

**Н.В. Барановский, Г.В. Кузнецов**

(Национальный исследовательский Томский политехнический университет;  
e-mail: firedanger@narod.ru)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ПРОЦЕССЫ ЗАЖИГАНИЯ ХВОЙНЫХ ДЕРЕВЬЕВ М-КОМПОНЕНТОВ ПОЛОЖИТЕЛЬНОГО НАЗЕМНОГО ГРОЗОВОГО РАЗРЯДА**

*На основе одномерной трехслойной физико-математической модели зажигания дерева хвойной породы (сосны) проведена оценка влияния М-компонентов наземного грозового разряда и целесообразность их учета в технических системах мониторинга лесной пожарной опасности.*

*Ключевые слова: зажигание, техническая система, лесная пожарная опасность, наземный грозовой разряд.*

**N.V. Baranovskiy, G.V. Kuznetsov**

## **RESEARCH OF INFLUENCE ON PROCESSES OF CONIFEROUS TREE IGNITION OF M-COMPONENTS OF A POSITIVE GROUND LIGHTNING DISCHARGE**

*The estimation of influence of M-components of ground lightning discharge and expediency of their account in technical systems of monitoring of forest fire danger is lead on the basis of one-dimensional three-layer physical and mathematical model of coniferous tree (pine) ignition.*

*Key words: ignition, technical system, forest fire danger, cloud-to-ground lightning discharge.*

Статья поступила в редакцию 7 декабря 2010 г.

### **Введение**

Лесные массивы загораются в результате грозовых разрядов класса облако-земля [1-5]. Основными характеристиками наземных грозовых разрядов являются полярность, пиковый ток удара и напряжение, а также продолжительность действия [6]. М-компоненты (в зарубежной литературе: M-components), впервые описанные в [7], наблюдаются как увеличение яркости канала в течение непрерывного тока (в зарубежной литературе используется термин "continuing current"). М-компоненты могут иметь пик в диапазоне килоампер [8]. Необходимо исследовать влияние М-компонентов на процесс зажигания ствола хвойного дерева, чтобы оценить целесообразность дополнения существующих технических систем и эмпирических [9, 10] и детерминировано-вероятностных [11, 12] методов прогноза лесной пожарной опасности подсистемами учета наличия М-компонентов грозового разряда. В качестве физико-математической модели зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом использована одномерная трехслойная модель [13].

Цель исследования – оценка влияния М-компонентов на процесс зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом, а также определение условий зажигания в зависимости от параметров разряда.

## Физическая постановка задачи

Вследствие того, что подкорковый слой хвойного дерева более насыщен влагой [14], чем смолистая сердцевина, электрический ток разряда молнии в стволе такого дерева проходит преимущественно по наружным слоям, не проникая внутрь. Использована следующая физическая модель. В определенный момент времени в ствол хвойного дерева ударяет грозовой разряд заданной полярности и продолжительности действия. Полагаем, что вольт-амперные характеристики разряда одинаковы для различных сечений ствола дерева. Ток разряда имеет М-компоненты. На рис. 1 представлен типичный разряд с М-компонентами. По оси абсцисс отложено время, по оси ординат – яркость канала в произвольных единицах. Разогрев древесины ствола происходит за счёт Джоулева тепла, выделяемого в подкорковой зоне ствола дерева. В результате протекания электрического тока происходит разогрев древесины и её возгорание. Область решения представлена на рис. 2, где цифрами обозначены зоны: 1 – сердцевина ствола дерева; 2 – подкорковая зона; 3 – кора дерева.

