

Л. А. Хворова, А. В. Жариков

**Численное моделирование составляющих теплового режима почв Алтайского Приобья\***

L. A. Khvorova, A. V. Zharikov

**Numerical Modeling of the Components of a Thermal Regime of the Soils in the Altai Priobjye**

Рассматриваются задачи: распределение температуры в почве, имеющей неоднородную структуру почвенных слоев; определение теплофизических характеристик почвы — теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности черноземов выщелоченных Алтайского Приобья. Исследуются вопросы определения теплофизических коэффициентов при различных значениях влажности для почвенных слоев; суточный и сезонный ход теплофизических характеристик, зависящих от влажности и плотности почвы.

**Ключевые слова:** модель, тепловой режим почвы, теплоемкость почвы, теплопроводность почвы, температуропроводность почвы.

DOI 10.14258/izvasu(2013)1.2-25

**Введение.** Совокупность явлений поступления, переноса и аккумуляции тепла называют *тепловым режимом почвы* [1]. С тепловым режимом почв тесно связаны начало и конец вегетационного периода, пространственное размещение растений, характер распространения корневых систем, скорость поступления к корням питательных элементов.

Теплофизическое состояние почвы характеризуется комплексом теплофизических коэффициентов — теплоемкостью, тепло- и температуропроводностью, соответствующим температурным полем и тепловыми потоками, формирующимися в почвенном профиле. Оно определяется главным образом взаимосвязью почвенно-физических факторов, складывающихся в генетических горизонтах почвы, и атмосферного климата.

Важнейшей составляющей климата почвы является *температурный режим* — процесс изменения температуры почвы во времени и пространстве. Температура почвы существенно влияет на многие протекающие в ней процессы. С температурным режимом связаны внутрипочвенное испарение и транспирация, а температурный градиент оказывает непосредственное влияние на движение воды в почве.

The following tasks are considered: temperature distribution in the soil having non-uniform structure of soil layers; definition of heat-physical characteristics of the soil — a thermal capacity, heat conductivity and heat diffusivity of lixiviated chernozems in the Altai Priobjya. Questions of determination of heat-physical coefficients are investigated at various values of humidity for soil layers; daily and seasonal course of the heat-physical characteristics depending on humidity and density of the soil are researched too.

**Key words:** model, soil thermal regime, soil thermal capacity, heat conductivity of the soil, thermal diffusivity of the soil.

От температуры почвы, как и от ее влажности, зависит интенсивность азотных трансформаций [2, 3]. Поэтому актуальной и практически значимой является задача моделирования теплового режима почвы, а именно, нахождение численных значений комплекса теплофизических параметров.

**Постановка задачи моделирования теплового режима почв.** Теплота, поступающая на поверхность почвы, под действием создаваемого градиента температур перераспределяется в толщине почвенного слоя. Уравнение теплопереноса в почве имеет вид [2, 4]:

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

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

Искомая функция  $T$  должна удовлетворять начальным и некоторым граничным условиям. Нижняя

\* Работа выполнена в рамках программы стратегического развития ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет» на 2012–2016 гг. «Развитие Алтайского государственного университета в целях модернизации экономики и социальной сферы Алтайского края и регионов Сибири» (НОК-2, подпроект 2.1.2.1; мероприятие «Конкурс грантов» — грант № 2013.312.1.66 «Разработка параллельных алгоритмов численного исследования процессов тепло- и массопереноса в многомерных областях для задач рационального природопользования») и государственного задания «Изучение процессов конвекции и теплопереноса в анизотропных областях и областях с границами раздела» № 7.3975.2011.

граница помещается, как правило, на глубине, на которой температура либо постоянна, либо зависит от времени известным образом. В качестве верхнего граничного условия записывается соотношение, обеспечивающее «сшивание» решений задачи в почве

и в приземном воздухе, — условие теплового баланса на поверхности почвы [2, 4].

Рассмотрим двумерную аппроксимацию задачи о распределении температуры в почве, имеющей неоднородную структуру почвенных пластов.

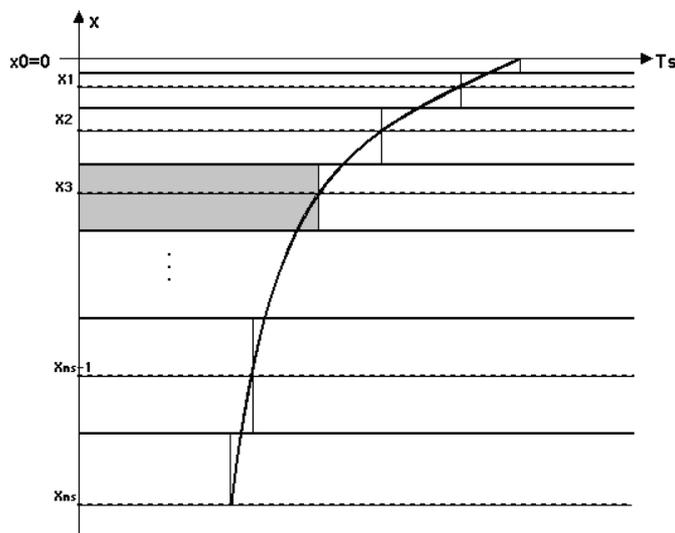


Рис. 1. Разбиение почвы на слои. Вертикальный профиль температуры почвы в период вегетации

