

Способ классификации техногенных объектов на основе построения многослойных тепловых томограмм

И.Н. Ищук¹, А.А. Долгов¹

¹ВУНЦ ВВС «ВВА имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Старых Большевиков 54А, Воронеж, 394064

Аннотация. В статье рассматривается решение задачи классификации техногенных объектов на фоне земной поверхности, находящихся в условиях естественного теплообмена с окружающей средой на основе построения многослойных тепловых томограмм. Приведены результаты экспериментальной апробации предлагаемого способа классификации.

1. Введение

В настоящее время в задачах дистанционного мониторинга земной поверхности с применением беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) все большее внимание уделяется использованию многоспектральных оптико-электронных средств (МОЭС), включающих в свой состав приборы видимого и инфракрасного (ИК) диапазонов длин волн. Их совместное применение позволяет решать ряд важнейших задач, например, таких, как навигация в сложных метеоусловиях, обнаружение скрытых (заглубленных в грунт) объектов, выявление их внутренней структуры, поиск пострадавших и раненых. Решение вышеназванных задач основано, как правило, на решении задач обнаружения, распознавания и классификации объектов, находящихся на земной поверхности, либо заглубленных в грунт в условиях естественного теплообмена с окружающей средой. Среди основных информационных признаков, таких, как форма, размер, контрастность, пространственное расположение, параметры подстилающей поверхности (грунта), позволяющих классифицировать тот или иной техногенный объект на фоне земной поверхности, весьма важную роль, с точки зрения информативности, имеют теплофизические свойства техногенных объектов, напрямую влияющие на распределение температурных полей на поверхности района дистанционного мониторинга, анализ которых позволяет получить или уточнить информацию об объекте, такую, как линейные размеры, расположение в пространстве, форма, внутренняя структура.

2. Постановка задачи

Задача классификации техногенных объектов на фоне земной поверхности состоит в выделении информационных (демаскирующих) признаков, присущих тому или иному техногенному объекту.

В общем виде задачу классификации техногенных объектов на фоне земной поверхности можно записать в следующем виде[4]:

$$R_i \{r_1, r_2 \dots r_n\} \rightarrow \Omega \{\omega_1, \omega_2 \dots \omega_m\}, i \in [1..N] \quad (1)$$

где R_i – классифицируемый техногенный объект; $\{r_1, r_2 \dots r_n\}$ – совокупность информационных признаков; $\Omega\{\omega_1, \omega_2 \dots \omega_m\}$ – множество классов материалов, N – количество техногенных объектов.

Рассмотрим участок земной поверхности с расположенными на нем объектами в виде упрощенной модели, представленной на рисунке 1, находящейся в естественных условиях теплообмена с окружающей средой.

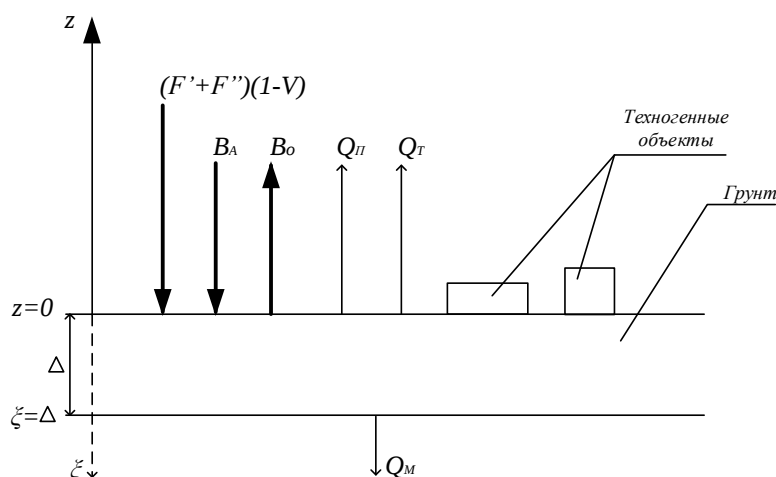


Рисунок 1. Модель земной поверхности с расположенными на ней техногенными объектами.

