

Научная статья

УДК 519.63; DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-12-19

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРАХ

✉ **Асадов Хикмет Гамид оглы;**

**Байрамов Гусейн Закир оглы.**

**Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика**

✉ [asadzade@rambler.ru](mailto:asadzade@rambler.ru)

*Аннотация.* Разработана многозональная одномерная модель на основе одномерной Гауссовой модели возгорания в лесу. Решена оптимизационная задача вычисления среднеинтегральной температуры в лесу с многозональным расположением огня. С использованием гауссовой модели однозонального возгорания показано, что при одномерном многозональном возгорании возникновения зон колоколообразного возгорания средне интегральная температура уменьшается с ростом дистанции до центра многозональных пожаров. Также показано, что оптимальная функция зависимости интенсивности огня от дистанции до центра территории пожара имеет некоторый максимум в некоторой точке, вычисляемой по полученной формуле.

*Ключевые слова:* пожары, модель возгорания, оптимизация, среднеинтегральная температура, гауссова модель

**Для цитирования:** Асадов Х.Г., Байрамов Г.З. Моделирование температурного поля при лесных пожарах // Науч.-аналит. журн. «Вестник С.-Петерб. ун-та ГПС МЧС России». 2024. № 4. С. 12–19. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-12-19.

Scientific article

## SIMULATION OF THE TEMPERATURE FIELD IN CASE OF FOREST FIRES

✉ **Asadov Hikmet Hamid oglu;**

**Bayramov Huseyn Zakir oglu.**

**National aerospace agency, Baku, Republic of Azerbaijan**

✉ [asadzade@rambler.ru](mailto:asadzade@rambler.ru)

*Abstract.* A multi-zone one-dimensional model based on a one-dimensional Gaussian model of forest fire has been developed. The optimization problem of calculating the average integral temperature in a forest with a multi-zone arrangement of fire has been solved. Using the Gaussian model of single-zone ignition, it is shown that with one-dimensional multi-zone ignition of bell-shaped ignition zones, the average integral temperature decreases with increasing distance to the center of multi-zone fires. It is also shown that the optimal function of the dependence of the intensity of fire on the distance to the center of the fire area has a certain maximum at a certain point, calculated by the obtained formula.

*Keywords:* fires, ignition model, optimization, average integral temperature, Gaussian model

**For citation:** Asadov Hikmet Hamid oglu, Bayramov Huseyn Zakir oglu. Simulation of the temperature field in case of forest fires // Scientific and analytical journal «Vestnik Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia». 2024. № 4. P. 12–19. DOI: 10.61260/2218-13X-2024-4-12-19.

## Введение

Как указывается в работах [1–3], горение биомассы является основным источником возникновения аэрозолей и малых газов. Горение биомассы дает четверть глобальной эмиссии «парниковых» газов [4, 5]. Совместно с производственными и антропогенными источниками указанных загрязнителей атмосферы лесные пожары оказываются мощным фактором, приводящим к происходящим климатическим изменениям на планете. Одной из задач противодействия к возникновению и разрушительному воздействию лесных пожаров является изучение динамики происхождения и распространения огня в лесу. Для решения данной задачи в настоящее время используются различные современные технические средства, включая беспилотные летательные аппараты [6, 7]. Для обработки полученных данных от различных технических средств контроля используются такие методы, как кластерный анализ, машинные методы глубокого обучения, методы обработки изображений [8–10]. Вместе с тем эффективность применения указанных средств во многом зависит от верного моделирования динамики возникновения и распространения огня в лесных условиях. Как отмечается в работе [11], одной из трудностей такого моделирования является верное определение зависимости температуры от расстояния до пламени огня в лесу. В работах [11, 12] был изучен тепловой поток ( $\text{кВт/м}^2$ ), исходящий из огня. Это объясняется тем, что тепловой поток может характеризовать различные фазы возгорания, такие как воспламенение и затухание огня. Вместе с тем требование линейности зависимости «вход-выход» в распределенных сетях легко обеспечивается при использовании в них датчиков температуры, а не теплового потока. По этой причине при разработке распределенных систем обнаружения и контроля лесных возгораний следует иметь четкие модельные представления зависимости температуры от расстояния до центра зоны возгорания.

С учетом вышеизложенного, особый интерес представляет модель, предложенная в работе [13], которая предназначена для рассмотрения поверхностных и низковысотных пожаров, где высота огня не превышает 8 м. Согласно этой модели, ее основные показатели связаны следующей системой уравнений [13]:

$$I = 300L^2 ; \quad (1)$$

$$Q = 60 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I}{300D}\right) \right] ; \quad (2)$$

$$T = aQ; a = 10 , \quad (3)$$

где  $I$  – интенсивность огня ( $\text{кВт/м}$ );  $L$  – длина огня (м);  $Q$  – интенсивность тепловой радиации ( $\text{кВт/м}^2$ );  $D$  – расстояние до позиции огня (м).

Как видно из выражений (1, 2) рассматриваемая модель является гауссовой. Графическая иллюстрация этой модели показана на рис. 1.

