

АГРОЭКОЛОГИЯ

УДК 631.436 (571.15)

С.В. Макарычев, А.Г. Болотов
S.V. Makarychev, A.G. Bolotov

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ФУНКЦИЙ ПОЧВ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

THE SIMULATION OF THERMOPHYSICAL FUNCTIONS OF THE ALTAI REGION'S SOILS

Ключевые слова: температуропроводность, теплопроводность, влажность, теплообмен, моделирование, аппроксимация.

При математическом моделировании температурного поля в почве необходимо знание комплекса теплофизических характеристик, которые в свою очередь определяются рядом почвенно-физических параметров. Наиболее значимый интерес представляет исследование зависимости температуропроводности почвы от влажности. Она является основной теплофизической характеристикой (ОТХ), т. к. входит в общее уравнение теплопроводности, используемое при создании математических моделей теплообмена в почве. Объектами наших исследований явились почвы Алтайского края различного генезиса. Зависимость коэффициентов тепло- и температуропроводности от влажности аппроксимирована функцией, предложенной Т.А. Архангельской. Полученные теплофизические параметры логнормальной модели температуропроводности почв от супесчаного до глинистого гранулометрического состава сведены в таблицу, которая может быть использована в практической деятельности. Полученные результаты использованы при сравнительном анализе теплообменных свойств почвенного

покрова Алтайского края и математическом моделировании его температурного режима.

Keywords: thermal diffusivity, thermal conductivity, moisture content, heat exchange, simulation, approximation.

Mathematical simulation of soil temperature field requires the knowledge of the set of thermophysical characteristics which in turn are determined by a number of soil-physical parameters. The study of soil thermal diffusivity dependence on moisture is of particular interest. This is a key thermal performance curve (TPC) as it enters into the general thermal conductivity equation used in the mathematical simulation of soil heat exchange. The research targets were the Altai Region's soils of different genesis. The dependences of thermal conductivity and thermal diffusivity coefficients on moisture were approximated by the function proposed by T.A. Arkhangel'skaya. The obtained thermophysical parameters of lognormal model of soil thermal diffusivity from sandy loam to clay particle size distribution are summarized in the table which may be used in practice. The results are used in the comparative analysis of the heat exchange properties of the soil cover of the Altai Region and mathematical simulation of its thermal regime.

Макарычев Сергей Владимирович, д.б.н., проф., зав. каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-83-53. E-mail: phys_asau@rambler.ru.

Болотов Андрей Геннадьевич, к.с.-х.н., доцент, каф. физики, Алтайский государственный аграрный университет. Тел.: (3852) 62-83-53. E-mail: agbolotov@gmail.com.

Makarychev Sergey Vladimirovich, Dr. Bio. Sci., Prof., Head, Physics Dept., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-53. E-mail: phys_asau@rambler.ru.

Bolotov Andrey Gennadyevich, Cand. Agr. Sci., Assoc. Prof., Physics Dept., Altai State Agricultural University. Ph.: (3852) 62-83-53. E-mail: agbolotov@gmail.com.

Введение

Почвы относятся к коллоидным капиллярно-пористым телам и представляют собой двухфазную (сухая) или трехфазную (влажная) систему, состоящую из остова-скелета, состоящего из огромного количества твердых частиц разнообразной формы и размера. Они разделены промежутками, заполненными газом, влагой или тем и другим одновременно [1-3].

Теплообмен в почвенном профиле осуществляется четырьмя типами процессов: кондуктивной теплопроводностью, конвекцией и излучением в поровом пространстве и переносом влаги. При малых перепадах температуры передача тепла конвекцией и излучением ничтожно мала по сравнению с теплопроводностью [4].

При математическом моделировании температурного поля в почвах необходимо зна-

ние теплоемкости, теплопроводности или температуропроводности, которые определяются рядом почвенно-физических свойств. Наиболее значимый интерес представляет исследование зависимости коэффициента температуропроводности от влажности, являющейся основной теплофизической функцией, входящие в общее уравнение теплопроводности, используемое при создании математических моделей теплообмена в почве.

В работе [5] рассмотрено использование различных граничных условий синусоидального характера суточного или годового цикла температуры при аналитическом решении уравнения теплопроводности, что позволило получить ряд уравнений для расчета температуропроводности почвы, которые легли в основу нашей работы.