Тепловой режим поверхностного слоя земной поверхности опишем уравнением теплового баланса[6]:

$$(1-V)Q - B_0^* = Q_M + Q_T + Q_\Pi \quad (2)$$

где $Q_M = -\lambda_1(\theta) \frac{\partial T_0}{\partial z} \Big|_{z=0}$ – количество тепла, проводимое, посредством молекулярного

телопереноса; $Q_T = C^* \rho^* k \frac{\partial T_0}{\partial z} \Big|_{z=0}$ – количество тепла, выделяемое вследствие турбулентного

теплообмена; $Q_\Pi = L_p k \frac{\partial s}{\partial z} \Big|_{z=0}$ – количество тепла, выделяемого посредством испарения

(конденсации) воды с (на) поверхности; V – альбедо; $Q = F' + F''$ – суммарный поток солнечной радиации, приходящий на поверхность; F' – поток прямой солнечной радиации; F'' – поток рассеянной солнечной радиации; $B_0^* = \delta(\sigma T_0^4 - \delta_a \sigma T_\Pi^4)$ – эффективное излучение

верхнего слоя поверхности, δ – поглощательная способность верхнего слоя поверхности, σ – постоянная Стефана – Больцмана, δ_a – относительный коэффициент излучения атмосферы; $\lambda_1(\theta)$ – эффективная теплопроводность; $T_0 = T_0(x, y, \tau)$ – неизвестная функция температуры поверхностного слоя, $\tau \in [0, T]$ – временной интервал наблюдения;

$\Theta(x, y, z) \in D_\Theta = \Omega \times [0, H]$ $\Theta(x, y, z)$ – вектор пространственных координат; D_Θ – множество допустимых значений Θ , Ω – поверхность полуограниченной среды; C^* – удельная изобарная теплоёмкость воздуха; ρ^* – плотность воздуха; k – коэффициент турбулентности; L_p – удельная теплота парообразования; s – массовая доля водяного пара.

Распределение температурного поля в анизотропной негетогенной среде описывается уравнением[5]:

$$C_{\rho j}(\theta) \frac{\partial T_j}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda_j(\theta)]_{11} \frac{\partial T_j}{\partial x} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda_j(\theta)]_{12} \frac{\partial T_j}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left([\lambda_j(\theta)]_{13} \frac{\partial T_j}{\partial z} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left([\lambda_j(\theta)]_{22} \frac{\partial T_j}{\partial y} \right) + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left([\lambda_j(\theta)]_{23} \frac{\partial T_j}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left([\lambda_j(\theta)]_{33} \frac{\partial T_j}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где $C_{\rho j}$ - объемная теплоемкость среды; θ - эффективная температура;

$$\lambda_j(\theta) = \begin{pmatrix} \lambda_j(\theta)_{11} & \lambda_j(\theta)_{12} & \lambda_j(\theta)_{13} \\ \lambda_j(\theta)_{21} & \lambda_j(\theta)_{22} & \lambda_j(\theta)_{23} \\ \lambda_j(\theta)_{31} & \lambda_j(\theta)_{32} & \lambda_j(\theta)_{33} \end{pmatrix} - \text{тензор эффективной теплопроводности}$$

анизотропной среды.

Значение эффективной теплопроводности $\lambda_j(\theta)$ можно вычислить с помощью эмпирического выражения[1]

$$\lambda_j(\theta) = B_{0j} + B_{1j}\theta + B_{2j}\theta^{1/2}, \quad (4)$$

$$B_{0j} = \begin{pmatrix} b_{0j}^{xx} & b_{0j}^{xy} & b_{0j}^{xz} \\ b_{0j}^{yx} & b_{0j}^{yy} & b_{0j}^{yz} \\ b_{0j}^{zx} & b_{0j}^{zy} & b_{0j}^{zz} \end{pmatrix}, \quad B_{1j} = \begin{pmatrix} b_{1j}^{xx} & b_{1j}^{xy} & b_{1j}^{xz} \\ b_{1j}^{yx} & b_{1j}^{yy} & b_{1j}^{yz} \\ b_{1j}^{zx} & b_{1j}^{zy} & b_{1j}^{zz} \end{pmatrix},$$

$$B_{2j} = \begin{pmatrix} b_{2j}^{xx} & b_{2j}^{xy} & b_{2j}^{xz} \\ b_{2j}^{yx} & b_{2j}^{yy} & b_{2j}^{yz} \\ b_{2j}^{zx} & b_{2j}^{zy} & b_{2j}^{zz} \end{pmatrix} - \text{матрицы эмпирических коэффициентов.}$$