При увеличении размеров огня растет среднеквадратичное отклонение.

Как показано в работе [14], при использовании подобной модели для случая более высокого пламени (более чем 8 м) были получены схожие результаты зависимости температуры от расстояния  $L$ .

Вместе с тем в одномерной модели лесных пожаров на оси абсцисс будет существовать не один, а несколько колоколообразных фигур, что условно отображено на рис. 2.

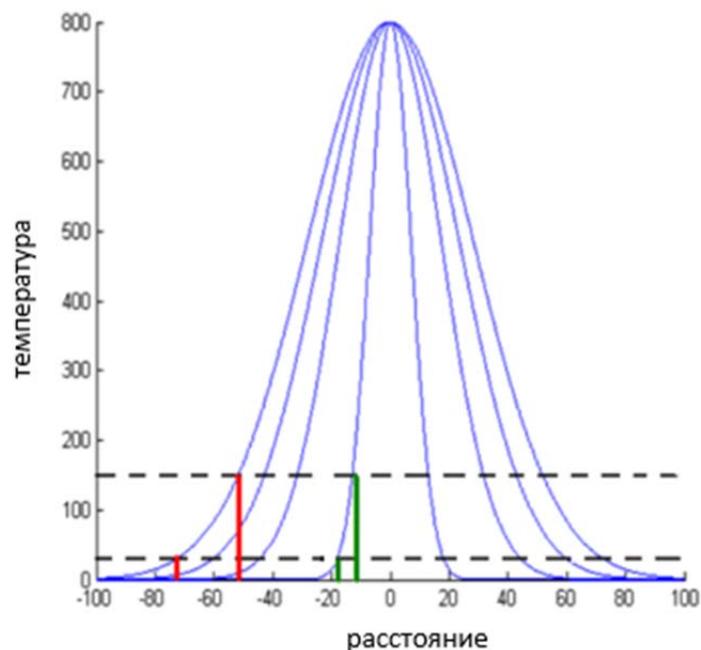


Рис. 1. Семейство гауссовых кривых, показывающих зависимость температуры от расстояния до центра огня

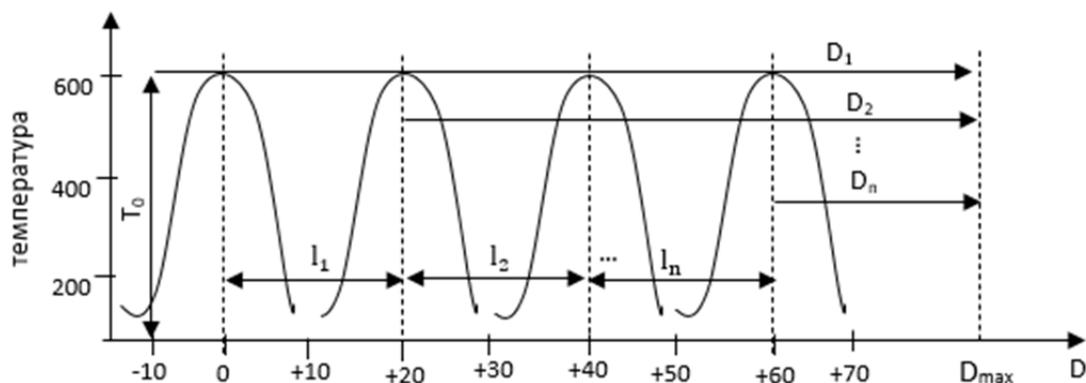


Рис. 2. Мульти-колоколообразная модель лесных пожаров

Рассматривая идеализированную модель, содержащую  $n$ -число колоколообразных импульсов (рис. 2), можно ставить задачу вычисления суммарной интенсивности тепловой радиации в условной точке  $D_{max}$  в виде следующей суммы:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n 60 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I_i}{300D_i}\right) \right], \quad (4)$$

где  $I_i$  – интенсивность огня в зоне  $i$ -го колоколообразного импульса;  $D_i$  – расстояние от  $i$ -го колоколообразного импульса до точки  $D_{max}$ .

Далее, в пределе осуществив переход  $n \rightarrow \infty$ , выражение (4) можно записать в виде интеграла:

$$Q = \int_0^{D_{max}} 60 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I_0}{300D}\right) \right] dD. \quad (5)$$

Отметим, что в модели (5) допущено, что в зонах всех колоколообразных импульсов интенсивность огня одинакова и равна  $I_0$ . Однако очевидно, что в реальном случае это не так и интенсивности огня различны в разных точках на оси  $D$ . Следовательно, можно говорить о реальном существовании неявной функции:

$$I_0 = f(D), \quad (6)$$

с учетом которой интеграл (5) приобретает следующий вид:

$$Q = \int_0^{D_{max}} 60 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I(D)}{300D}\right) \right] dD. \quad (7)$$

Вместе с тем в плане борьбы с лесными пожарами одной из практических целей моделирования является определение той средней дозы интенсивности радиации, которая может быть получена работниками противопожарной службы, ведущих борьбу с огнем в зоне пожара. Далее в настоящей работе анализируется данный вопрос в оптимизационной постановке, обозначающей поиск оптимальной зависимости  $I = I(D)$ , при которой усредненная величина  $Q$  может достичь максимума.