Объекты и методы

Объектами исследований явились серые лесные, дерново-подзолистые, каштановые почвы, а также черноземы Приобья и предгорий и низкогорий Алтая. **Цель** – математическое моделирование процессов теплопереноса в почвах разного генезиса. **Задача** – на основе имеющейся базы экспериментальных данных получить взаимозависимости коэффициента температуропроводности и влагосодержания в почвенном профиле. При этом использовался **метод** моделирования и сравнительного анализа теплообменных свойств почвы.

Результаты исследований

Зависимость коэффициентов температуропроводности (K) от влажности (θ) аппроксимирована нами функцией, предложенной Т.А. Архангельской [6]:

$$K = K_0 + a \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)}{b} \right)^2 \right];$$

$$K = K_0 + a \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)}{b} \right)^2 \right];$$

$$K = K_0 + a \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln \left(\frac{\theta}{\theta_0} \right)}{b} \right)^2 \right],$$

где K_0 , a , b , θ_0 – параметры кривой.

Эти параметры имеют ясный физический смысл: a_0 – температуропроводность сухой почвы; θ_0 – влажность, при которой достигается максимум температуропроводности; a_0+b – максимальная температуропроводность при $\theta = \theta_0$. Параметр c характеризует ширину пика кривой и определяется диапазоном влажности, в котором происходит активный теплоперенос почвенной влаги. Чем меньше величина параметра c и чем выше θ_0 , тем сильнее выражена S-образность кривой. Таким образом, параметры предложенной аппроксимации позволяют численно охарактеризовать не только пределы изменчивости температуропроводности изученных горизонтов с влажностью, но и форму полученных кривых.

Полученные теплофизические параметры логнормальной модели температуропроводности [6] для почвенного покрова Алтайского края приведены в таблице.

Изменение параметра θ_0 характеризует затухающий эффект температуропроводности при увлажнении почвы или отдельных генетических горизонтов разного гранулометрического состава и проявляется при различной влажности: в супесчаных – при 0,13-0,17 $см^3/см^3$, легкосуглинистых – при 0,18-0,23, среднесуглинистых – при 0,21-0,34, а в глинистых – при 0,31-0,38 $см^3/см^3$ [8]. Следовательно, в почвах или горизонтах более легкого гранулометрического состава коэффициенты температуропроводности начинают увеличиваться и достигают наибольшего значения при меньших влажностях, чем в горизонтах с высокой степенью дисперсности. Однако в тяжело-суглинистых серых-лесных почвах лесостепи значение параметра θ_0 составляет 0,20-0,26 $см^3/см^3$. В целом в почвах сухой степи коэффициенты температуропроводности начинают увеличиваться и достигают наибольшего значения при меньших влажностях, чем в почвах колючей степи, лесостепи и предгорий Алтая (Салаира).

Полученные аппроксимационные кривые достаточно точно описывают теоретически полученное распределение коэффициента температуропроводности на различных глубинах, которое значимо не отличается от экспериментального.

Изменение параметра K_0 для различных почв по почвенно-климатическим зонам Алтайского края неоднозначно. Ранее [7, 8] было показано, что указанные пределы влажности соответствуют определенной стадии почвенного увлажнения, причем в менее дисперсных, суглинистых почвенных профилях черноземов Приобского плато этот

предел лежит в интервале увлажнения, равном или близком к влажности разрыва капиллярных связей. В более дисперсных глинистых черноземах, где ВРК не выражена, максимум температуропроводности при-

лижен к ВЗ. Отметим, что в супесчаных почвах или горизонтах он наблюдается при НВ, а в песчаных близок к КВ (капиллярной влагоемкости).