Граничные и начальные условия сопряжения слоистых сред можно записать следующим образом[5]:

$$\lambda_j(\theta) \frac{\partial T_j}{\partial z} \Big|_{z=h_j} = \frac{1}{R_T} \left(T_{j+1} \Big|_{z=+\Delta h_j} - T_j \Big|_{z=-\Delta h_j} \right);$$

$$\lambda_j(\theta) \frac{\partial T_j}{\partial z} \Big|_{z=-\Delta h_j} = \lambda_{j+1}(\theta) \frac{\partial T_{j+1}}{\partial z} \Big|_{z=+\Delta h_j}; \quad (5)$$

$$T_N \Big|_{z=H} = \varphi_1(x, y, H);$$

$$T_0 \Big|_{z=0} = \varphi_0(x, y, 0),$$

где R_T - коэффициент термического сопротивления; $\varphi_1(x, y, H); \varphi_0(x, y, 0)$ - известные функции начального распределения температур на верхней и нижней границах слоя.

3. Решение задачи

При проведении дистанционного мониторинга с заданной периодичностью измеряют значения радиационной температуры и значения яркости поверхности каждого элементарного участка земной поверхности площадью $g \in G$, размер которой зависит от высоты полета БПЛА и разрешающей способности МОЭС и получают множество пространственно-временных многоспектральных изображений в видимом и ИК диапазонах длин волн – кубоид видимых изображений и кубоид ИК-изображений соответственно.

При формировании изображений в некоторых случаях имеют место высокие уровни шумов, например, при термическом формировании изображений. Проведем усреднение полученных изображений путем взятия среднего значения по нескольким изображениям одного временного отсчета, что позволит значительно снизить уровень шума.[7]

Дисперсия среднего, взятая по K одновременным выборкам определяется как [7]

$$\sigma_G^2 \approx \frac{1}{(K-1)} \sigma_G^2 = \frac{1}{K(K-1)} \sum_{k=1}^K (G_k - \bar{G})^2, \quad (6)$$

где G_k – матрица отдельно взятого изображения из множества одновременных K выборок; $\bar{G}$ – матрица усредненного изображения.

Преобразование значений радиационного температурного поля в значения термодинамического температурного поля на поверхности выполняется в соответствии с системой уравнений [4]:

$$\begin{cases} T_{td} = \sqrt[4]{\frac{T_r^4 - (1-\varepsilon)T_a^4}{\varepsilon}} \\ T = T_{td} - T_{td\min}, \end{cases} \quad (7)$$

где T_{td} – значение термодинамической температуры в точке $g(x, y) \in G$; $T_{td\min}$ – минимальное значение термодинамической температуры поверхности РДМ. В результате преобразования (6) получим кубоид термодинамических температурных изображений $T(x, y, \tau)$.

Количество приходящей на поверхность суммарной солнечной радиации возможно определить из значения прямой солнечной радиации на верхней границе атмосферы [6]:

$$Q^* = F_0^* \int_{-t_0}^{t_0} \left(\sin \varphi \sin \xi + \cos \varphi \cos \xi \sin \frac{2\pi}{P} t \right) \frac{dt}{R^2}, \quad (8)$$

где $F_0^* \approx 2 \text{ кал} \cdot \text{см}^2 / \text{мин}$ – астрономическая солнечная постоянная; $\pm t_0$ – время восхода и захода Солнца, отсчитывая от полудня; $R = r/r_0$ – отношение расстояний произвольного и среднего расстояний от Земли до Солнца; φ – широта места наблюдения; $\xi = -23,5 \dots +23,5$ – угол склонения Солнца, P – период вращения Земли; $\frac{2\pi}{P}t$ – часовой угол; t – время, отсчитываемое от полудня [6].

Известно, что из-за поглощения и рассеяния в атмосфере поток солнечной радиации ослабляется в среднем на 20%. Наличие облачности ослабляет его еще в среднем на 20-30%. [6].

