

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СЛОЕ ПОЧВЫ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ОЧАГА ЛЕСНОГО ПОЖАРА

Барановский Н.В.¹, Тойчуев Р.М.², Олалейе О.А.³

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30), e-mail: firedanger@narod.ru

²Институт медицинских проблем Южного отделения Национальной академии наук Кыргызской Республики, Ош, Кыргызская Республика (г. Ош, ул. Узгенская, 130-А), e-mail: impnankr@rambler.ru

³Национальный университет Лесото, Лесото, Южная Африка (г. Рома, 180), e-mail: ao.olaleye@gmail.com

Теплофизика почв является одной из важнейших отраслей технической и агрономической физики. Еще Чудновский А.Ф. указывал, что актуальность проблем теплофизики почв обусловлена влиянием на формирование климата многих энергетических процессов, протекающих в слое почвы. Важное значение имеют тепловые режимы воздействия очагов лесных пожаров на приповерхностные слои почвы. После пожаров в почвах наблюдается изменение физико-химических свойств, водного баланса и деятельности микроорганизмов. Поэтому важной проблемой, требующей своего решения, является разработка математических моделей по оценке влияния тепловых режимов воздействия лесных пожаров на почвы. Цель исследования – разработка математической модели, описывающей теплоперенос в слое почвы в результате воздействия очага возгорания. Впервые представлена наиболее простая одномерная математическая модель оценки влияния тепловых режимов лесных пожаров на приповерхностные слои почвы. Рассматривалась двухслойная структура почвы. Установлено, что значительные изменения температуры почвы происходят только в слое, богатом органикой. Это будет приводить к значительному влиянию на функционирование микробиогеоценозов. Получены распределения температуры в системе «слой глины – слой органики – слой лесного горючего материала – воздух» для различных типов лесных пожаров и в различные моменты времени. Полученные данные могут быть использованы для оценки границ влияния очагов лесных пожаров на функционирование микробиогеоценозов.

Ключевые слова: математическое моделирование, теплоперенос, слои почвы, лесные пожары.

MATHEMATICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN SOIL LAYER AT INFLUENCE OF THE FOREST FIRE CENTRE

Baranovskiy N.V.¹, Toichuev R.M.², Olaleye A.O.³

¹National research Tomsk polytechnic university, Tomsk, Russia (634050, Tomsk, Lenin avenue, 30), e-mail: firedanger@narod.ru

²Institute of medical problems of Southern branch of National academy of sciences of the Kirghiz Republic, Osh, Kirghiz Republic (Osh, Uzgenskaya street, 130-A), e-mail: impnankr@rambler.ru

³National university of Lesotho, Lesotho, Southern Africa (Lesotho, Roma, 180), e-mail: ao.olaleye@gmail.com

The thermophysics of soils is one of the major branches of technical and agronomical physics. Still Chudnovskiy A.F. specified, that the urgency of problems of thermophysics of soils is caused by influence on formation of a climate of many power processes proceeding in a layer of soil. Great value thermal modes of influence of seats of forest fire on surface layers of soil. After fires in soils change of physical and chemical properties, water balance and activity of microorganisms is observed. Therefore the important problem demanding the decision is development of mathematical models according to influence of thermal modes of influence of forest fires on soils. Research objective – development of the mathematical model describing heat transfer in soil layer as a result of influence of the centre of ignition. For the first time the most simple one-dimensional mathematical model of an estimation of influence of thermal modes of forest fires on surface layers of soil is presented. Two-layer structure of soil under consideration. It is established, that considerable changes of soil temperature occurs only in a layer, rich with organic chemistry. That will lead to considerable influence on functioning of microbiogeocenoses. Temperature distributions in system «clay-layer - organic chemistry-layer - forest combustible material-layer - air» for various types of forest fires and during the various moments of time are obtained. The obtained data can be used for an estimation of borders of influence of seats of forest fire on functioning of microbiogeocenoses.

