

УДК 551.583

ПОСТРОЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ТОМОГРАММ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПУТЕМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ГРУНТА И ГЛУБИНЕ ДЕЯТЕЛЬНОГО СЛОЯ

Ю.Ю. Громов

Тамбовский государственный технический университет
Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106/5
E-mail: gromovtambov@yandex.ru

И.Н. Ищук

Тамбовский государственный технический университет
Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106/5
E-mail: boerby76@mail.ru

А.А. Зенкин

Тамбовский государственный технический университет
Россия, 392000, Тамбов, ул. Советская, 106/5
E-mail: zenk1n@yandex.ru

Ключевые слова: земная поверхность, теплофизические параметры, идентификация, тепловой режим, тепловые томограммы.

Аннотация: тема построения тепловых томограмм земной поверхности путем идентификации теплофизических параметров материалов на поверхности грунта и в глубине деятельного слоя имеет важное значение в современных научных и инженерно-технических исследованиях. Эти методы предоставляют уникальную возможность наблюдения за изменениями теплового режима земной поверхности и ее подземных структур, что важно для выявления и анализа разнообразных подповерхностных объектов, таких как подземные коммуникации, источники тепла и другие объекты, важные для инженерных и научных целей. В данной статье будет рассмотрено применение методов построения тепловых томограмм с целью обнаружения скрытых подповерхностных объектов и их значимость для современных технологий наблюдения и изучения земной поверхности.

1. Введение

В настоящее время технологии построения тепловых томограмм земной поверхности с использованием идентификации теплофизических параметров материалов на поверхности грунта и в глубине деятельного слоя приобретают все большую популярность в контексте дистанционного мониторинга и обнаружения

скрытых подповерхностных объектов [1-3]. Этот подход обладает высокой значимостью по нескольким причинам:

- построение тепловых томограмм позволяет обнаруживать скрытые подповерхностные объекты, такие как археологические находки, инженерные коммуникации и другие важные структуры, которые могут оставаться незамеченными при стандартных методах исследования;
- полученная информация о тепловом режиме земной поверхности и глубоких слоях грунта позволяет более полно и точно оценивать геотермальные процессы и изменения, что является важным в контексте климатических и энергетических исследований;
- данный метод имеет применение в инженерных и геологических исследованиях, так как обеспечивает дополнительные данные о структуре и состоянии грунта, что существенно повышает эффективность проводимых исследований;
- возможность проведения мониторинга дистанционно позволяет использовать этот метод для удаленного контроля за состоянием земной поверхности и обнаружения изменений без необходимости прямого доступа к объекту.

В целом, построение тепловых томограмм с идентификацией теплофизических параметров материалов на поверхности и в глубине деятельного слоя является важным инструментом, который находит применение в различных областях науки, техники и практического применения.

2. Основная часть

2.1. Исходные данные

Одним из способов повышения точности и достоверности результатов сегментации является дистанционная оценка теплофизических параметров в заданных точках изображения. Дистанционная оценка теплофизических параметров основывается на анализе изменения температур на поверхности фона, а также скрытых в нем объектов. Исходными данными для дальнейшей обработки, является сформированный кубоид инфракрасных изображений [4-6].

Сегментированные нейросетевым алгоритмом U-NET пиксели кубоида инфракрасных изображений и классифицированные как фон («грунт», «трава», «асфальтовая дорога», «железобетонная плита» и т.д.) образуют множество элементарных поверхностей, для которых математическая модель радиационного теплообмена представлена как прямая задача теплопроводности на поверхности изотропного тела со мешанными граничными условиями теплового баланса Земли.

Вычисление в выделенных областях фона среднего значения температур позволяет идентифицировать точные значения финитной функции тепла Q_i приходящего на элементарную поверхность. Аппроксимация функции тепла действующей в течении суток ступенчатой функцией с 24 отсчетами (один отсчет на один час астрономического времени), позволяет построить модель для изотропного тела (грунт: теплопроводность 0.5 Вт/мК, плотность 2000 кг/м³, удельная теплоемкость 800 Дж/кгК) для которой значение невязки с данными натуральных экспериментов не превышает 1 градуса Цельсия.