Определим средний коэффициент прозрачности атмосферы при безоблачном небе [6]:

$$p_\lambda = \exp(-\alpha_\lambda), \quad (9)$$

где $\alpha_\lambda \approx 0.2$ – средний коэффициент ослабления солнечной радиации в атмосфере.

Поток суммарной солнечной радиации, приходящей на исследуемую поверхность при безоблачном небе определяется из выражения [6]:

$$Q^0 = Q^* p_\lambda^m, \quad (10)$$

$$m = \begin{cases} \frac{1}{\sin(h)} = \text{cosec}(h), & h \geq 30^\circ \\ \frac{53}{h}, & h \leq 30^\circ \end{cases} \quad (11)$$

где m – оптическая масса атмосферы; h – высота подъема Солнца. Второе выражение в системе (11) получено эмпирически.

При наличии облачности, поток суммарной радиации можно оценить из эмпирической зависимости [6]

$$Q = Q^0 (1 - (a + bn)n), \quad (12)$$

где n – количество облачности в долях единицы; a, b – эмпирические коэффициенты ($a; 0.4; b; 0.38$ для $\varphi = 50^\circ$). Временное распределение суммарной солнечной радиации по поверхности можно описать уравнением[5]:

$$\Delta Q_j = \frac{Q}{\sin \gamma} \left(\cos \left(\frac{2\gamma \Delta \tau_j}{\tau} \right) - \cos \left(\frac{2\gamma \Delta \tau_{j-1}}{\tau} \right) \right), \quad (13)$$

где γ – максимальный угол подъема Солнца над горизонтом в течение суток, q_E – количество солнечной радиации за сутки, τ – продолжительность дня, $[\Delta \tau_{j-1}, \Delta \tau_j]$ – временной интервал распределения солнечной радиации Δq_j , $j \in [1, \tau]$ – количество часов от восхода Солнца.

Построение пространственного распределения теплофизических параметров осуществляется на основе редукции кубоида ИК – изображений[4]:

$$A_{\xi}^{-1}(\hat{T}(x, y, \tau)) = \begin{vmatrix} f_{\lambda}(x, y) \\ f_a(x, y) \end{vmatrix}, \quad (14)$$

где $f_{\lambda}(x, y)$ – тепловая томограмма теплопроводности; $f_a(x, y)$ – тепловая томограмма температуропроводности; A_{ξ}^{-1} – обратный оператор, использующий априорную информацию о неточности во входных данных, позволяющий получить корректное решение коэффициентной обратной задачи теплопроводности путем минимизации функционала невязки на основе численного решения многопараметрической оптимизационной задачи:

$$J(f) = \int_0^T \iint_G \left(\xi_1 \|T_0[\psi : f] - \hat{T}\|^2 + \xi_2 \left\| \frac{dT_0[\psi : f] - d\hat{T}}{d\tau} \right\|^2 \right) dx dy d\tau \rightarrow \min_{f \in D_f}, \quad (15)$$

где $\psi \{ \Lambda, h, Q, Ff, T_A \}$ – вектор оптимизируемых параметров математической модели для исследуемой поверхности; $\Lambda \{ \lambda_i, C_i, \rho_i \}$ – совокупность теплофизических параметров используемой математической модели; λ_i – теплопроводность i -го слоя, C_i – удельная теплоёмкость i -го слоя, ρ_i – плотность i -го слоя $i = \overline{1, 2}$ – номер слоя; h – глубина моделирования; Q – поток суммарной солнечной радиации, приходящей на исследуемую поверхность; Ff – скорость ветра в приземном слое; T_A – температура воздуха в приземном слое; ξ_1, ξ_2 – весовые коэффициенты; $T[\psi]$ – температурное поле, полученное решением прямой задачи теплопроводности численными методами; $\tau \in [0, T]$ – временной интервал

наблюдения; $f = \begin{vmatrix} f_{\lambda}(x, y) \\ f_a(x, y) \end{vmatrix}$ – матрица пространственного распределения теплофизических параметров на исследуемой поверхности; G – площадь исследуемой поверхности; D_f – множество допустимых значений f .