Keywords: forest fire, soil, heat transfer, mathematical model.

Введение

Теплофизика почв является одной из важнейших отраслей технической и агрономической физики [7; 8]. Еще Чудновский А.Ф. указывал, что актуальность проблем теплофизики почв обусловлена влиянием на формирование климата многих энергетических процессов, протекающих в слое почвы.

В последнее столетие лесные пожары превратились в катастрофическое явление [4], которое проявляется во многих государствах мира. К настоящему времени успешно разработана технология прогностического моделирования лесной пожарной опасности [1; 5; 6]. Выходные данные моделей лесной пожарной опасности могут использоваться в системах оценки и прогноза экологических последствий лесных пожаров.

Важное значение имеют тепловые режимы воздействия очагов лесных пожаров на приповерхностные слои почвы [14]. После пожаров в почвах наблюдается изменение физико-химических свойств, водного баланса и деятельности микроорганизмов [9-11; 13]. Поэтому важной проблемой, требующей своего решения, является разработка математических моделей по оценке влияния тепловых режимов воздействия лесных пожаров на почвы.

Цель исследования - разработка базовой математической модели теплового воздействия очага возгорания на слой почвы.

Физическая модель теплового воздействия

Слой почвы рассматривается как двухслойная система [12], в которой могут быть выделены зоны, богатые органикой (верхний горизонт толщиной 5 см), и глины (нижний горизонт толщиной 5 см). Теплопередача в последующие слои в работе учитывается с помощью постановки граничных условий 3-го рода с использованием коэффициента теплопередачи. Полагается, что передача тепла в системе «глина – органика – ЛГМ – воздух» осуществляется только за счет механизма теплопроводности. Рассматривается модельная почва без привязки к конкретному типу почв [3]. Область решения представлена четырьмя слоями: глины, слоя, обогащенного органикой, слоя ЛГМ и воздуха над слоем ЛГМ. На границе раздела слоев выставлены граничные условия 4-го рода. На границе расчетной области задаются невозмущенные значения температуры (температуры в глубине почвы и в воздухе соответственно на нижней и верхней границе) с учетом коэффициентов теплопередачи и теплоотдачи. В слое ЛГМ задана область повышенной температуры, соответствующая очагу возгорания. Для слоя ЛГМ учитывается процесс его термического разложения. Газофазными процессами в слое воздуха в данной версии математической модели пренебрегается. Область решения представлена на рис. 1.

Математическая модель теплового воздействия

В соответствии с физическими допущениями математически процесс распространения тепла в почве описывается системой уравнений теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями.



Рис. 1. Область решения

Уравнение энергии для слоя воздуха:

$$\rho_g c_g \frac{\partial T_g}{\partial t} = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial z^2}, \quad (1)$$

Уравнение энергии для слоя ЛГМ:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} + q_p k_1 \rho_1 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad (2)$$

Уравнение энергии для верхнего слоя почвы:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2}, \quad (3)$$

Уравнение энергии для нижнего слоя почвы:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial z^2}, \quad (4)$$

Граничные условия для уравнений (1)-(4):

$$\Gamma_0 \quad \alpha_1 (T - T_{es}) = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z}, \quad (5.1)$$

$$\Gamma_1 \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial z} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z}, \quad T_3 = T_2, \quad (5.2)$$

$$\Gamma_2 \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z}, \quad T_2 = T_1, \quad (5.3)$$

$$\Gamma_3 \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial z} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z}, \quad T_1 = T_g, \quad (5.4)$$

$$\Gamma_4 \quad \alpha_2 (T_{ea} - T) = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial z}, \quad (5.5)$$

Начальные условия для уравнений (1)-(4):

$$T_i|_{t=0} = T_{i0}, \quad I = g, I-3 \quad (6)$$

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -k_p \rho_1 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT_1}\right), \quad \varphi|_{t=0} = \varphi_0, \quad (7)$$

где $T_i, \rho_i, c_i, \lambda_i$ – температура, плотность, теплоемкость, теплопроводность (g – слоя воздуха, 1 – слоя ЛГМ, 2 – верхнего слоя почвы, 3 – нижнего слоя почвы); q_p – тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ; k_1 – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ; E_1 – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; φ – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ; α_1 – коэффициент теплопередачи; α_2 – коэффициент теплоотдачи; z – пространственная координата; t – временная координата. Индексы es, ea, 0 – соответствуют параметрам окружающей среды в глубине почвы, воздухе и в начальный момент времени.

