

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ, АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОЧВ*

А. В. Боярская, А. В. Кистанова

ФГБОУ ВПО Алтайский государственный университет

В работе рассматриваются задачи распределения температуры в почве, имеющей неоднородную структуру слоев и установления теплофизических характеристик почвы – теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности черноземов выщелоченных Алтайского Приобья [2–4, 6]. Исследуются вопросы определения теплофизических коэффициентов при различных значениях влажности, суточный и сезонный ход теплофизических характеристик, зависящих от влажности и плотности почвы. Приводятся алгоритм и численный метод решения двумерной задачи теплового режима почв с границей раздела между двумя участками с различными теплофизическими параметрами. На границе раздела почвенных компартментов задаются условия непрерывности температур и тепловых потоков. Для численного решения двумерной задачи применяется численный метод с использованием продольно-поперечной конечно-разностной схемы (метод переменных направлений).

Постановка задачи моделирования теплового режима почв

Математические модели, связанные с описанием явления теплопереноса в пределах почвенного компартмента (рис. 1), основаны на нестационарных трехмерных уравнениях параболического типа. Теплота, поступающая на поверхность почвы, под действием создаваемого градиента температур перераспределяется в объеме почвенного компартмента. Уравнение теплопереноса в почве имеет вид [4]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) + f(x, y, z, t), \quad (1)$$

где T – температура почвы; $\rho(x, y, z)$ – плотность почвы; $c(w(x, y, z))$ – теплоемкость; χ – коэффициент теплопроводности, зависящий от влажности почвы w : $\chi = \chi(w(x, y, z))$. Теплоперенос осуществляется вдоль координатных осей Ox , Oy , Oz ; $f(x, y, z, t)$ – функция источника тепла.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Благотворительного Фонда В. Потанина

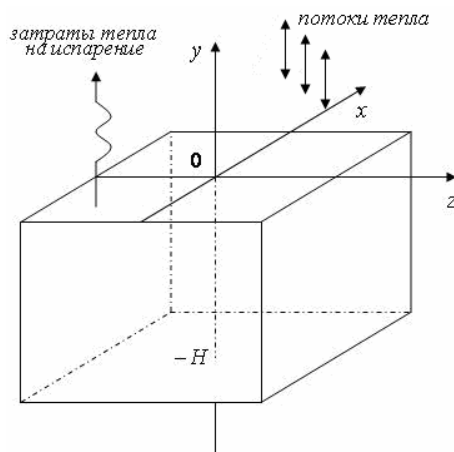


Рис. 1. Почвенный компартмент Ω

Искомая функция T удовлетворяет начальным и некоторым граничным условиям. Нижняя граница помещается, как правило, на глубине, на которой температура полагается постоянной, либо зависящей от времени и точек границы известным образом:

$$T(-H, t) = \varphi_H(t). \quad (2)$$

Верхнее граничное условие может быть задано в виде условий 1-го, 2-го, 3-го или 4-го рода.

Задача 1. Рассмотрена одномерная аппроксимация задачи распределения температуры в почве, имеющей неоднородную структуру слоев. Уравнение теплопереноса в одномерном случае имеет вид:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\chi \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad y \in [0, H] \quad (3)$$

Теплоперенос осуществляется вдоль координатной оси Oy , направленной вертикально вниз.

Для численного решения уравнения (3) производится разбиение почвы на слои.

При оценке погрешности модельных значений температуры возникла проблема интерпретации фактических данных. Известно, что замеры температуры в почве на метеостанциях проводятся один раз в сутки. Модельный шаг расчета температуры по времени – 1 час. Поэтому для расчета средней температуры почвы по слоям было получено уравнение линейной регрессии по расчетным значениям минимальной ($tmin$) и максимальной ($tmax$) температур по слоям в течение суток. Уравнение для расчета среднесуточной температуры в каждом слое имеет вид (4):

$$T = 0.324584 \cdot tmin + 0.430669 \cdot tmax + 2.023334. \quad (4)$$

Коэффициент детерминации равен 0,97 и указывает на сильную взаимосвязь между независимыми переменными $tmin$, $tmax$ и фактической температурой почвы по слоям. Уравнение регрессии (4) построено по 1440 исходным данным 2008 года. Погрешность расчетов составила 5,2%.

Апробация уравнения (4) была осуществлена на двух конечноразностных схемах по двум годам – 2007 и 2009. Результаты представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Апробация уравнения регрессии на численных схемах.

№	Конечноразностная схема	Погрешность
1	$\frac{T_{i+1}^{k+1} - T_{i+1}^k}{\tau} = K \frac{(\delta^2 T)_{i+1}^k}{(h_y)^2}$	5,2%
2	$\frac{T_i^{k+1} - T_i^k}{\tau} = K \frac{\theta(\delta^2 T)_i^{k+1} + (1-\theta)(\delta^2 T)_i^k}{(h_y)^2}$	5,2%

Таблица 2. Апробация уравнения регрессии по 2007 и 2009 гг.

Год	Характеристика	Погрешность
2007	Чернозем выщелоченный суглинистый	5,9%
2008	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый	5,2%
2009	Чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый	6,6%

Как следует из результатов, уравнение (4) дает вполне приемлемую погрешность.