4. Эксперимент

Для экспериментальной апробации были взяты эталонные материалы с известными значениями теплофизических параметров:

$$\text{пенопласт} \left(\lambda = 0,026 \dots 0,09 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad a = 2,03 \cdot 10^{-7} \dots 25 \cdot 10^{-7} \frac{\text{М}^2}{\text{с}} \right);$$

$$\begin{aligned}
 &\text{дерево} \left(\lambda = 0,15 \dots 0,23 \frac{Bm}{m \cdot K}; \quad a = 6,94 \cdot 10^{-8} \dots 3,19 \cdot 10^{-7} \frac{M^2}{c} \right); \\
 &\text{сталь} \left(\lambda = 40 \dots 100 \frac{Bm}{m \cdot K}; \quad a = 10^{-5} \dots 5,5 \cdot 10^{-5} \frac{M^2}{c} \right); \\
 &\text{бетонная плита ПАГ} \left(\lambda = 30 \dots 50 \frac{Bm}{m \cdot K}; \quad a = 1,05 \cdot 10^{-5} \dots 6,08 \cdot 10^{-5} \frac{M^2}{c} \right), \\
 &\text{расположенные на поверхности грунта} \\
 &\left(\lambda = 0,5 \dots 3,1 \frac{Bm}{m \cdot K}; \quad a = 3,27 \cdot 10^{-7} \dots 17,5 \cdot 10^{-7} \frac{M^2}{c} \right) \text{ (рисунок 2)}.
 \end{aligned}$$



Рисунок 2. Размещение эталонных материалов на поверхности грунта.

Измерения радиационных температур поверхности и находящихся на ней материалов проводились тепловизионным приемником Flir Tau 2 с высоты 100 метров в течение суток с периодичностью 2 часа. Было получено 12 ИК-изображений исследуемого участка земной поверхности (рисунок 3)

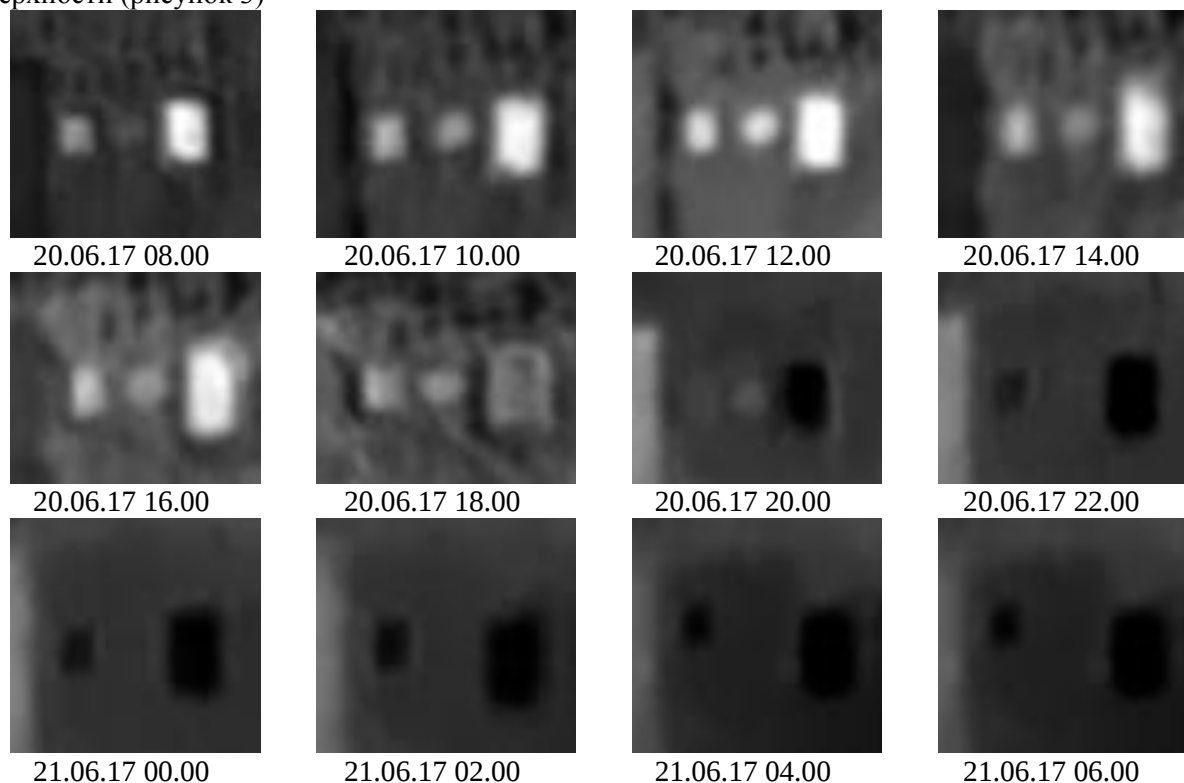


Рисунок 3. ИК-изображения исследуемого участка поверхности с расположенными на нем объектами.