Введем коэффициент температуропроводности  $K : K = \frac{\chi}{\rho c}$ , и уравнение (1) преобразуем к виду:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{K}{\rho c} \left[ \frac{\partial(\rho c)}{\partial x} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial(\rho c)}{\partial y} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{1}{\rho c} f(x, y, t). \quad (2)$$

Для численного решения уравнения (2) почвенный компартмент разбивается на слои (рис. 1), а к уравнению (2) применяется численный метод с использованием продольно-поперечной конечно-разностной схемы (метод переменных направлений) [5].

### Результаты численных расчетов

1. При расчете теплового поля суточные колебания температуры почвы затухают уже на глубине 40–60 см; сезонные же изменения распространяются на значительно большую глубину [1, 2, 4]. В модели нижнюю границу поместили на расстоянии 160 см от поверхности почвы. Это объясняется наличием экспериментальных данных и, как было указано, отсутствием суточного хода температуры. Поэтому нижнее граничное условие по температуре на этой глубине внутри каждого суток считается постоянным, а его изменение в сезоне вегетации задается в виде зависимости от температуры воздуха.

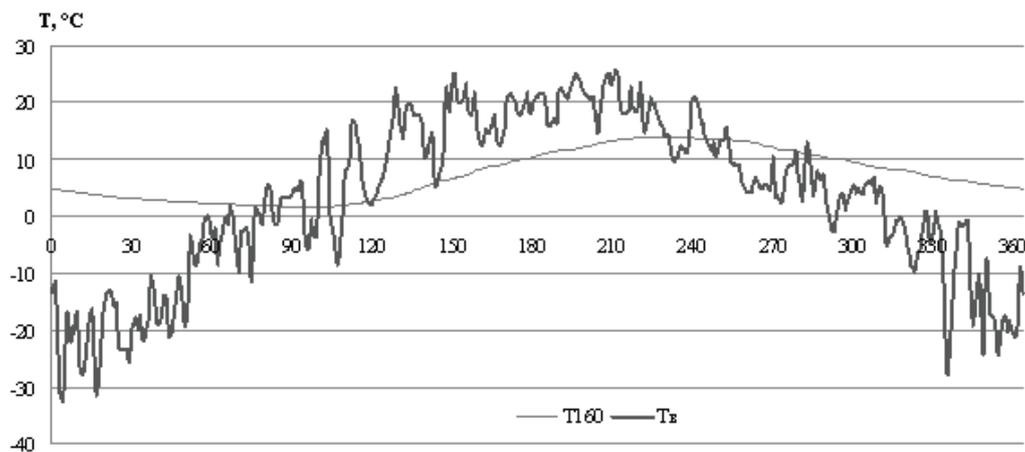


Рис. 2. Характерная зависимость температуры почвы на глубине 160 см и температуры воздуха

2. Анализ многолетних данных показал существование лага, т. е. смещения во времени температуры почвы на глубине 160 см по сравнению с изменением температуры воздуха (рис. 2). Минимум температуры почвы на глубине 160 см наблюдается в апреле, максимум — в сентябре. Наличие смещения позволило определить некоторый средний промежуток времени, на который необходимо сдвинуть уровни одного ряда относительно другого, и построить зависимость температуры почвы на глубине 160 см от температуры воздуха. Коэффициент корреляции между рядами динамики

при этом хорошо характеризует тесноту связи и равен 0,87.

3. В течение каждых суток температура поверхности почвы достигает минимума примерно в момент восхода Солнца, максимума — примерно в 14 ч, после чего вновь уменьшается. Расчет суточного хода температуры почвы на ее поверхности и на глубинах 10 и 20 см приведен на рисунке 3. Температура почвы на глубине 120–160 см не изменяется в течение суток, но имеет явно выраженный сезонный ход (рис. 2). Характерные профили температуры для мая и августа приведены на рисунке 4.

