

6. Pavlov A.V. Itogi i perspektivy statsionarnykh issledovaniy teplovogo balansa i gidrotermicheskogo rezhima pochvy v kriolitozone // *Klimat pochv: sb. nauch. tr. – Pushchino, 1985. – S. 127-131.*

7. Makarychev S.V., Ternovaya L.V. Formirovanie resursov tepla i vlagi v chernozemakh vyshchelochennykh pod ovoshchnymi kul'turami v usloviyakh Pravoberezh'ya reki Obi // *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta. – 2008. – № 2. – S. 35-39.*



УДК 631.436

А.Г. Болотов
A.G. Bolotov

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОПРОВОДНОСТИ ПОЧВЫ

SOIL THERMAL DIFFUSIVITY DETERMINATION METHOD

Ключевые слова: коэффициент температуропроводности почвы, теплофизические свойства почвы, метод температурной волны.

Для аналитического расчета коэффициента температуропроводности по экспериментальным данным термометрии, как правило, применяется метод температурных волн. Степень затухания температурной волны определяется коэффициентом температуропроводности почвы. Однако на относительно коротких промежутках времени, по сравнению с периодом колебания, а также для ангармонических колебаний, к которым относятся колебания температуры почвы, коэффициент температуропроводности невозможно без некоторых допущений определить с помощью данного метода. Предлагается новый метод расчета коэффициента температуропроводности, в основе которого положена электротепловая аналогия в сочетании с теорией сигналов в радиотехнике, позволяющей снять вышеуказанные ограничения. Идея метода заключается в том, что почва рассматривается как фильтр нижних частот, изменяющий энергетический (амплитудный) спектр исходной функции, которую предлагается разложить на элементарные гармоники с разными частотами с помощью преобразования Фурье. В данном случае преобразование Фурье используется как амплитудно-частотная декомпозиция сигнала, то есть обратимый переход от временного пространства в частотное. Дискретное преобразование Фурье может быть рассчитано с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье, что открывает возможности для применения метода во встроенных программных приложениях. Расчет, выполненный на примере чернозема выщелоченного Алтайского Приобья, показал, что полученные значения коэффициента температуропроводности совпадают с литературными данными. Разработанный метод позволяет определить коэффициент температуропроводности почвы по данным режимных наблюдений температуры почвы в естественных условиях. Примене-

ние предлагаемого метода намного упрощает и расширяет возможности определения вышеуказанной величины в полевых условиях долгосрочного теплофизического мониторинга.

Keywords: soil thermal diffusivity, soil thermo-physical properties, temperature wave method.

Generally, temperature wave method is used for analytical calculation of thermal diffusivity from the experimental data of thermometry. The temperature wave attenuation rate is determined by soil thermal diffusivity. However, this method is inapplicable without some assumptions for the determination of thermal diffusivity at relatively short intervals of time compared to the oscillation period and for anharmonic oscillations including soil temperature oscillations. In this study we propose a new method for calculating the thermal diffusivity which is based on electrothermal analogy combined with the radio signal theory enabling removing the above restrictions. The idea of the method is that the soil is regarded as a low-pass filter altering the energy (amplitude) spectrum of the initial function; it is proposed to expand this function into elementary harmonics with different frequencies using the Fourier transform. In this case the Fourier transform is used as the amplitude-frequency decomposition of the signal, i.e. the reversible transition from the temporal domain to frequency domain. The discrete Fourier transform may be calculated using the fast Fourier transform algorithm which enables the application of the method in the built-in software applications. The calculation using the case of the leached chernozem of the Priobye (the Ob River area) of the Altai Region showed that the obtained values of the thermal diffusivity agreed with the literature data. The developed method enables the determination of soil thermal diffusivity from the data of soil temperature regime observations in situ. The application of the proposed method greatly simplifies and extends the possibility of the determination of the above value in the field within long-term thermophysical monitoring.