Для расчета теплофизических параметров использовались метеорологические и геофизические условия, полученные на ближайшей к месту проведения эксперимента метеостанции, расположенной в аэропорту Воронеж Чертовицкое (таблица 1)[8].

Таблица 1. Метеорологические и геофизические условия.

Дата, время	Широта места: $51^{\circ}40'$ с.ш.		Склонение Солнца: $+23^{\circ}17'$	
	Температура воздуха на высоте 2 метра над поверхностью земли, $T_A, ^{\circ}\text{C}$	Относительная влажность на высоте 2 метра над поверхностью земли, $U \%$	Скорость ветра на высоте 10-12 метров над земной поверхностью, м/с	Общая облачность
1	2	3	4	5
20.06.17 08.00	19.0	68	2	0-1
20.06.17 10.00	22.0	57	4	0-1
20.06.17 12.00	24.0	47	6	6-9
20.06.17 14.00	26.0	34	6	0-1
20.06.17 16.00	26.0	39	5	0-1
20.06.17 18.00	25.0	34	6	0-1
20.06.17 20.00	23.0	41	3	0-1
20.06.17 22.00	16.0	68	0	0-1
21.06.17 00.00	14.0	77	2	0-1
21.06.17 02.00	15.0	77	2	0-1
21.06.17 04.00	16.0	72	3	0-1

В ходе решения многопараметрической оптимизационной задачи (15), реализованной на основе генетического алгоритма с применением двухслойной математической модели поверхности, были получены оптимальные распределения температурных полей на поверхности и вглубь исследуемого участка с расположенными на нем объектами. Решение коэффициентной обратной задачи для полученных оптимальных распределений температурных полей поверхности позволило определить эффективные значения теплофизических параметров (теплопроводность и температуропроводность) поверхности исследуемого участка и построить их пространственное распределение – двухслойные тепловые томограммы теплопроводности и температуропроводности (рисунки 4,5), а также глубинограмму (рисунок 6). Кластеризация пикселей со схожими теплофизическими параметрами позволила выделить области классов материалов и построить их пространственное распределение на земной поверхности (рисунок 7).

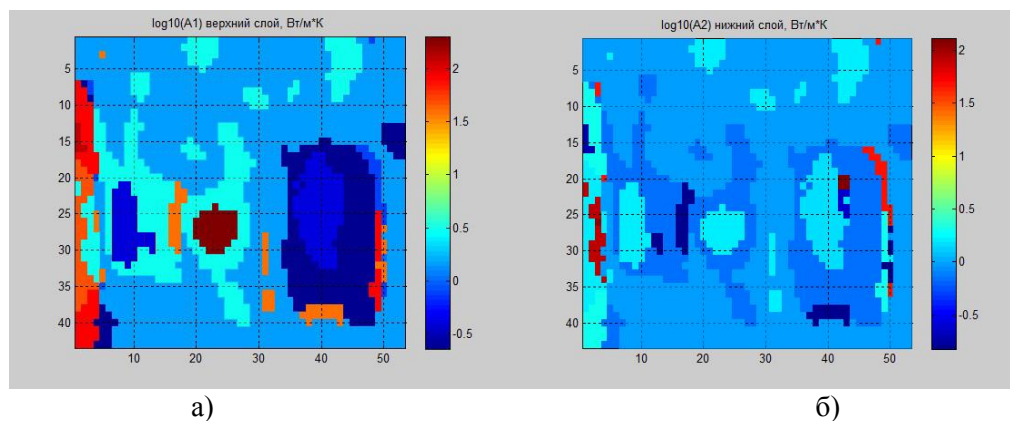
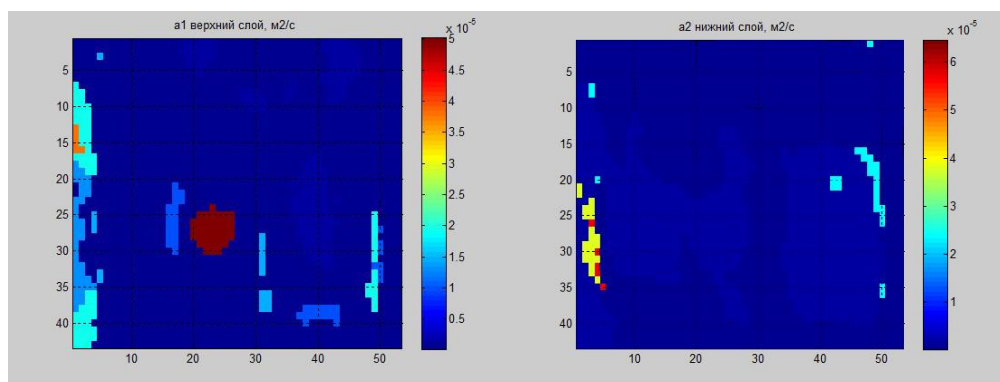