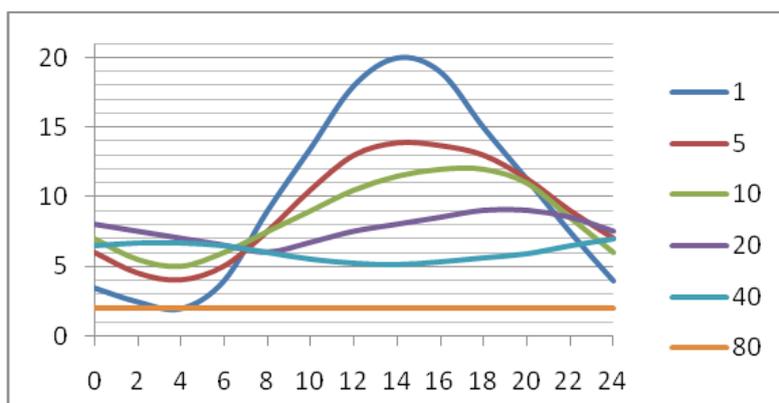


Рис. 3. Суточный ход температуры почвы на различных глубинах

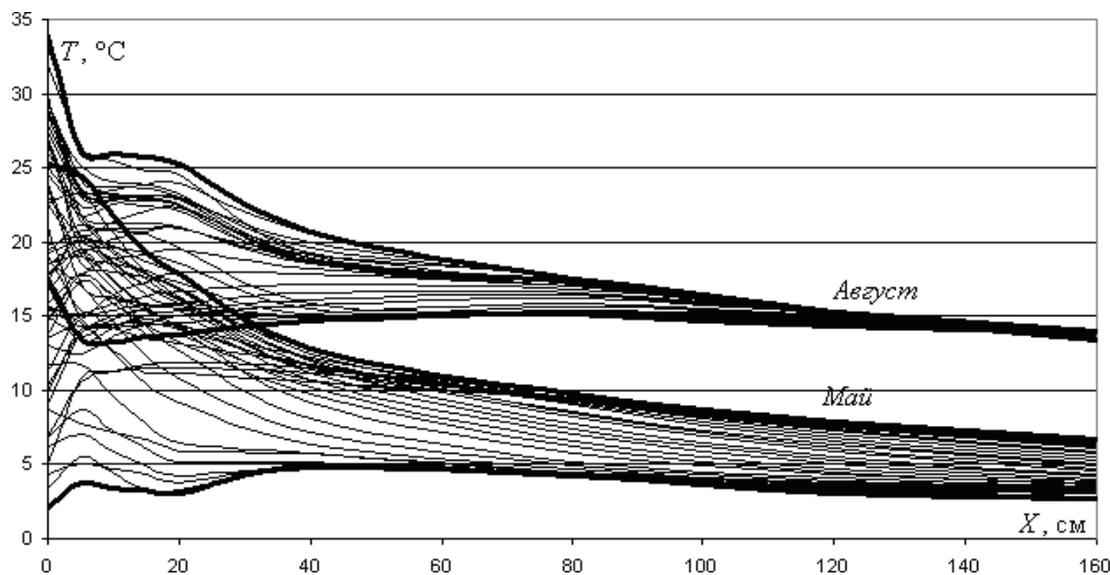


Рис. 4. Профили температуры почвы в различные периоды сезона вегетации

В математическую постановку задачи (2) входят коэффициенты теплоемкости и теплопроводности, которые зависят от влажности и плотности почвы. Объемная теплоемкость почвы определяется по формуле (3):

$$c(w) = (0,2 + w / 100) \rho . \quad (3)$$

Связь теплопроводности и влажности почвы хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью вида (4):

$$\chi(w) = c(w) \cdot (\lambda_1 (w - \lambda_4)^2 + \lambda_2 \rho + \lambda_3) . \quad (4)$$

Неизвестные коэффициенты  $\lambda_i$ , входящие (4), определены по литературным источникам [2, 6] и уточнены при проведении численных экспериментов:

$\lambda_1 = -0.013$ ;  $\lambda_2 = 3.1$ ;  $\lambda_3 = 1.21$ ;  $\lambda_4 = 20$ . Расчетные значения теплофизических коэффициентов приведены в таблице 1.

Численный алгоритм решения задачи реализован на языке Fortran PowerStation для неоднородного компартамента. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по теплофизическим свойствам выщелоченных черноземов Алтайского Приобья. Они близки как по значениям, так и по характеру зависимостей. В то же время они отражают объективные почвенно-физические факторы, такие как плотность сложения профиля, водно-физические свойства. Применение предложенных аппроксимирующих функций позволяет

существенно сократить объем экспериментальных исследований.

Результаты моделирования отражают динамику распределения температур по почвенному профилю в течение суток и в течение года. По результатам проведенных расчетов получены следующие выводы: коэффициент объемной теплоемкости линейно растет при увеличении влажности; коэффициент температуропроводности имеет ярко выраженный максимум при определенных влажностях; коэффициент теплопроводности нелинейно возрастает, стремясь к «насыщению». Теплофизические свойства почвы закономерно изменяются в зависимости от плотности сложения генетических горизонтов.