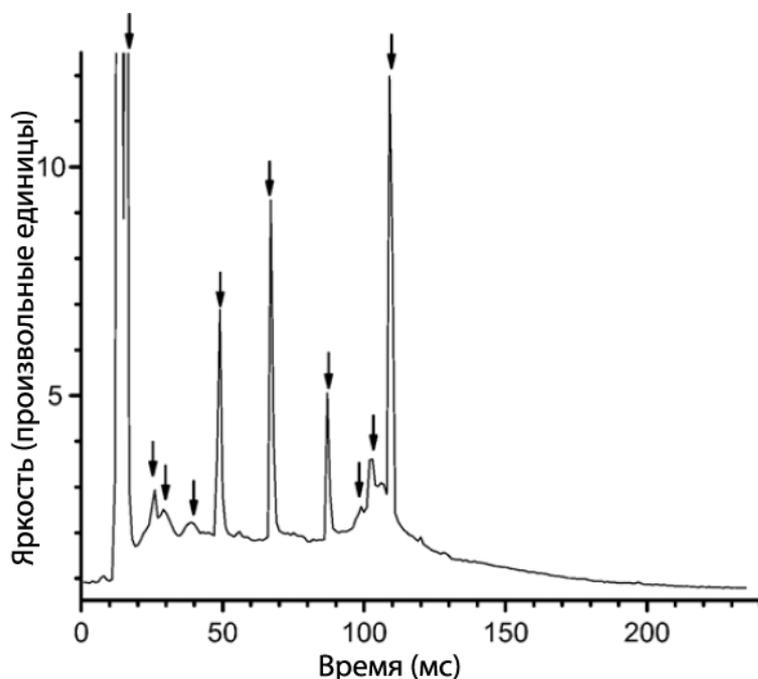


Рис. 1. Разряд с М-компонентами [8]

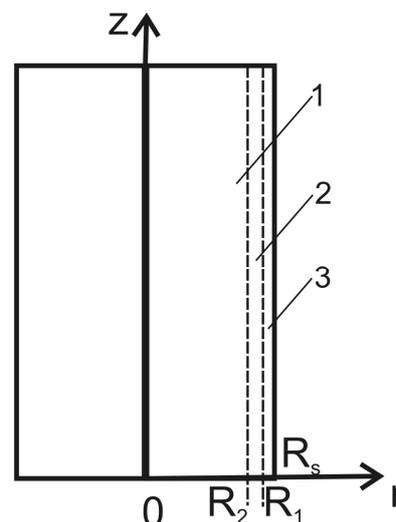


Рис. 2. Схема области решения

## Математическая постановка задачи

Математическая модель [13] описывает теплоперенос с помощью нестационарных уравнений теплопроводности в области 1:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r} \left( r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad (1)$$

в области 2:

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + JU, \quad (2)$$

в области 3:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right). \quad (3)$$

В начальный момент времени температурное поле задается следующими условиями:

$$T_i = T_{in}, i = 1, 2, 3. \quad (4)$$

Граничные условия для уравнений (1)-(3):

$$r = 0, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad (5)$$

$$r = R_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2, \quad (6)$$

$$r = R_1, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad T_2 = T_3, \quad (7)$$

$$r = R_s, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha_e (T_e - T_3), \quad (8)$$

где  $T_i$ ,  $\rho_i$ ,  $\lambda_i$ ,  $c_i$  – температура, плотность, теплопроводность и теплоемкость соответствующих подобластей ( $i = 1, 2, 3$ );

$J$  – сила тока;

$U$  – напряжение;

$\alpha_e$ , – коэффициент теплоотдачи;

$r$  – пространственная координата;

$t$  – время;

$R_s$  – внешний радиус ствола;

$R_1$  – граница раздела коры и подкорковой зоны;

$R_2$  – граница раздела сердцевины ствола и подкорковой зоны.

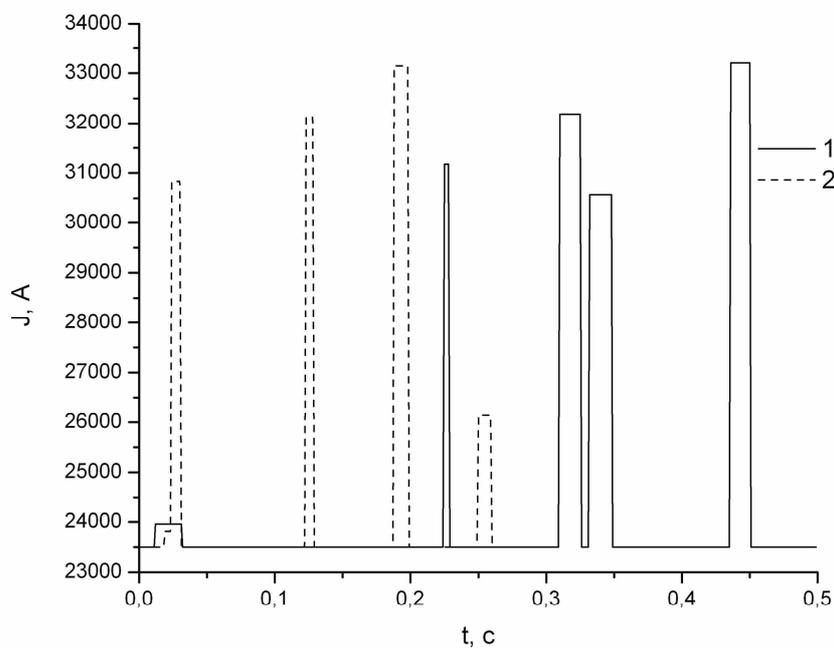
В вычислительных экспериментах использованы исходные данные (деревесина сосны, сердцевина) [15]:  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ ;  $c = 1670 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda = 0.12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ .