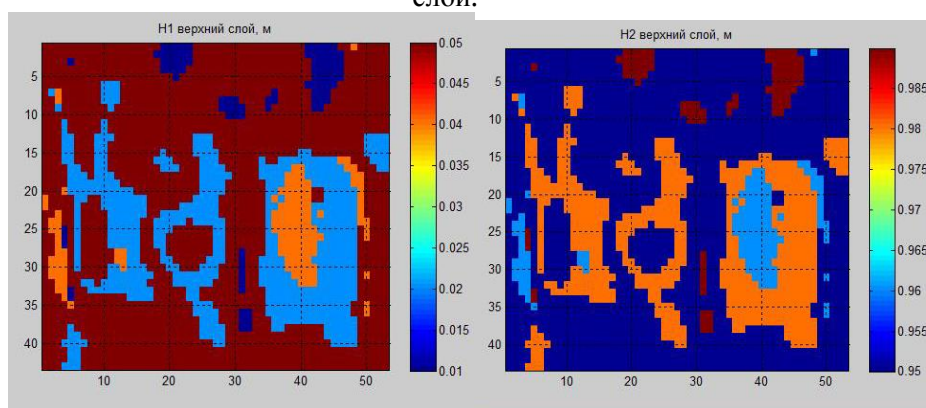
Рисунок 4. Тепловая томограмма по теплопроводности (в логарифмическом масштабе)
а) верхний слой; б) нижний слой.



а)

б)

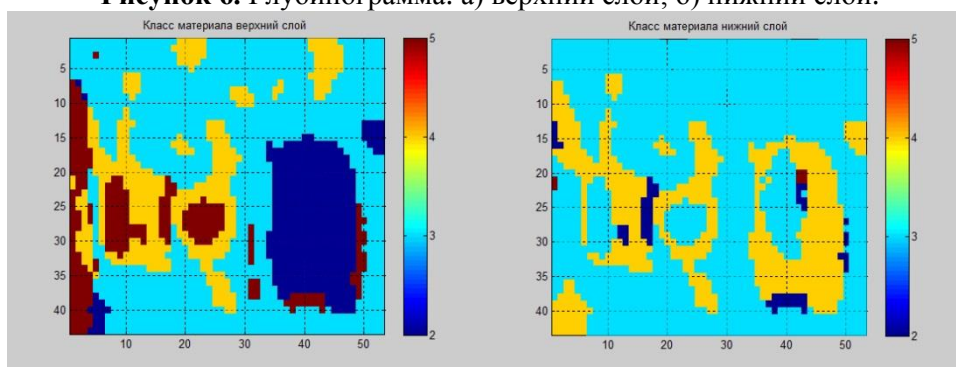
Рисунок 5. Тепловая томограмма по температуропроводности: а) верхний слой; б) нижний слой.



а)

б)

Рисунок 6. Глубинограмма: а) верхний слой; б) нижний слой.