Значения теплофизических коэффициентов

Почва	Глубина, см	$\rho$	Влажность, %								
			15			20			25		
			C	$\chi \cdot 10^{-3}$	$K \cdot 10^{-3}$	C	$\chi \cdot 10^{-3}$	$K \cdot 10^{-3}$	C	$\chi \cdot 10^{-3}$	$K \cdot 10^{-3}$
Чернозем выщелоченный суглинистый	0–10	1,1	0,3887	1,6856	3,9418	0,44	2,0307	4,196	0,4949	2,1246	3,9031
	10–20	1,12	0,3958	1,7408	3,9268	0,448	2,0954	4,1764	0,5039	2,1945	3,8887
	20–30	1,14	0,4028	1,7968	3,9123	0,456	2,1611	4,1575	0,5129	2,2655	3,8749
	30–40	1,18	0,417	1,9116	3,8847	0,472	2,2954	4,1217	0,5309	2,4108	3,8486
	40–50	1,23	0,4347	2,060	3,8528	0,492	2,4689	4,0802	0,5534	2,5987	3,8182
	50–60	1,34	0,4735	2,4057	3,791	0,536	2,8725	3,9997	0,6029	3,0367	3,7592
	60–70	1,38	0,4877	2,5379	3,771	0,552	3,0267	3,9736	0,6209	3,2044	3,7401
	70–80	1,38	0,4877	2,5379	3,771	0,552	3,0267	3,9736	0,6209	3,2044	3,7401
	80–90	1,41	0,4983	2,6394	3,7567	0,564	3,1449	3,955	0,6344	3,333	3,7265
	90–100	1,45	0,5124	2,7779	3,7386	0,58	3,3061	3,9314	0,6524	3,5085	3,7092
Чернозем выщелоченный тяжелосуглини- стый	0–10	1,02	0,3604	1,4736	4,0078	0,408	1,7818	4,2819	0,4589	1,8563	3,966
	10–20	1,12	0,3958	1,7408	3,9268	0,448	2,0954	4,1764	0,5039	2,1945	3,8887
	20–30	1,21	0,4276	2	3,8653	0,484	2,3988	4,0964	0,5444	2,5227	3,8301
	30–40	1,26	0,4453	2,1516	3,8349	0,504	2,576	4,0568	0,5669	2,7148	3,8011
	40–50	1,26	0,4453	2,1516	3,8349	0,504	2,576	4,0568	0,5669	2,7148	3,8011
	50–60	1,32	0,4665	2,3408	3,8015	0,528	2,7969	4,0133	0,5939	2,9546	3,7692
	60–70	1,32	0,4665	2,3408	3,8015	0,528	2,7969	4,0133	0,5939	2,9546	3,7692
	70–80	1,34	0,4735	2,4057	3,791	0,536	2,8725	3,9997	0,6029	3,0367	3,7592
	80–90	1,35	0,4771	2,4384	3,7859	0,54	2,9107	3,993	0,6074	3,0782	3,7543
	90–100	1,38	0,4877	2,5379	3,771	0,552	3,0267	3,9736	0,6209	3,2044	3,7401

**Заключение.** Непосредственное измерение теплофизических характеристик представляет не простую задачу, так как для проведения полевых исследований требуется надежная приборная база, которая бы позволила получить достоверные данные. Применение громоздких устройств может привести к нарушению естественного сложения почвенного профиля, созданию больших градиентов температур, и, следовательно, к искажению реальных значений термических показателей влажных

почв за счет массопереноса. Поэтому привлечение методов имитационного компьютерного моделирования к описанию теплофизического состояния почв является важной практически значимой задачей. Реальный и компьютерный эксперименты должны стать взаимодополняющими сторонами единого экспериментального метода. Возможности компьютерного моделирования позволят изучить тепловые процессы в почвенном профиле для различных типов почв и природных условий.

### Библиографический список

1. Шеин Е. В. Курс физики почв. — М., 2005.
2. Полуэктов Р. А., Смоляр Э. И., Терлеев В. В., Топаж А. Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. — СПб., 2006.
3. Полуэктов Р. А., Терлеев В. В. Компьютерная модель динамики содержания азота в корнеобитаемом слое почвы // Агрехимия. — 2010. — № 10.
4. Хворова Л. А., Топаж А. Г. Динамическое моделирование и прогнозирование в агрометеорологии. — Барнаул, 2010.
5. Самарский А. А. Методы решения сеточных уравнений. — М., 1978.
6. Агрогидрологические свойства почв юго-восточной части Западной Сибири: справочник. — Л., 1979.