Параметры подкоркового слоя:  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ ;  $c = 2600 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda = 0,35 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Теплофизические характеристики коры:  $\rho = 500 \text{ кг/м}^3$ ;  $c = 1670 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ;  $\lambda = 0,12 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ . Геометрические характеристики области решения:  $R_s = 0,25 \text{ м}$ ;  $R_1 = 0,245 \text{ м}$ ;  $R_2 = 0,235 \text{ м}$ ; Параметры внешней среды:  $T_e = 300 \text{ K}$ ,  $\alpha = 80 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ .

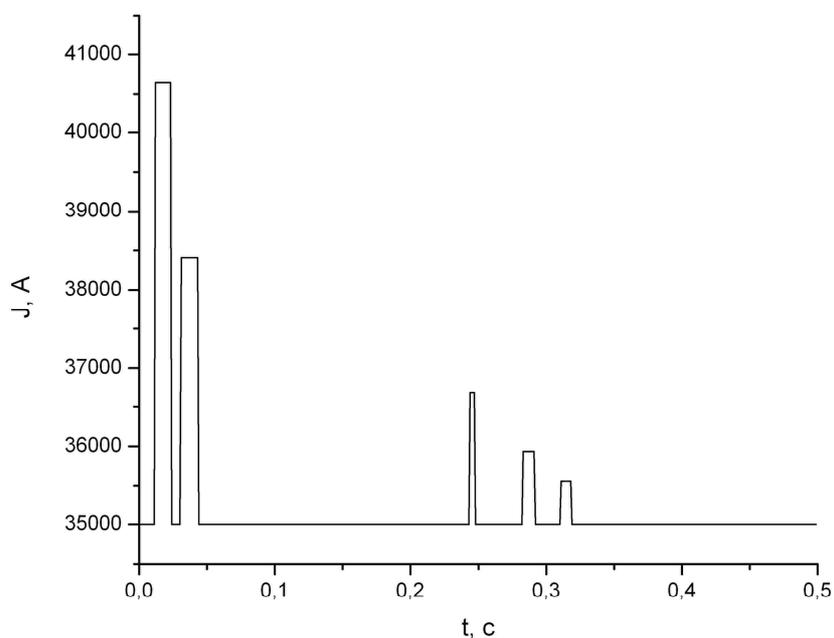
## Результаты численного моделирования и обсуждение

Математическая модель (1)-(3) с краевыми и начальными условиями (4)-(8) реализована конечно-разностным методом [16]. Для решения разностных аналогов одномерных уравнений использовался метод прогонки [16]. В результате экспериментального исследования [15] определены критерии зажигания по температуре и тепловому потоку к поверхности зажигания. Рассматривается сценарий, когда в ствол сосны ударяет разряд отрицательной полярности длительностью 500 мс со средним током удара в 23,5 кА, напряжением 100 кВ [17]. Ток имеет 5 М-компонентов.

На рис. 3 представлена зависимость силы тока наземного грозового разряда и М-компонентов от времени. На рис. 3а кривые 1 и 2 соответствуют разрядам продолжительностью 500 и 300 мс соответственно. На рис. 3б представлена зависимость силы тока и М-компоненты для разряда с большим значением средней силы тока ( $J = 35 \text{ кА}$ ).