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

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

Тепловой режим почвы является одним из существенных факторов, определяющих функционирование и продуктивность агроэкосистем [1-9]. Содержание тепла в почве и его перераспределение по профилю зависят от теплофизических свойств почвы. Одним из распространенных методов расчета коэффициента температуропроводности (k) является метод температурных волн [4, 10-14]. В результате периодического теплового воздействия в поверхностном почвенном слое формируется тепловая волна, которая по мере распространения вглубь профиля затухает. Степень затухания температурной волны определяется коэффициентом температуропроводности почвы. При этом температурное поле почвы описывается уравнением Фурье [4, 15]:

$$C_v(z, t) \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(z, t) \frac{\partial T(z, t)}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где $T(z, t)$ – температура;

t – время;

z – глубина;

$C_v(z, t)$ – объемная теплоемкость почвы;

$\lambda(z, t)$ – теплопроводность почвы. При этом

$$\lambda(z, t) = \kappa(z, t) \cdot C_v(z, t).$$

Для верхнего граничного условия гармонического колебания температур:

$$T(0, t) = A \cos(\omega t), \quad (2)$$

где A – амплитуда температурных колебаний на поверхности;

ω – угловая частота вращения Земли.

Задача 1-2 имеет аналитическое решение:

$$T(z, t) = A e^{-z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}}} \cos \left(\omega t - z \sqrt{\frac{\omega}{2\kappa}} \right).$$

Откуда температуропроводность почвы:

$$\kappa = \frac{\omega(z_2 - z_1)^2}{2 \left(\ln \left(\frac{A(z_1)}{A(z_2)} \right) \right)^2}. \quad (3)$$

Однако на относительно коротких промежутках времени, по сравнению с периодом колебания ($t < T/2$, где t – рассматриваемый период, T – период температурной волны), коэффициент температуропроводности невозможно определить с помощью метода температурных волн, т.к. в этом случае не определены амплитуды колебаний температуры на заданных глубинах. Однако это ограничение можно обойти, используя в расчетах информацию о затухании более высокочастотных составляющих, которые, как правило, на практике сглаживаются (аппрок-

симируются). Но реализация этой идеи с помощью метода температурных волн весьма затруднительна, т.к. накладывается ограничение метода, предполагающего в качестве исходного ряда гармонические колебания температур. Также возникает проблема выделения отдельных гармоник из высокочастотной последовательности для нахождения их амплитуд и периода (частоты).

Целью исследований была разработка метода определения коэффициента температуропроводности почвы в естественных условиях. В **задачи** исследований входили вывод рабочей формулы для расчета коэффициента температуропроводности и апробация метода при измерении температуропроводности чернозема выщелоченного Алтайского Приобья.

Объекты и методы

Для решения вышеуказанных проблем предлагается метод расчета температуропроводности почвы, в основе которого положена электротепловая аналогия в сочетании с теорией сигналов в радиотехнике. При этом почва рассматривается как фильтр нижних частот (ФНЧ), изменяющий энергетический (амплитудный) спектр исходной функции, которую предлагается разложить на элементарные гармоники с разными частотами с помощью преобразования Фурье. В данном случае преобразование Фурье используется как амплитудно-частотная декомпозиция сигнала, то есть обратимый переход от временного пространства в частотное. Дискретное преобразование Фурье может быть рассчитано с использованием алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ), что открывает возможности для применения метода во встроенных программных приложениях.

Температура почвы на метеостанции «Научный городок» (WMO ID – 29838), г. Барнаул, получена из массива суточных данных о температуре почвы на глубинах 20 и 40 см за теплый период 2007 г. [16]. Почва – чернозем выщелоченный, среднесуглинистый.

Экспериментальная часть и обсуждение результатов

Рассмотрим элемент почвы в виде прямоугольного параллелепипеда, высотой h и площадью S . В рассматриваемом случае электрическая емкость C соответствует теплоемкости вещества, в данном случае почвы C_s , электрическое сопротивление R – тепловому сопротивлению R_T [17]. Т.е. $C \Rightarrow C_s$,

$$R \Rightarrow R_T, \quad R = \rho \frac{l}{S}, \quad R_T = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{h}{S}.$$

При этом частота среза ФНЧ [18]:

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (5)$$

Подставим в это уравнение теплофизические характеристики почвы:

$$f_c = \frac{\lambda S}{2\pi h C_n} \quad (6)$$

Учитывая, что $c\rho = \frac{C_n}{V}$, получим

$$f_c = \frac{S}{2\pi V h} \cdot \frac{\lambda}{c\rho} \quad (7)$$

т.к. $\kappa = \frac{\lambda}{c\rho}$, а $V = Sh$, то $f_c = \frac{\kappa}{2\pi h^2}$, отсюда

$$\kappa = 2\pi h^2 f_c \quad (8)$$

где h – толщина рассматриваемого слоя, м;

f_c – частота среза, c^{-1} , определяемая как значение частоты при спектральной плотности (H), равной $K \cdot H$, где K – коэффициент передачи фильтра.