2.2. Решение прямой задачи теплопроводности

2.2.1. Создание установившейся тепловой модели. Установившейся тепловая модель представлена в виде фрагмента программной реализации:

```

thermalmodels = createpde('thermal','transient');
    % 2D геометрия объектов
r1 = [3 4 -1 -1 1 1 -0.5 0 0 -0.5]; % изотропный фон
r2 = [3 4 -0.15 -0.15 0.15 0.15 -0.1 -0.05 -0.05 -0.1]; % ортотропный объект
gdm = [r1; r2]';
g = decsg (gdm, 'R1+R2', ['R1'; 'R2']');
geometryFromEdges(thermalmodels,g);

```

2.2.2. Задание граничных условий. Задание граничных условий представлено в виде фрагмента программной реализации:

```

Thermal BC (thermalmodels,'Edge',7,'Temperature',0);
thermal BC (thermalmodels,'Edge',1,'HeatFlux', @transientBCHeatedChange2D);
Thermal Properties (thermalmodels,'Face',1,'ThermalConductivity',0.5,
'MassDensity',2000, 'SpecificHeat',800);
% грунт
thermal Properties (thermalmodels,'Face',2,'ThermalConductivity',
0.5,'MassDensity',2000, 'SpecificHeat',800);
% грунт (для случая однородного изотропного материала)
msh = generateMesh(thermalmodels,'Hmax',0.05);

```

Блок с отображением сетки конечных элементов представлена на рис. 1.

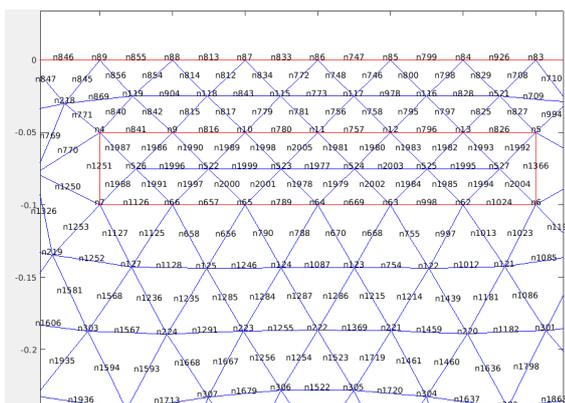


Рис. 1. Вычислительная сетка (грунт и скрытый в нем объект).

Геометрическая модель грунта включает скрытый объект с идеальным тепловым контактом. При одинаковых теплофизических параметрах грунта и объекта, модель является изотропной.

2.2.3. Решение прямой задачи теплопроводности. Решение прямой задачи теплопроводности на поверхности тепловой модели грунта представлена в виде фрагмента программной реализации:

```

tlist = 0:1800:86400;
thermalIC(thermalmodels,0);
R = solve(thermalmodels,tlist);
    T = R.Temperature;
    nid=86;
    h = figure;
    T(end,:) = 30;
    h.Position = [1 1 2 1].*h.Position;

```

Изменение температуры на поверхности тепловой модели представлено на рис. 2.

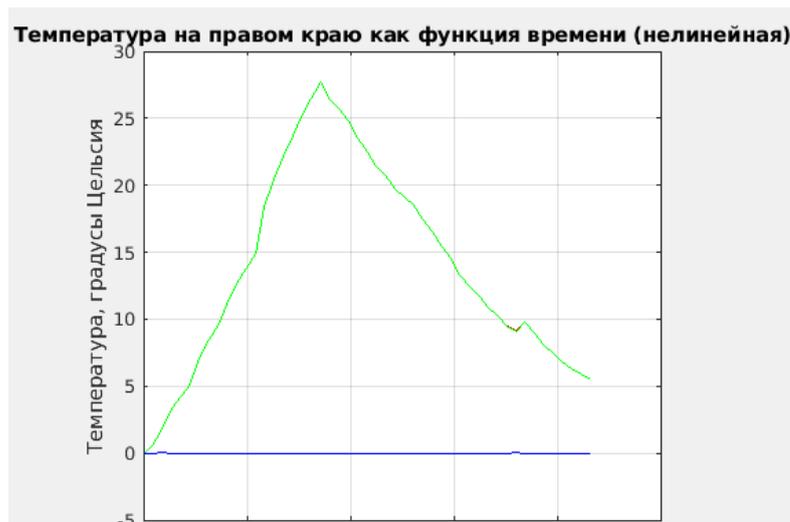


Рис. 2. Изменение температуры на поверхности тепловой модели изотропного грунта.

2.2.4. Целевая функция. Нахождение целевой функции представлено в виде фрагмента программной реализации:

```
x1=tlist(1:size(T,2));
y1= T(86,:);
% температура на поверхности грунта в точке №86 пространственной сетки
x2=0:17280:86400;
y2=[0 12.21 27.49 18.00 9.68 5.9];
y4=interp1(x2,y2,x1);
y3=interp1(x1,y1,x2);
y5=y2-y3;
FitFunk=sqrt(sum((y1-y4).^2));
FitFunk2=sqrt(sum((y2-y3).^2));
```

Нахождение целевой функции представлено на рис. 3.