Таблица

Теплофизические параметры логнормальной модели температуропроводности основных типов почв предальтайских равнин

1	Параметр	Ошибка	R	R ²	R ² _{adj}
1	2	3	4	5	6
Дерново-подзолистые почвы супесчаные засушливой степи					
A₁					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	4,33	0,25	0,986	0,972	0,931
b	0,78	0,10			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,13	0,05			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,12	0,37			
A₁A₂					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	4,11	0,46	0,986	0,972	0,930
b	1,06	0,20			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,15	0,24			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,33	0,44			
B₁					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	4,17	0,28	0,999	0,999	0,998
b	1,88	0,09			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,15	0,04			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,72	0,10			
B₂					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	4,05	0,21	0,999	0,998	0,997
b	0,83	0,01			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,14	0,01			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,09	0,03			
C					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	4,37	0,18	0,996	0,992	0,981
b	1,03	0,09			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,17	0,04			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,49	0,25			
Каштановые почвы легкосуглинистые сухой степи					
A_г					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,67	0,51	0,998	0,996	0,986
b	0,75	0,09			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,21	0,05			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,79	0,11			
B₁					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,33	0,36	0,993	0,986	0,944
b	0,72	0,24			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,23	0,20			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,39	0,29			
B₂					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	1,50	0,28	0,997	0,994	0,976
b	0,50	0,06			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,17	0,01			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,51	0,07			

1	2	3	4	5	6
C_k					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,02	0,16	0,999	0,999	0,999
b	0,64	0,03			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,18	0,01			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,25	0,03			
Черноземы выщелоченные легкосуглинистые колючей степи					
A_n					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,50	0,31	0,997	0,994	0,975
b	0,52	0,05			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,27	0,02			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,29	0,09			
AB					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	4,48	0,41	0,995	0,990	0,961
b	0,66	0,12			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,23	0,05			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,75	0,12			
B					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,17	0,27	0,996	0,991	0,982
b	0,77	0,18			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,22	0,08			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,80	0,18			
Черноземы обыкновенные среднесуглинистые колючей степи					
A_n					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,89	0,16	0,997	0,993	0,988
b	0,82	0,05			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,34	0,05			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,51	0,14			
AB					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,33	0,09	0,995	0,991	0,984
b	0,75	0,06			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,32	0,04			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,31	0,15			
B_k					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,24	0,18	0,989	0,978	0,961
b	0,68	0,06			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,28	0,02			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	3,05	0,12			
BC_k					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	1,67	0,14	0,967	0,935	0,886
b	0,61	0,12			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,26	0,04			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,91	0,22			
C					
$a, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	1,33	0,25	0,897	0,865	0,858
b	0,72	0,12			
$\theta_0, \text{ см}^3/\text{см}^3$	0,21	0,05			
$K_0, 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$	2,28	0,21			

1	2	3	4	5	6
Черноземы выщелоченные легкоглинистые предгорий Алтая					
<i>A_n</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,36	0,33	0,941	0,886	0,714
<i>b</i>	0,33	0,13			
θ_0 , см ³ /см ³	0,34	0,03			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	2,19	0,19			
<i>A</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,38	0,25	0,997	0,994	0,986
<i>b</i>	0,52	0,03			
θ_0 , см ³ /см ³	0,39	0,02			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	2,20	0,11			
<i>AB</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,17	0,18	0,987	0,974	0,934
<i>b</i>	0,76	0,12			
θ_0 , см ³ /см ³	0,38	0,08			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	2,39	0,17			
<i>B</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,24	0,12	0,949	0,901	0,826
<i>b</i>	0,58	0,12			
θ_0 , см ³ /см ³	0,34	0,05			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	2,11	0,26			
<i>BC</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,21	0,13	0,997	0,995	0,987
<i>b</i>	0,67	0,04			
θ_0 , см ³ /см ³	0,31	0,02			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	3,36	0,09			
Серые лесные почвы тяжелосуглинистые луговой средней лесостепи					
<i>A₁</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,57	0,21	0,978	0,957	0,892
<i>b</i>	0,61	0,20			
θ_0 , см ³ /см ³	0,25	0,07			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	3,83	0,20			
<i>A₁A₂</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,55	0,19	0,973	0,947	0,868
<i>b</i>	0,57	0,13			
θ_0 , см ³ /см ³	0,24	0,04			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	3,50	0,32			
<i>A₂B₁</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,63	0,18	0,974	0,949	0,871
<i>b</i>	0,38	0,07			
θ_0 , см ³ /см ³	0,20	0,01			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	3,91	0,23			
<i>B₁</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,51	0,21	0,926	0,857	0,641
<i>b</i>	0,51	0,16			
θ_0 , см ³ /см ³	0,16	0,03			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	4,37	0,44			