а)

б)

Рисунок 7. Тепловая томограмма для классов материалов (2 – пенопласт, 3 – бетон, грунт; 4 – грунт, 5 - металл): а) верхний слой; б) нижний слой

Согласно полученных термограмм, эффективные значения теплопроводности и температуропроводности для эталонных материалов составили:

$$\text{для пенопласта: } \lambda ; 0,07...0,13 \frac{Bm}{m \cdot K}; \quad a ; 0,01 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{c};$$

$$\text{для дерева: } \lambda ; 0,2...0,3 \frac{Bm}{m \cdot K}; \quad a ; 0,01 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{c};$$

$$\text{для стали: } \lambda ; 100 \frac{Bm}{m \cdot K}; \quad a ; 5 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{c};$$

для бетонной плиты ПАГ: λ ; $31...39 \frac{Вт}{м \cdot К}$; a ; $10^{-5}...3,5 \cdot 10^{-5} \frac{м^2}{с}$;

для грунта: λ ; $1,99...3,16 \frac{Вт}{м \cdot К}$; a ; $0,1 \cdot 10^{-5} \frac{м^2}{с}$.

Из анализа полученных в ходе математического моделирования значений теплопроводности и температуропроводности следует, что относительная погрешность справочных и рассчитанных значений теплофизических параметров составила не более 10% для всех эталонных материалов, что свидетельствует об адекватности используемой математической модели.

5. Заключение

Таким образом, произведена постановка задачи классификации техногенных объектов на фоне земной поверхности на основе их теплофизических свойств. Решение поставленной задачи основано на нахождении оптимального распределения температурных полей на исследуемой поверхности с применением алгоритмов поисковой оптимизации и численном решении коэффициентной обратной задачи для параболических уравнений теплопроводности в частных производных. В ходе решения задачи были получены пространственные распределения теплофизических параметров (теплопроводность, температуропроводность) земной поверхности с расположенными на ней объектами и произведена их классификация по классам материалов. Результаты, полученные в ходе экспериментальной апробации, свидетельствуют об адекватности примененной для расчета математической модели.

6. Литература

- [1] Šimůnek, J. The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media. Version 3.0 / J. Šimůnek, M.Th. van Genuchten, M. Šejna. – California: Preprint Department of environmental sciences university of California riverside, 2005. – P. 270.
- [2] Saito, H. Numerical analyses of coupled water, vapor and heat transport in the vadose zone / H. Saito, J. Šimůnek, B. Mohanty // Vadose Zone J. – 2006. – № 5. – P. 784-800.
- [3] Ищук, И.Н. Способ классификации стационарных и квазистационарных объектов по данным динамических инфракрасных изображений, получаемых комплексами с беспилотными летательными аппаратами / И.Н. Ищук, А.М. Филимонов, Е.А. Степанов, К.В. Постнов // Радиотехника, 2016. – Т. 10. – С. 145-151.
- [4] Ищук, И.Н. Способ классификации объектов оптико-электронными системами разведки на основе обработки многоспектрального кубоида изображений / И.Н. Ищук, Е.А. Степанов, А.А. Бебенин, Д.Д. Дмитриев, А.М. Филимонов, // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2017. – Т. 10, № 2. – С. 183-190.
- [5] Ищук, И.Н. Расчет пространственного распределения температурных полей при дистанционном мониторинге поверхности территорий с беспилотного летательного аппарата / И.Н. Ищук, А.А. Долгов, А.А. Бебенин, С.А. Панов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2018. – Т. 11, № 3. – С. 273-279.
- [6] Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 778 с.
- [7] Яне, Б. Цифровая обработка изображений. – Москва.: Техносфера, 2007. – 584 с.
- [8] Архив погоды в Воронеже [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tp5.ru> (19.11.2018).

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-08-00053 А).

Method of classification of technogenic objects on the basis of construction of multilayer thermal tomograms

I.N. Ischuk¹, A.A. Dolgov¹

¹MESC AF «N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy», Starikh Bolshevikov 54A, Voronezh, Russia, 394064

Abstract. The article deals with the problem of classification of man-made objects on the background of the earth's surface, which are in conditions of natural heat exchange with the environment on the basis of construction of multilayer thermal tomograms. The results of experimental testing of the proposed method of classification are presented.