3}{dx}\right|_{x=x_2} \\ \dfrac{\partial T_3(x,t)}{\partial t} = \dfrac{\lambda_3}{c_3\gamma_3}\dfrac{\partial^2 T_3(x,t)}{\partial x^2} \quad при \quad x_2 < x < x_3 \\ \lambda_3 \left.\dfrac{dT_3}{dx}\right|_{x=x} = 0 \text{ при включении солнечного нагрева}; T_3|_{x=x_3} = T_u \text{ при выключении} \\ T_1(x,t=0) = T_1^0(x) \\ T_2(x,t=0) = T_2^0(x) \\ T_3(x,t=0) = T_3^0(x) \end{cases} \qquad (1)$$

В случае однослойной поверхности для нахождения распределения температуры T по глубине имеем следующее нестационарное уравнение теплопроводности:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \dfrac{\lambda_1}{c_1\gamma_1}\dfrac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad при \quad 0 < x < x_1' \\ \lambda_1 \left.\dfrac{dT}{dx}\right|_{x=0} = \alpha_1 (T|_{x=0} - T_a) + \varepsilon_1 \sigma T^4|_{x=0} - \varepsilon_1 E_{ir} - (1-\rho_1)E_c \\ \lambda_1 \left.\dfrac{dT}{dx}\right|_{x=x_1'} = 0 \text{ при включении солнечного нагрева}; T|_{x=x_1'} = T_u \text{ при выключении} \\ T(x,t=0) = T^0(x) \end{cases} \quad (2)$$

В приведенных формулах (1) и (2) используются следующие обозначения: E_{ir} и E_s – энергетическая облученность наблюдаемой поверхности за счет падающих ИК радиации атмосферы и солнечного излучения соответственно; λ_1, α_1, ε_1 и ρ_1 – коэффициенты теплопроводности, конвективного теплообмена, излучения и отражения соответственно; c_1 – удельная теплоемкость; γ_1 – плотность; T_a и T_u – температуры приземной атмосферы и изотермической подложки соответственно; σ – постоянная Больцмана; для трехслойной поверхности координаты x_1 и x_2 определяют границы промежуточного слоя «объект», а x_3 – глубину солнечного прогрева; в случае однослойной поверхности глубина солнечного прогрева определяется координатой x_1'. Оба значения x_3 и x_1' определяются из граничного условия равенства нулю градиента температуры.

Для оценки температурных аномалий, обусловленных заглубленными в грунт инородными объектами, воспользуемся разностью температур $dT = T_1(0) - T(0)$, где $T_1(0)$ и $T(0)$ определяются решениями (1) и (2) при x=0 соответственно.

Аналитическое решение стационарных уравнений, аналогичных уравнениям (1) и (2), дает следующий результат [4]:

$$dT = \Delta \cdot \frac{(x_2 - x_1)\left(1 - \dfrac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) + (x_3 - x_2)\left(1 - \dfrac{\lambda_1}{\lambda_3}\right)}{\lambda_1 + x_3(\alpha_1 + 4\varepsilon_1 \sigma T_u^3)}, \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{\varepsilon_1\left(\sigma T_u^4 - E_{ir}\right) + \alpha_1\left(T_u - T_a\right) - E_s(1-\rho_1)}{1 + \left(\alpha_1 + 4\varepsilon_1\sigma T_u^3\right)\cdot\left(\dfrac{x_1}{\lambda_1} + \dfrac{x_2 - x_1}{\lambda_2} + \dfrac{x_3 - x_2}{\lambda_3}\right)}. \quad (4)$$

В рамках предложенных нестационарных моделей численный анализ проводится для двух крайних случаев теплопроводящего, инородного по отношению к грунту, слоя: с высокой теплопроводностью, присущей металлам, и с низкой теплопроводностью, свойственной изоляторам, в частности, пластикам. Расчеты выполняются с использованием следующих численных значений параметров: c_1=c_3 =920 Дж/кгК, γ_1=γ_3=2200 кг/м^3, ε_1=0,9, ρ_1=0,3, λ_1=λ_3 =0,85 Вт/(м·град) – все параметры приведены для сухого песчаного грунта; λ_2=0,10 Вт/(м·град), c_2=1500 Дж/кгК, γ_2=1500 кг/м^3 – для пластика; λ_2=70,0 Вт/(м·град), c_2=465 Дж/кгК, γ_2=7800 кг/м^3 – для металла; α_1=10 Вт/(м^2·град); $T_1^0(x) = T_2^0(x) = T_3^0(x) = T_u = 285K$ (при включении солнечного нагрева), T_a=295К; E_{ir}=200 Вт/м^2. Толщина инородного слоя (как из пластика, так и из металла) предполагается равной 5 см. Толщина верхнего слоя грунта для трехслойной поверхности равняется 3 см.