а)



б)

**Рис. 3.** Ток и М-компоненты, принятые в вычислительных экспериментах

На рис. 4а, 4в представлены зависимости температуры поверхности зажигания в различные моменты времени для разрядов продолжительностью 500 и 300 мс соответственно. На рис. 4б, 4г представлены зависимости теплового потока к поверхности зажигания от времени для разрядов продолжительностью 500 и 300 мс соответственно. Кривые 1 и 2 соответствуют разрядам с М-компонентами и без них. Рис. 5а иллюстрирует зависимость температуры поверхности зажигания, а рис. 5б – зависимость теплового потока к этой поверхности в различные моменты времени для разряда с большой величиной средней силы тока. Условия зажигания оценивались по следующим критериям [15] (табл. 1):

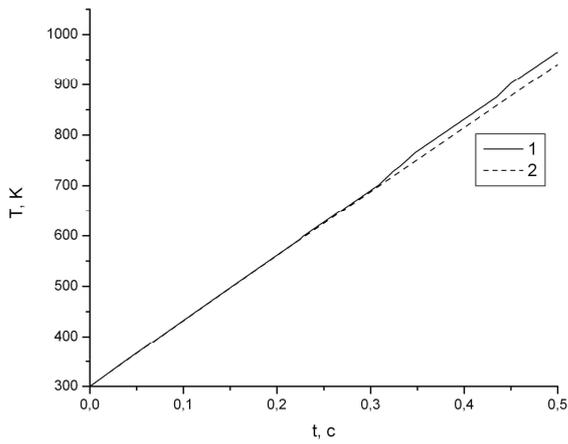
Таблица 1

**Экспериментальные данные о зажигании древесины сосны**

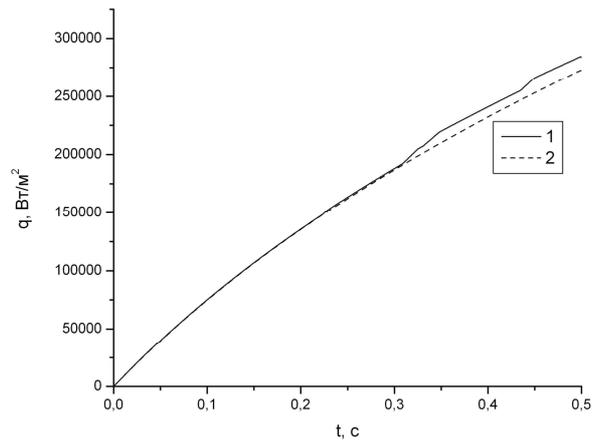
Время задержки зажигания, с	Тепловой поток, кВт/м <sup>2</sup>	Температура поверхности, °К
63,5	12,5	658
45,0	21	700
11,1	42	726
2,6	84	773
0,4	210	867

Анализ результатов (рис. 4) показывает, что условия зажигания выполняются для типичного наземного разряда (продолжительностью около 500 мс). Кратковременный же разряд (продолжительностью менее 500 мс) со средними вольт-амперными характеристиками не приводит к воспламенению ствола хвойного дерева. То есть установлена явная зависимость от времени экспозиции ствола дерева током наземного грозового разряда и процессом его зажигания в результате выделения Джоулева тепла.

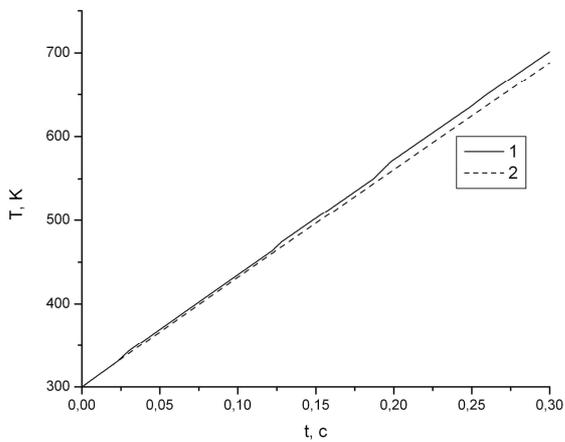
Анализ влияния М-компонентов наземного грозового разряда выявил слабую зависимость процесса зажигания от их наличия. М-компоненты типичных наземных грозовых разрядов лишь незначительно влияют на процесс зажигания хвойного дерева (рис. 4). Влияние же М-компонентов наземного грозового разряда с высоким значением средней силы тока еще менее заметно (рис. 5). Кривые 1 и 2 на рис. 5 практически совпадают.