Для примера рассмотрим сезонный ход температуры почвы, измеренный на метеостанции «Научный городок» за 2007 г. (рис. 1).

Выделим любой период, отвечающий условию задачи, $t < T/2$, например период 25.04.2007 – 10.06.2007 (1-47-е сут. по оси абсцисс на рис. 2), на начало которого процесс охлаждения почвы сменился на процесс нагревания по всему почвенному профилю.

Получим спектральную плотность полученного массива температур в диапазоне частот составляющих его гармоник (рис. 3).

Найдем K как отношение максимальных спектральных плотностей выходного сигнала к входному: $K = 7,8^\circ\text{C}/11,7^\circ\text{C} \approx 0,7$. При этом частота среза для слоя 20-40 см при $H = 0,7H_{\max} = 0,7 \cdot 7,8^\circ\text{C} = 5,4^\circ\text{C}$ равняется $f_c = 0,054 \text{ сут}^{-1}$, тогда:

$$\kappa_{20/40\text{см}} = 2\pi h^2 f_c = 2\pi \cdot 400,0\text{см}^2 \cdot 5,4 \cdot 10^{-2} \text{сут}^{-1} = 135,6\text{см}^2/\text{сут} = 5,7\text{см}^2/\text{час}$$

или в СИ $\kappa_{20/40\text{см}} = 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, что соответствует литературным данным [3].

Также высокочастотную составляющую можно использовать для расчета температуропроводности в полевых условиях на основе метода импульсного источника тепла. С этой целью воспользуемся формулой для определения температуропроводности с учетом времени действия нагревателя [19]:

$$\kappa = \frac{x^2}{2 \left(\tau_m - \frac{\pi}{4} \tau_n \right)}$$

где τ_m – время максимума теплового импульса;

τ_n – время действия нагревателя;

x – расстояние между нагревателем и датчиком температуры.

Идея применимости лабораторного метода в полевых условиях заключается в том, что в качестве источника тепла используется солнечная радиация. При этом тепловые импульсы – температурная высокочастотная составляющая на поверхности почвы образует в результате действия атмосферного микроклимата (климата). Расстояние между нагревателем и датчиком температуры – толщина рассматриваемого слоя. Например, анализ рисунка 2 позволяет выявить, что на глубине 40 см первый тепловой импульс имеет

$\tau_m = 4 \text{ сут.}$, а $\tau_n = 3 \text{ сут.}$ (время максимума на глубине 20 см). Поэтому температуропроводность почвы для слоя 20-40 см за период 25.04.2007 – 28.04.2007 г. на метеостанции Барнаула будет равна:

$$\begin{aligned} \kappa_{20/40\text{см}} &= \frac{x^2}{2 \left(\tau_m - \frac{\pi}{4} \tau_n \right)} = \\ &= \frac{400\text{см}^2}{2 \left(4\text{сут} - \frac{\pi}{4} \cdot 3\text{сут} \right)} = 121,6\text{см}^2/\text{сут} \end{aligned}$$

За период 25.04.2007-10.06.2007 выделено 7 тепловых импульсов, а среднее значение температуропроводности почвы равняется $128,1 \text{ см}^2/\text{сут.}$, что несколько меньше температуропроводности, рассчитанной по вышепредложенному модифицированному методу температурных волн за этот же период ($\kappa_{20/40\text{см}} = 135,6\text{см}^2/\text{сут}$).

Для меньших периодов расчета необходимо иметь динамику температуры часового или минутного разрешения. Достоинства предлагаемого метода заключаются в отсутствии искусственного нагревателя и связанных с ним энергетических проблем (источник тока), что особенно актуально в полевых условиях долговременного теплофизического мониторинга.