Численный алгоритм решения задач реализован на языке *Fortran Power-Station* для неоднородных почвенных компартментов [6]. Полученные результаты хорошо согласуются с данными о теплофизических свойствах выщелоченных черноземов Алтайского Приобья. Они близки как по значениям, так и по характеру зависимостей и отражают объективные почвенно-физические факторы. Результаты моделирования отражают динамику распределения температур по почвенному профилю в течение суток и в течение года.

Задача 2. Рассмотрена двумерная аппроксимация задачи распределения температуры в почве, имеющей неоднородную структуру слоев. Данные для расчетов были сформированы для двух разных типов почв с различными теплофизическими параметрами: участок Ω_1 – чернозем выщелоченный суглинистый; участок Ω_2 – чернозем выщелоченный тяжелосуглинистый.

На рисунке 2 представлены расчетные профили температуры на двух участках с границей раздела. Как следует из рисунка 2, тип почвы сильнее влияет на горизонтальное распределение температур. Это можно объяснить тем, что выщелоченный чернозем со структурой суглинок (участок Ω_1) является менее плотным, поэтому обмен температурой происходит быстро, а выщелоченный чернозем, имеющий тяжелосуглинистую структуру (участок Ω_2) является более плотным, поэтому все процессы здесь происходят медленней. Исходя из этого, в правой части рисунка 2 можно наблюдать незначительные расхождения в значениях температур.

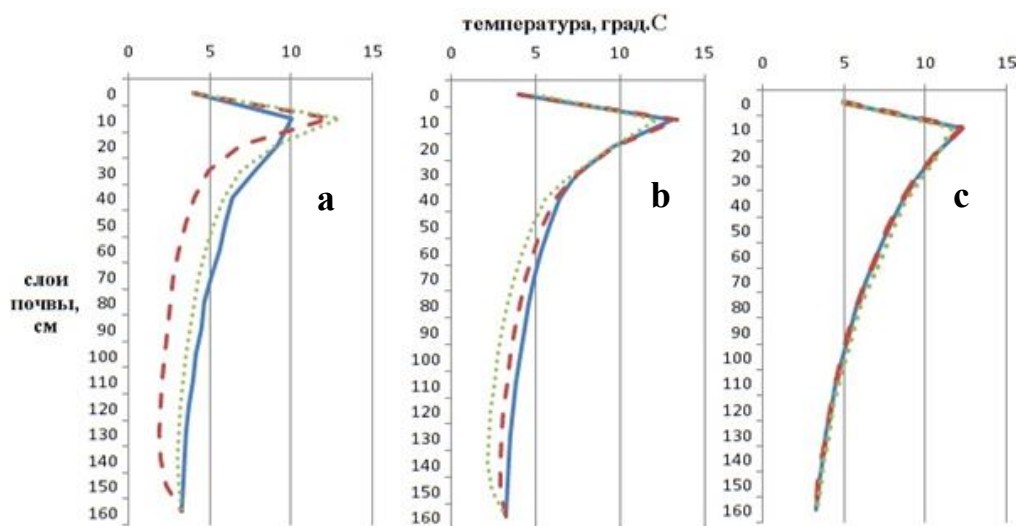


Рис. 2. Расчетные профили температуры на участках Ω_1 , Ω_2 и на границе раздела:

- а) — на левой границе области Ω_1 , на (n-2) слое, - - на (n-1) слое;
 б) — на (n-1) слое области Ω_1 , на первом слое области Ω_2 , - - на границе раздела областей;
 в) — на (n-2) слое области Ω_2 , - - на (n-1) слое области Ω_2 , на правой границе области Ω_2 .

Рассмотренная математическая постановка задачи теплового режима почв с вертикальной границей раздела, а также теоретически обоснованный и программно-реализованный алгоритм, основанный на методе переменных направлений с учетом границы раздела между участками с различными теплофизическими параметрами, имеют теоретическое значение и отличаются новизной [1, 5]. Полученные в работе результаты могут быть использованы в научно-исследовательских организациях, а также в конкретных хозяйствах, внедряющих системы точного земледелия, как для анализа накапливаемой информации и решения оптимизационных и прогностических задач, так и для определения внутривоспользованных границ однородности участков для последующего дифференцированного применения технологических воздействий на заданном сельскохозяйственном поле.

Литература

1. Хворова Л. А., Брыксин В. М., Гавриловская Н. В., Топаж А. Г. Математическое моделирование и информационные технологии в экологии и природопользовании. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2013. 277 с.
2. Хворова Л. А., Жариков А. В. Численное моделирование составляющих теплового режима почв Алтайского Приобья // Известия АлтГУ. 2013. № 1/2. С. 126–130.
3. Хворова Л. А. Математические модели в теории и практике точного земледелия // Известия АлтГУ. 2011. № 2. С. 123–128.
4. Хворова Л. А. Модель теплового режима почвы в пространственно-дифференцированных технологиях точного земледелия // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. № 4(128). С. 101–106.
5. Хворова Л. А., Топаж А. Г. Динамическое моделирование и прогнозирование в агрометеорологии. Барнаул: Изд-во АлтГУ, 2010. 263 с.
6. Хворова Л. А. Численное решение задачи теплового режима почвы // Materials of the IV International Research and Practice Conference «European Science and Technology». Vol. 1. April 10th – 11th 2013, Munich, Germany. P. 424–426.