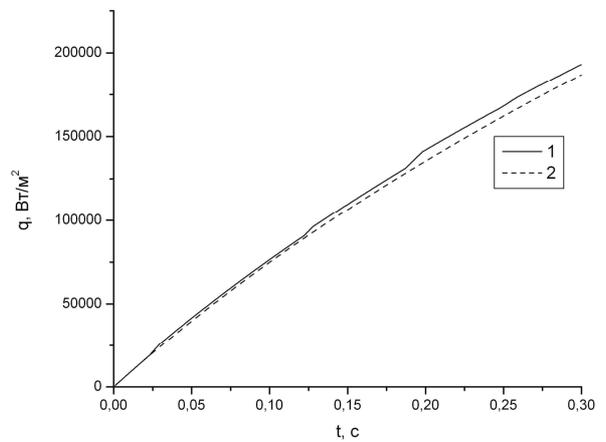
a)



б)

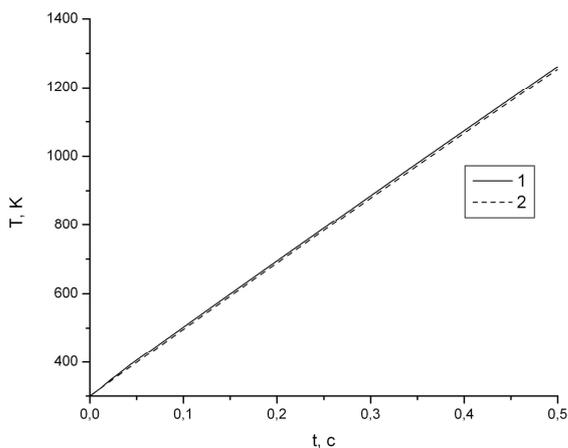


в)

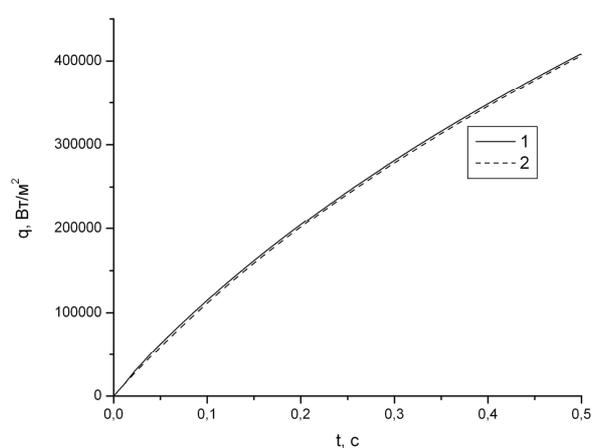


г)

**Рис. 4.** Температура поверхности зажигания и тепловой поток к ней в различные моменты времени (длительный и кратковременный наземные грозовые разряды)



a)



б)

**Рис. 5.** Температура поверхности зажигания и тепловой поток к ней в различные моменты времени (сильноточный наземный грозовой разряд)

## Заключение

Авторами проведена оценка влияния наличия М-компонентов на процесс зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом. Выявлены условия зажигания, которые характерны для типичного диапазона изменения параметров грозового разряда. Установлено, что грозовой разряд продолжительностью около 500 мс приводит к воспламенению ствола хвойного дерева независимо от наличия или отсутствия М-компонентов. Причем зависимость от наличия М-компонентов слабая и падает с увеличением средней силы тока наземного грозового разряда. Также установлена явная зависимость от времени экспозиции ствола дерева током наземного грозового разряда. Кратковременный (менее 300 мс) разряд с типичными вольт-амперными характеристиками не может привести к воспламенению материала ствола хвойного дерева.