1	2	3	4	5	6
<i>B</i> ₂					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,44	0,20	0,997	0,993	0,983
<i>b</i>	0,75	0,06			
θ_0 , см ³ /см ³	0,26	0,03			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	3,99	0,09			
<i>C</i>					
<i>a</i> , 10 ⁻⁷ м ² /с	1,48	0,22	0,981	0,963	0,906
<i>b</i>	0,27	0,07			
θ_0 , см ³ /см ³	0,20	0,01			
<i>K</i> ₀ , 10 ⁻⁷ м ² /с	3,13	0,09			

Примечание. R – коэффициент корреляции; R² – коэффициент детерминации; R_{adj} – скорректированный коэффициент детерминации.

Из таблицы следует, что дерново-подзолистые почвы засушливой степи имеют низкие значения *K*₀, несмотря на супесчаный гранулометрический состав, что можно объяснить повышенным уплотнением и низким содержанием органического вещества. В глинистых черноземах предгорий Алтая, имеющих такие же значения параметра *K*₀, наибольшее влияние, вероятно, оказал гранулометрический состав, в частности наличие тонкодисперсных фракций.

Выводы

1. Функция, предложенная Т.А. Архангельской (2008) для агросерых почв центральной части Русской равнины, с достаточной степенью достоверности описывает зависимость теплопроводности от влажности почвенного покрова.
2. Полученные теплофизические параметры использованы при сравнительном анализе теплообменных свойств почв Алтайского края и при математическом моделировании их температурного режима.

Библиографический список

1. Лыков А.В. Теория Теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1952. – 392 с.
2. Нерпин С.В., Чудновский А.Ф. Энерго- и массообмен в системе растение-почва-воздух. – М.: Гидрометеоздат, 1975. – 358 с.
3. Воронин А.Д. Основы гидрофизики почв. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 244 с.
4. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. – М.: Гостехиздат, 1976. – 352 с.
5. Микайылов Ф.Д., Шеин Е.В. Моделирование и прогноз температурного режима почвы // Фундаментальные достижения в почвоведении, экологии, сельском хозяйстве на пути к инновациям: тез. докл. 1 Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – М., 2008. – С. 38-45.

6. Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове: автореф. дис. ... докт. биол. наук. – М., 2008. – 50 с.

7. Панфилов В.П., Чащина Н.И. Особенности поведения влаги в супесчаных и суглинистых автоморфных почвах в связи с их порозностью // Известия СО АН СССР. Биология. – 1975. – Вып. 1. – С. 3-7.

8. Макарычев С.В., Мазиров М.А. Теплофизика почв: методы и свойства. – Суздаль: Изд-во Владимир. НИИСХ, 1996. – 230 с.

References

1. Lykov A.V. Teoriya Teploprovodnosti. – M.: Vysshaya shkola, 1952. – 392 s.
2. Nerpin S.V., Chudnovskii A.F. Energo- i massoobmen v sisteme rastenie-pochva-vozdukh. – M.: Gidrometeozdat, 1975. – 358 s.
3. Voronin A.D. Osnovy gidrofiziki pochv. – M.: Izd-vo MGU, 1986. – 244 s.
4. Chudnovskii A.F. Teplofizika pochv. – M.: Gostekhizdat, 1976. – 352 s.
5. Mikaiylov F.D., Shein E.V. Modelirovanie i prognoz temperaturnogo rezhima pochvy // Fundamental'nye dostizheniya v pochvovedenii, ekologii, sel'skom khozyaistve na puti k innovatsiyam: tez. dokl. 1 Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhd. uchastiem. – M., 2008. – S. 38-45.
6. Arkhangel'skaya T.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya temperatury pochv v kompleksnom pochvennom pokrove: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. – M., 2008. – 50 s.
7. Panfilov V.P., Chashchina N.I. Osobennosti povedeniya vlagi v supeschanykh i suglinistykh avtomorfnnykh pochvakh v svyazi s ikh poroznost'yu // Izvestiya SO AN SSSR. Biologiya. – 1975. – Vyp. 1. – S. 3-7.
8. Makarychev S.V., Mazirov M.A. Teplofizika pochv: metody i svoistva. – Suzdal': Izd-vo Vladimir. NIISKh, 1996. – 230 s.