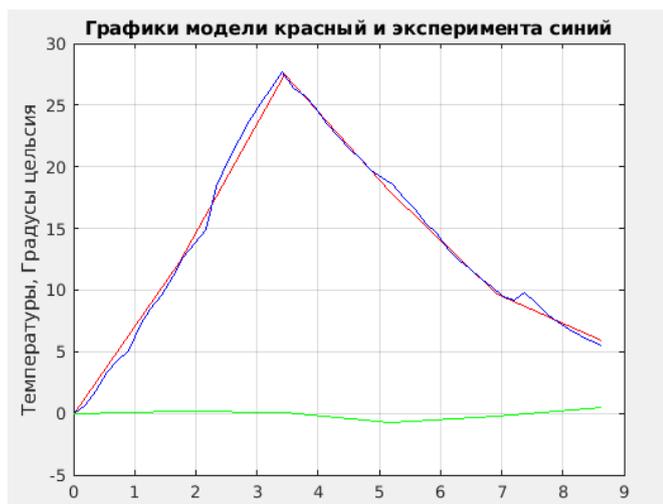


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных данных и математического моделирования.

Абсолютная погрешность моделирования не превышает 1 градус Цельсия.

Финитная функция источника тепла, обеспечившая приближенное решение прямой задачи теплопроводности, представлена алгоритмом, построенным на прицепках нечеткой логики. Идентификация 24 коэффициентов финитной функции, аппроксимирующей почасовое изменение теплового потока, реализована на основе генетического алгоритма. Геометрическая модель грунта включает скрытый объект с идеальным тепловым контактом. При одинаковых теплофизических параметрах грунта и объекта, модель является изотропной.

3. Заключение

В заключении, следует отметить, что методы построения тепловых томограмм земной поверхности с использованием идентификации теплофизических параметров материалов на поверхности грунта и в глубине деятельного слоя представляют собой важный инструмент для обнаружения скрытых подповерхностных объектов в рамках дистанционного мониторинга. Эти методы имеют широкий потенциал применения в различных областях, включая археологию, геологию, инженерные исследования, а также мониторинг экологически важных зон. Благодаря возможности получения информации о тепловом режиме земной поверхности и подземных структурах, можно улучшить прогнозирование и контроль за состоянием инфраструктуры, обнаруживать старые и новые объекты и значительно расширить наши знания о составе и структуре поверхности и грунта [7]. В связи с этим, дальнейшее развитие и совершенствование этих методов открывает новые возможности для применения в различных областях исследований и практического использования [8].

Список литературы

1. Хадсон Р. Инфракрасные системы: пер. с англ. М.: Мир. 1967. 534 с.
2. Госсорг Ж., Инфракрасная термография. Основы, техника, применение / Пер. с фр. М.: Мир. 1988. 416 с.
3. Бекешко Н.А., Ощепков П.К. Инфракрасный метод обнаружения скрытых дефектов в сопротивлениях // Дефектоскопия. 1965. № 5. С. 30-33.
4. Громов Ю.Ю., Губсков Ю.А., Ищук И.Н., Ворсин И.В. Дистанционная оценка пространственных распределений оптико-теплофизических параметров неоднородной среды // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 6. С. 24-28.
5. Громов Ю.Ю., Балюков А.М., Ищук И.Н., Ворсин И.В. Математическая модель автоматизированной системы испытаний ИК-заметности объектов в условиях неопределенности // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 7. С. 12-19.
6. Громов Ю.Ю., Губсков Ю.А., Ищук И.Н., Парфирьев А.В. Дистанционная диагностика изотропных материалов комплексами БЛА // Промышленные АСУ и контроллеры. 2014. № 8. С. 46-50.
7. Ищук И.Н., Долгов А.А. Компьютерная модель и алгоритм построения фоноцелевой обстановки районов дистанционного мониторинга по тепловым томограммам с учетом их географического положения и метеорологических условий // Техника и технологии. 2020. 13 (3). С. 350-360.
8. Ищук И.Н., Долгов А.А., Лихачев М.А., Тельных Б.К. Модель расчета теплофизических параметров материалов по данным многоспектральной разновременной фотографической съемки земной поверхности // Техника и технологии. 2020. 13 (7). С. 894-906. DOI: 10.17516/1999-494X-0278.