Можно сделать вывод, что при разработке прикладного программного обеспечения для целей прогноза лесной пожарной опасности учитывать наличие М-компонентов нет необходимости. Этот факт позволяет оперировать более простыми физико-математическими моделями при построении информационно-прогностических систем для нужд охраны лесов от пожаров. Кроме того, база данных такой системы может не содержать информации по М-компонентам наземного грозового разряда.

С другой стороны, проведено моделирование зажигания хвойного дерева наземным грозовым разрядом в более полной физической постановке, чем в работе [13]. Полученные результаты имеют самостоятельное значение для развития теории лесных пожаров. Местоположение и продолжительность М-компонентов разряда определялось случайным образом из диапазона их изменений, определённого статистически [8]. Программно это реализовано с помощью генератора случайных чисел. Известно, что непрерывный ток имеет различные волновые формы [8] в зависимости от местоположения и продолжительности М-компонентов.

## Литература

1. *Flannigan M.D., Wotton B.M.* Lightning-ignited fires in northwestern Ontario // Canadian Journal of Forest Research, 1991. Vol. 21. P. 277-287.
2. *Кузнецов Г.В., Барановский Н.В.* Прогноз возникновения лесных пожаров и их экологических последствий. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 301 с.
3. *Иванов В.А.* Методологические основы классификации лесов Средней Сибири по степени пожарной опасности от гроз. Дисс. на соиск. уч. степ. д-ра сель.-хоз. наук. Красноярск: СибГТУ, 2006. 350 с.
4. *Lightning-induced* fires in the Alpine region: An increasing problem / Conedera M., Cesti G., Pezzatti G.B., Zumbrunnen T., Spinedi F. // Forest Ecology and Management, 2006. Vol. 234. Supplement 1. P. S68.
5. *Latham D., Williams E.* Lightning and forest fires // Forest fires: Behavior and Ecological Effects. Netherlands, Amsterdam: Elsevier, 2001. P. 375-418.

6. **Burke C.P., Jones D.L.** On the polarity and continuing current in unusually large lightning flashes deduced from ELF events // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 1996. Vol. 58. P. 531 – 548.
7. **Malan D.J., Collens H.** Progressive lightning, III, the fine structure of return lightning strokes // Proc. R. Soc. Lond., A, Math. Phys. Sci., 1937. Vol. 162, P. 175–203.
8. **Waveshapes** of continuing currents and properties of M-components in natural negative cloud-to-ground lightning from high-speed video observations / Campos L.Z.S., Saba M.M.F., Pinto O. Jr., Ballarotti M.G. // Atmospheric Research, 2007. Vol. 84. N 9. P. 302-310.
9. **Курбатский Н.П., Костырина Т.В.** Национальная система расчета пожарной опасности США // Сб. "Обнаружение и анализ лесных пожаров". Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1977. С. 38-90.
10. **Larjavaara M., Kuuluvainen T., Rita H.** Spatial distribution of lightning-ignited fires in Finland // Forest Ecology and Management, 2005. Vol. 208. N 1-3. P. 177-188.
11. **Барановский Н.В.** Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Дисс. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. Томск: Томский государственный университет, 2007. 153 с.
12. **Барановский Н.В.** Влияние антропогенной нагрузки и грозовой активности на вероятность возникновения лесных пожаров // Сибирский экологический журнал, 2004. № 6. С. 835-842.
13. **Кузнецов Г.В., Барановский Н.В.** Математическое моделирование зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом // Пожаровзрывобезопасность. 2008. Т. 17. № 3. С. 41-45.
14. **Эзау К.** Анатомия семенных растений. Книга 1. М.: Мир, 1980. 218 с.
15. **Определение** зон безопасного применения твердотопливных генераторов пожаротушающих аэрозолей / Заболотный А.Е., Заболотная М.М., Заболотная Ю.А., Тимошин В.Н. // Вопросы специального машиностроения. 1995. Вып. 7-8. С. 15-21.
16. **Самарский А.А.** Теория разностных схем. – М.: Наука, 1983. С. 33-36.
17. **A combined** TOA/MDF technology upgrade of the U.S. national lightning detection network / Cummins K.L., Murphy M.J., Bardo E.A., Hiscox W.L., Pyle R.B., Pifer A.E. // Journal of Geophysical Research. 1998. Vol. 103. P. 9035-9044.