При численном моделировании использованы следующие исходные данные: $\rho_1 = 1330$ кг/м³; $\rho_2 = 1070$ кг/м³; $\rho_3 = 500$ кг/м³; $\rho_4 = 0.03$ кг/м³; $c_1 = 801$ Дж/(кг·К); $c_2 = 976$ Дж/(кг·К); $c_3 = 1400$ Дж/(кг·К); $c_4 = 1200$ Дж/(кг·К); $\lambda_1 = 0.84$ Вт/(м·К); $\lambda_2 = 0.5$ Вт/(м·К); $\lambda_3 = 0.102$ Вт/(м·К); $\lambda_4 = 0.1$ Вт/(м·К); $q_p = 1000$ Дж/кг; $k_1 = 3.63 \cdot 10^4$; $E_1/R = 9400$ К; $\varphi_{1n} = 1$; $\alpha_1 = 20$ Вт/(м²·К); $\alpha_2 = 80$ Вт/(м²·К).

Результаты и обсуждение

Лесной пожар является многостадийным физико-химическим явлением. Во фронте пожара могут быть выделены зоны предварительного нагрева, испарения влаги, пиролиза органического вещества, пламенного горения лесных горючих материалов и догорание коксового остатка [2].

Кроме того, согласно классификации лесных пожаров они могут быть представлены разными типами. Рассматривались следующие сценарии внешнего очага воздействия на слой почвы [2]:

- 1) огненный шторм (температура в зоне горения 1200 К),
- 2) повальный верховой пожар (температура в зоне горения 1100 К),
- 3) режим перехода низового в верховой пожар (температура в зоне горения 1050 К),
- 4) низовой пожар (температура в зоне горения 1000 К)
- 5) догорание коксового остатка (температура в зоне горения 950 К).

Все очаги моделировались заданием в расчетной области зоны повышенной температуры. Задавалась характерная для сгорания лесных горючих материалов температура внешнего очага воздействия. В процессе воздействия отсутствовало дополнительное выделение тепла от химической реакции окисления газообразных продуктов пиролиза, то есть произведена оценка снизу (минимальное воздействие очага лесного пожара на приповерхностные слои почвы).

Проведено исследование влияния очага возгорания на слой почвы с использованием математической модели (1)-(7). На рис. 2 и 3 представлено распределение температуры в

системе «глина – органика – ЛГМ – воздух» соответственно после 5 и 20 минут активности очага лесного пожара.

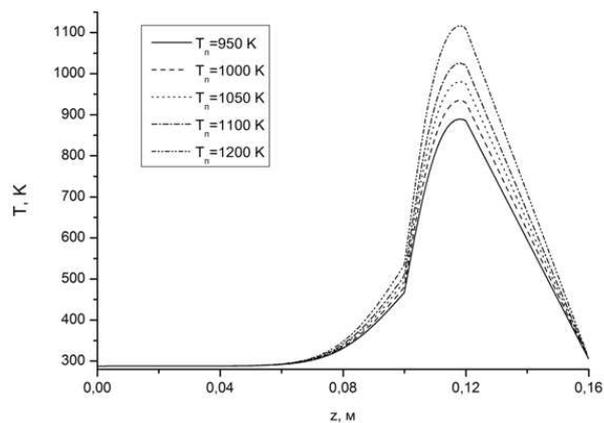


Рис. 2. Распределение температуры в системе «глина-слой органики-ЛГМ-воздух» после 5 минут активности очага пожара