Для E_s используется следующая модель (при включении солнечного нагрева):

$$E_s = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 400[Вт/м^2] + 0,01[Вт/м^2 с] \cdot t[с], & t \geq 0 \end{cases}$$

При выключении солнечного нагрева распределения температуры $T_1^0(x), T_2^0(x), T_3^0(x)$ вычисляются с использованием стационарной модели [4] при E_{ir}=200 Вт/м^2 и E_s=470 Вт/м^2.

Результаты численного решения

Дифференциальные уравнения (1) и (2) для нахождения одномерного (по глубине) температурного поля в случаях трехслойной и однослойной поверхности переписываются в виде разностных уравнений согласно следующим выражениям:

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \left(T_i^{k+1} - T_i^k\right)/\Delta t\,, \quad \frac{\partial T}{\partial x} \approx \left(T_{i+1}^k - T_i^k\right)/\Delta x$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{1}{\Delta x}\left(\frac{T_{i+1}^k - T_i^k}{\Delta x} - \frac{T_i^k - T_{i-1}^k}{\Delta x}\right) = \frac{T_{i+1}^k - 2T_i^k + T_{i-1}^k}{(\Delta x)^2}$$

При указанных выше значениях параметров выполняется численное решение разностных уравнений, составленных по явной конечно-разностной схеме [8] с соблюдением условия устойчивости последней ($\frac{\lambda}{c\gamma}\Delta t \leq \frac{1}{2}(\Delta x)^2$). Соответствующий шаг по переменным x и t определяется величинами: Δx=1мм, Δt=1с для трехслойной поверхности «грунт–пластик–грунт» и однослойной поверхности «грунт»; Δx=2,5мм, Δt=0,1с для трехслойной поверхности «грунт–металл–грунт».

На рис.1 и 2 представлена рассчитанная динамика температурных аномалий при включении и выключении солнечного нагрева. Кривые 2 и 4 на рис.1 описывают динамику аномалии при инородном слое «пластик» и «металл» соответственно. Прямые 1 и 3 соответствуют стационарному нагреву (получены на основе выражений (3) и (4)) и приведены для сравнения нестационарной и стационарной моделей. На рис.2 кривые 1 (инородный слой «пластик») и 2 (инородный слой «металл») описывают динамику температурных аномалий при выключении солнечного нагрева.

Литература

1. Горный В.И., Шилин Б.В., Ясинский Г.И. Тепловая аэрокосмическая съемка. – М.: Недра. – 1993. – 128 с.
2. Мухамедяров Р.Д. Аэрокосмический мониторинг технического состояния подземных и наземных инженерных сооружений. Оптический журнал, 2002, т.69, № 4, с.11-18.
3. Goldberg A.C.,Fisher T., Derzko Z. Application of dual-band infrared focal plane arrays to tactical and strategic military problems. – SPIE Proc., 2003, vol.4820, p.500-514.
4. Павлов Н.И., Эльц Е.Э. Дистанционное обнаружение температурных аномалий, обусловленных заглубленными в грунт инородными объектами. – Оптический журнал, 2006, т. 73, № 10.
5. Павлов Н.И., Ясинский Г.И.. Малогабаритный оптико-электронный сканирующий прибор для аэросъемки в видимом и ИК диапазонах. – Оптический журнал, 2003, т. 70, №4, с. 11-14.
6. Agassi E., Ben-Yosef N. Relation between thermal infrared and visible/near infrared images of ground terrain. – Opt. Eng., 1997, vol.36, no. 3, p. 862-873.
7. Справочник по инфракрасной технике: В 4 т. /Ред. Волф У., Цисис Г. Т.1. Физика ИК излучения. – М.: Мир, 1995. – 606с.
8. Исаев С.И., Кожинов И.А., Кофанов В.И. и др. Теория тепломассообмена. Под ред. А.И. Леонтьева. – М.: Высш. школа, 1979. – с.495.