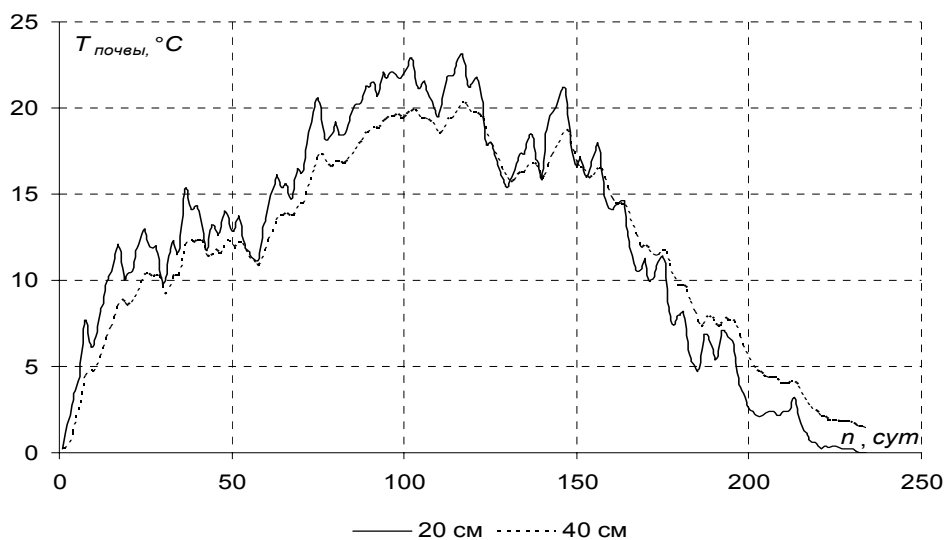


Рис. 1. Сезонный ход температуры почвы (теплый период), метеостанция «Научный городок», г. Барнаул, 2007 г.

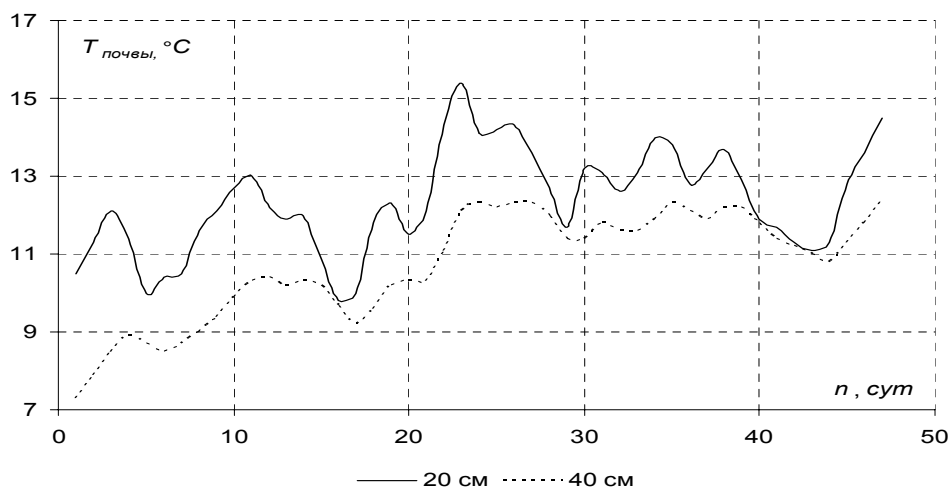


Рис. 2. Температурная составляющая за период 25.04.2007 – 10.06.2007. Метеостанция «Научный городок» (WMO ID – 29838), г. Барнаул, 2007 г.