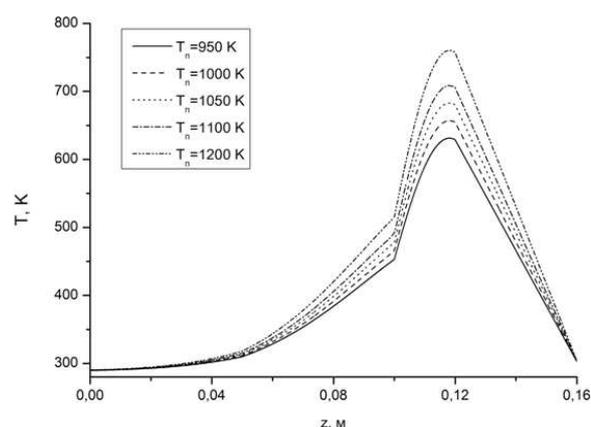


Рис. 3. Распределение температуры в системе «глина-слой органики-ЛГМ-воздух» после 20 минут активности очага пожара

Как видно из рис. 2, при таком непродолжительном воздействии очага лесного пожара достоверные различия в температуре почвы заметны на глубине 1-1.5 см от поверхности раздела сред «почва-ЛГМ». В почве в слое, богатом органикой, на глубине 1.5-1.7 см среда прогревается свыше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и возможно высокотемпературное испарение почвенной влаги. В верхнем сантиметровом слое почвы возможно его обугливание и пиролиз остатков растительности.

Согласно данным рис. 3, при более продолжительном воздействии очага лесного пожара достоверные различия в температуре почвы заметны на глубине 4-5 см от поверхности раздела сред «почва-ЛГМ». В почве в слое, богатом органикой, на глубине 2-2.5 см среда также прогревается свыше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и возможно высокотемпературное испарение почвенной влаги. В верхнем двухсантиметровом слое почвы возможно его обугливание и интенсивный пиролиз остатков растительности.

На рис. 4 и 5 представлена зависимость температуры почвы на глубине 1 см от времени для двух различных периодов воздействия очагов лесных пожаров.

Анализ данных, представленных на рис. 4 и 5, позволяет сделать вывод о значительном воздействии различных очагов лесных пожаров на почвы на глубине 1 см. В этом приповерхностном слое согласно зависимости температуры могут быть выделены зоны инертного прогрева, испарения почвенной влаги и термического разложения растительных остатков и почвенной органики. Например, разница в 30 K наблюдается для самого интенсивного очага лесного пожара (огненный шторм). Понятно, что как кратковременное воздействие, так и длительный процесс горения будут приводить к изменениям в почве.

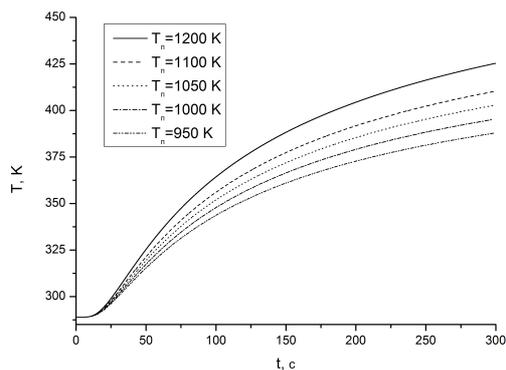


Рис. 4. Зависимость температуры почвы на глубине 1 см от времени (время воздействия 5 минут)

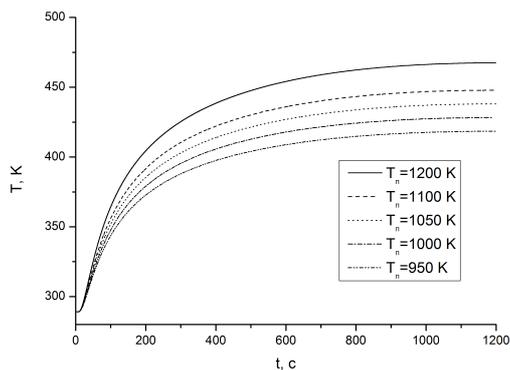


Рис. 5. Зависимость температуры почвы на глубине 1 см от времени (время воздействия 20 минут)

Начальные значения температуры поверхности почвы, окружающего воздуха и почвенных слоев задавались на основе справочных данных. В будущем возможно использование более подробных математических моделей по оценке невозмущенных температурных профилей в почве по вертикальной координате.