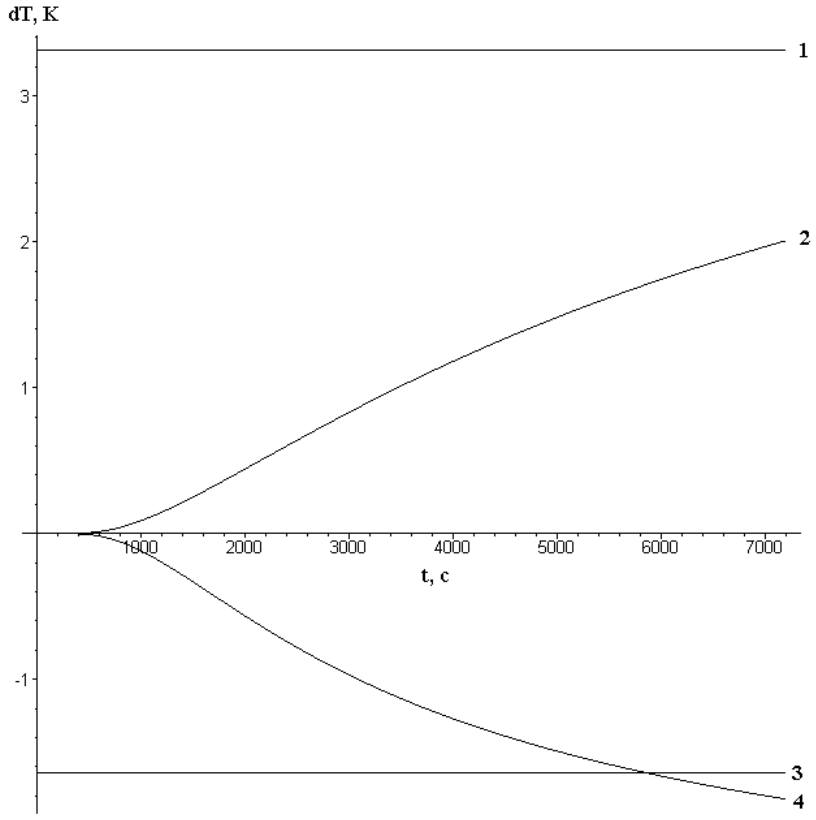

Рис.1. Динамика температурной аномалии при включении солнечного нагрева:

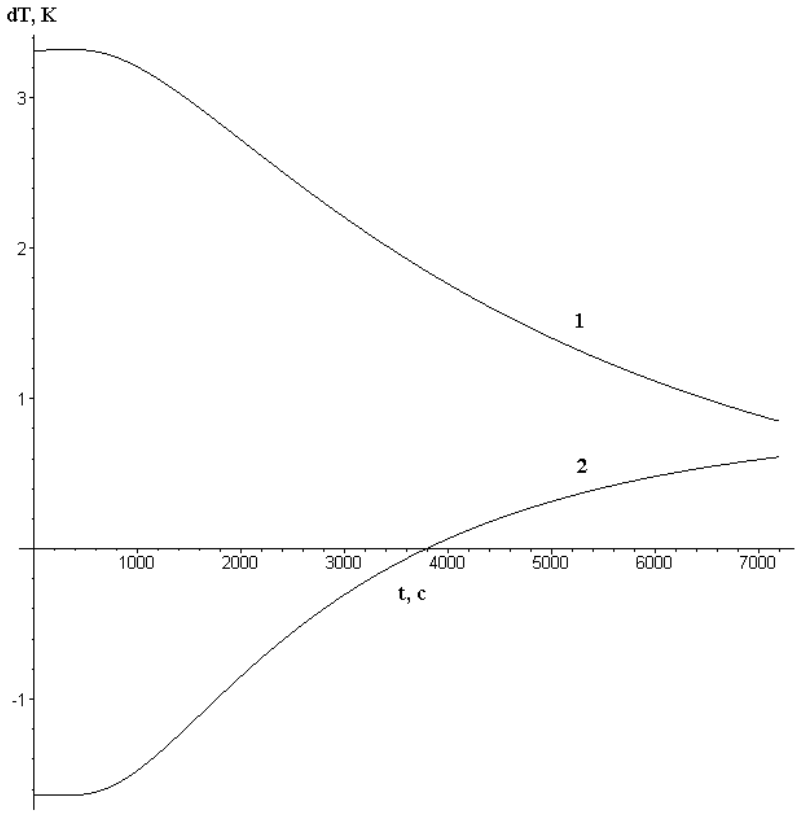

Рис.2. Динамика температурной аномалии при выключении солнечного нагрева.