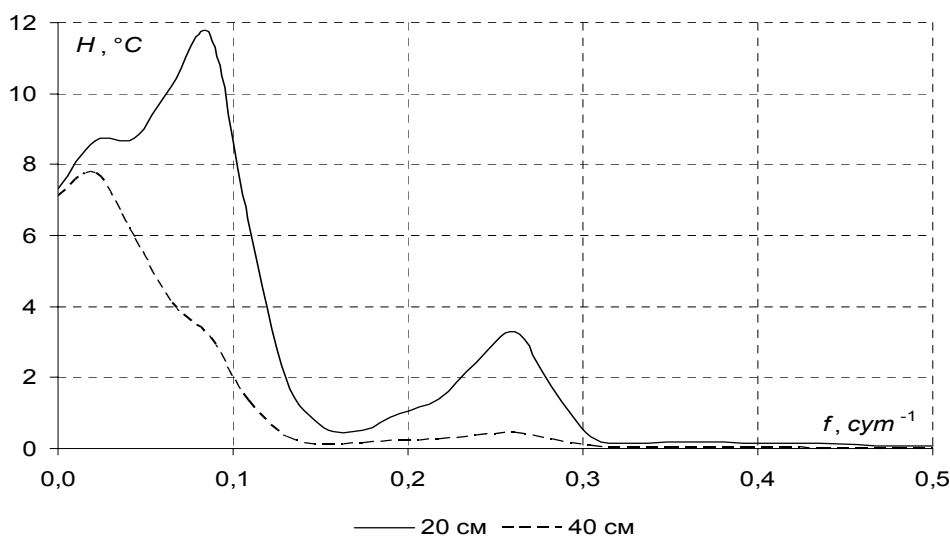


Рис. 3. Спектральная плотность (H) температурной составляющей на глубинах 20 см и 40 см. Метеостанция «Научный городок», г. Барнаул, 2007 г.

Выводы

Разработанный метод позволяет определить коэффициент температуропроводности почвы по данным режимных наблюдений температуры почвы в естественных условиях. Применение предлагаемого метода намного упрощает и расширяет возможности определения вышеуказанной величины в полевых условиях долговременного теплофизического мониторинга.

Библиографический список

1. Weber J.B., Caldwell A.C. Soil and Plant Potassium as Affected by Soil Temperature under Controlled Environment // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1964. – Vol. 28. – P. 661-667.
2. Шульгин А.М. Климат почвы и его регулирование. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 341 с.
3. Макарычев С.В., Мазиров М.А. Теплофизика почв: методы и свойства. – Суздаль, 1996. – 231 с.
4. Архангельская Т.А. Закономерности пространственного распределения температуры почв в комплексном почвенном покрове: автореф. дис. ... докт. биол. наук. – М., 2008. – 50 с.
5. Шматова Т.М., Зубарев Ю.А. Особенности роста и корнеобразования у зеленых черенков облепихи в зависимости от температурных условий // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 4. – С. 54-56.
6. Илли И.Э., Клименко Н.Н., Абрамова И.Н., Кузнецова Е.Н., Половинкина С.В., Парыгин В.В. Влияние температуры при формировании семян на рост тканей прорастающего зародыша яровой пшеницы в условиях Предбайкалья // Достижения науки и техники АПК. – 2014. – № 7. – С. 7-10.
7. Grundmann G.L., Renault P., Rosso L., Bardin R. Differential Effects of Soil Water Content and Temperature on Nitrification and Aeration // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1995. – Vol. 59 (5). – P. 1342-1349.
8. Scanlon D., Moore T.R. 2000. Carbon dioxide production from peatland soil profiles: The influence of temperature, oxic/anoxic conditions and substrate // Soil Science. – 2000. – Vol. 165. – P. 153-160.
9. Nielsen C.B., Groffman P.M., Hamburg S.P., Driscoll Ch.T., Fahey T.J., Hardy J.P. Freezing effects on Carbon and Nitrogen Cycling in Northern Hard-Wood Forest Soils // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2001. – Vol. 65. – P. 1723-1730.
10. Колмогоров А.Н. К вопросу об определении коэффициента температуропроводности почвы // Изв. АН СССР. География и геофизика. – 1950. – № 2. – Т. 14. – С. 97-99.
11. Каганов М.А., Чудновский А.Ф. Об определении коэффициента теплопроводности почв // Изв. АН СССР. География. – 1953 – № 2. – С. 183-191.

12. Цейтин Г.Х. О вычислении коэффициента температуропроводности и потока тепла в почву по осредненным температурам // Тр. ГГО. – 1956. – Вып. 60. – С. 67-80.
13. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967.
14. Микайылов Ф., Шеин Е.В. Теоретические основы экспериментальных методов определения температуропроводности почв // Почвоведение. – 2010. – № 5. – С. 597-605.
15. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М., 1966. – 724 с.
16. Температура почвы на глубинах до 320 см (ежедневные данные) <http://www.meteo.ru/climate/descrip8.htm>.
17. Фокин В.М., Бойков Г.П., Видин Ю.В. Основы технической теплофизики. – М.: Машиностроение, 2004. – 172 с.
18. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
19. Лунин А.И. Импульсный метод определения теплофизических характеристик влажных материалов: дис. ... канд. техн. наук. – М., 1972. – 139 с.