Выводы

Впервые представлена наиболее простая одномерная математическая модель оценки влияния тепловых режимов лесных пожаров на приповерхностные слои почвы. Рассматривалась двухслойная структура почвы. Установлено, что значительные изменения температуры почвы происходят только в слое, богатом органикой, что приводит к значительному влиянию на функционирование микробиогеоценозов.

Получены распределения температуры в системе «глина-слой – органика-слой – ЛГМ-слой – воздух» для различных типов лесных пожаров и в различные моменты времени. Полученные данные могут быть использованы для оценки границ влияния очагов лесных пожаров на функционирование микробиогеоценозов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (мероприятие 1.5). Соглашение № 14.В37.21.1979.

Список литературы

1. Барановский Н.В. Численное исследование зажигания слоя лесного горючего материала сфокусированным потоком солнечного излучения // Бутлеровские сообщения. – 2011. – Т. 26. – № 11. – С. 53-60.

2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск : Наука, 1992. – 408 с.
3. Дюкарев А.Г. Ландшафтно-динамические аспекты таежного почвообразования в Западной Сибири. – Томск : Изд-во НТЛ, 2005. – 284 с.
4. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. – Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2009. – 301 с.
5. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании слоя лесного горючего материала нагретой до высоких температур частицей // Бутлеровские сообщения. – 2010. – Т. 22. – № 12. – С. 30-37.
6. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Пространственная постановка и численное исследование задачи о зажигании листового дерева наземным грозовым разрядом // Бутлеровские сообщения. – 2011. – Т. 24. – № 1. – С. 122-132.
7. Макарычев С.В. Структурно-функциональная концепция теплофизического состояния почв // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2008. – № 3. – С. 5-9.
8. Чудновский А.Ф. Теплофизика почв. – М. : Наука, 1976. – 352с.
9. DeVano L.F. The role of fire and soil heating on water repellency in wildland environments: Review // Journal of Hydrology. – 2000. – Vol.231-232. – P. 195-206.
10. Iglesias T., Cala V., Gonzalez J. Mineralogical and chemical modifications in soils affected by a forest fire in the Mediterranean area // The Science of the Total Environment. – 1997. – Vol.204. – No. 1. – P. 89-96.
11. Kim E.-J., Oh J.-E., Chang Y.-S. Does forest fire increase the PCDD/Fs level in soil? // Organohalogen Compounds. – 2001. – Vol. 50. – P. 386-389.
12. Matthews C.J., Cook F.J., Knight J.H., Braddock R.D. Handling the water content discontinuity at the interface between layered soils within a numerical scheme // Australian Journal of Soil Research. – 2005. – Vol. 43. – P. 945-955.
13. Pieticakainen J., Hiukka R., Fritze H. Does short-term heating of forest humus change its properties as a substrate for microbes? // Soil Biology and Biochemistry. – 2000. – Vol. 32. – P. 277-288.
14. Valette J.-C., Gomendy V., Houssard C., Gillon D. Heat transfer in the soil during very low-intensity experimental fires – the role of duff and soil-moisture content // International Journal of Wildland Fire. – 1994. – Vol. 4. – No. 4. – P. 225-237.

Рецензенты:

Баракнин В.Б., д.т.н., доцент, старший научный сотрудник, Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск.

Пахомов М.А., д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, Институт теплофизики СО РАН, г.Новосибирск.