References

1. Weber J.B., Caldwell A.C. Soil and Plant Potassium as Affected by Soil Temperature under Controlled Environment // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1964. – Vol. 28. – P. 661-667.
2. Shul'gin A.M. Klimat pochvy i ego regulirovanie. – L.: Gidrometeoizdat, 1972. – 341 s.
3. Makarychev S.V., Mazirov M.A. Teplofizika pochv: metody i svoistva. – Suzdal' 1996. – 231 s.
4. Arkhangel'skaya T.A. Zakonomernosti prostranstvennogo raspredeleniya temperatury pochv v kompleksnom pochvennom pokrove: avtoref. dis. ... dokt. biol. nauk. – M., 2008. – 50 s.
5. Shmatova T.M., Zubarev Yu.A. Osobennosti rosta i korneobrazovaniya u zelenykh cherenkov oblepikhi v zavisimosti ot temperaturnykh uslovii // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2014. – № 4. – S. 54-56.
6. Illi I.E., Klimenko N.N., Abramova I.N., Kuznetsova E.N., Polovinkina S.V., Parygin V.V. Vliyanie temperatury pri formirovanii semyan na rost tkanei prorastayushchego zarodysha yarovoï pshenitsy v usloviyakh Predbaikal'ya // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. – 2014. – № 7. – S. 7-10.
7. Grundmann G.L., Renault P., Rosso L., Bardin R. Differential Effects of Soil Water Content and Temperature on Nitrification and Aeration // Soil Sci. Soc. Am. J. – 1995. – Vol. 59 (5). – P. 1342-1349.

8. Scanlon D., Moore T.R. 2000. Carbon dioxide production from peatland soil profiles: The influence of temperature, oxic/anoxic conditions and substrate // *Soil Science*. – 2000. – Vol. 165. – P. 153-160.
9. Nielsen C.B., Groffman P.M., Hamburg S.P., Driscoll Ch.T., Fahey T.J., Hardy J.P. Freezing effects on Carbon and Nitrogen Cycling in Northern Hard-Wood Forest Soils // *Soil Sci. Soc. Am. J.* – 2001. – Vol. 65. – P. 1723-1730.
10. Kolmogorov A.N. K voprosu ob opredelenii koeffitsienta temperaturoprovodnosti pochvy // *Izv. AN SSSR. Geografiya i geofizika*. – 1950. – T. 14. – № 2. – S. 97-99.
11. Kaganov M.A., Chudnovskii A.F. Ob opredelenii koeffitsienta teploprovodnosti pochv. // *Izv. AN SSSR. Geografiya*. – 1953. – № 2. – S. 183-191.
12. Tseitin G.Kh. O vychislenii koeffitsienta temperaturoprovodnosti i potoka tepla v pochvu po srednennym temperaturam // *Tr. GGO*. – 1956. – Vyp. 60. – S. 67-80.
13. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti*. – M.: Vysshaya shkola, 1967.
14. Mikaiylov F., Shein E.V. *Teoreticheskie osnovy eksperimental'nykh metodov opredeleniya temperaturoprovodnosti pochv* // *Pochvovedenie*. – 2010. – № 5. – S. 597-605.
15. Tikhonov A.N., Samarskii A.A. *Uravneniya matematicheskoi fiziki*. – M., 1966. – 724 s.
16. Temperatura pochvy na glubinakh do 320 sm (ezhednevnye dannye) <http://www.meteo.ru/climate/descrip8.htm>.
17. Fokin V.M., Boikov G.P., Vidin Yu.V. *Osnovy tekhnicheskoi teplofiziki*. – M.: Mashinostroenie, 2004. – 172 s.
18. Rabiner L., Gould B. *Teoriya i primeneniye tsifrovoy obrabotki signalov*. – M.: Mir, 1978. – 848 s.
19. Lunin A.I. *Impul'snyi metod opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik vlazhnykh materialov: dis. ... kand. tekhn. nauk*. – M., 1972. – 139 s.