### Материалы и методы

С учетом выражений (2) и (3) получим:

$$T = 60a \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I}{300D}\right) \right].$$

Среднюю температуру, соответствующую среднеинтегральной величине интенсивности тепловой радиации  $Q_{cp}$ , определим как:

$$T_{cp} = \frac{60a}{D_{max}} \int_0^{D_{max}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I}{300D}\right) \right] dD. \quad (8)$$

Аналогично выражению (7) для вычисления  $T_{cp}$  воспользуемся функциональной зависимостью (6). Дополнительно отметим, что выражение (6) характеризует зависимость интенсивности огня с позиции точки  $D_{max}$  (рис. 2).

С учетом выражений (9) и (6) запишем:

$$T_{cp} = \frac{60a}{D_{max}} \int_0^{D_{max}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I(D)}{300D}\right) \right] dD. \quad (9)$$

С учетом выражения (9) ставится задача определения оптимального вида функции  $I(D)$ , при которой  $T_{cp}$  может достичь максимальной величины. Для решения данной задачи к функции (6) применим следующее ограничительное условие:

$$\int_0^{D_{max}} I(D) dD = C; C = const. \quad (10)$$

Ограничение (10) физически означает ограниченность потенциала всего огня, что вызвано ограниченностью горящей биомассы в зоне пожара в типичных лесопосадках. С учетом выражений (9) и (10) можно сформировать целевой функционал  $F_0$  безусловной вариационной оптимизации в виде:

$$F_0 = \frac{60a}{D_{max}} \int_0^{D_{max}} \left[ 1 - \exp\left(\frac{-I(D)}{300D}\right) \right] dD - \lambda \left[ \int_0^{D_{max}} I(D) dD - C \right],$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Согласно работе [15] оптимальная функция  $I(D)_{opt}$  должна удовлетворять следующему условию:

$$\frac{d\left\{1-\exp\left(\frac{-I(D)}{300D}\right)-\lambda I(D)\right\}}{dI(D)} = 0 . \quad (11)$$

Из условия (11) получаем:

$$\frac{1}{300D} \exp\left[\frac{-I(D)}{300D}\right] - \lambda = 0 . \quad (12)$$

Из выражения (12) находим:

$$\exp\left[\frac{-I(D)}{300D}\right] = 300D\lambda . \quad (13)$$

Логарифмируя (13), находим:

$$\frac{-I(D)}{300D} = \log \lambda + \log 300D . \quad (14)$$

Из выражения (14) получаем:

$$I(D) = 300D \left( \log \frac{1}{\lambda} + \log \frac{1}{300D} \right) . \quad (15)$$

Отметим, что полученное решение (15) приводит функционал (8) к ее максимальному значению. Это подтверждается тем, что производная выражения (12) по искомой функции всегда является отрицательной величиной. Для определения множителя Лагранжа воспользуемся выражениями (10) и (15). Имеем:

$$\int_0^{D_{max}} 300D \left( \log \frac{1}{\lambda} + \log \frac{1}{300D} \right) dD = C . \quad (16)$$

Из выражения (16) находим:

$$\left( 300 \log \frac{1}{\lambda} \right) \frac{D_{max}^2}{2} + 300 \int_0^{D_{max}} D \log \left( \frac{1}{300D} \right) dD = C . \quad (17)$$

Из выражения (17) получим:

$$\log \frac{1}{\lambda} = \frac{2\left[C - 300 \int_0^{D_{max}} D \log \left( \frac{1}{300D} \right) dD\right]}{300D_{max}^2} .$$

Во избежание сложных вычислений по формуле (15) обозначим вычисляемую величину как  $\lambda_0$ . В этом случае решение задачи согласно (12) определим как:

$$I(D) = 300D \left( \log \frac{1}{\lambda_0} + \log \frac{1}{300D} \right) . \quad (18)$$

Таким образом, при решении (18) целевой функционал (8) достигает максимума. С учетом выражений (7) и (17) получим:

$$T_{cp,max} = \frac{60a}{D_{max}} \int_0^{D_{max}} [1 - \exp[\log \lambda + \log 300D]] dD .$$

Из выражения (18) получим:

$$T_{cp,max} = \frac{60a}{D_{max}} \int_0^{D_{max}} [1 - \lambda_0 300D] dD = 60a - \lambda_0 D_{max} 30 \cdot 300 . \quad (19)$$

Как видно из выражения (19), с увеличением  $D_{max}$  величина  $T_{cp,max}$  имеет тенденцию к уменьшению.

В то же время, как видно из выражения (16),  $I(D)$  может иметь некоторый экстремум от  $D$ . Имеем:

$$I'(D) = 300 \left( \log \frac{1}{\lambda_0} + \log \frac{1}{300D} \right) - 300D \left( \frac{1}{300D} \right) = 0. \quad (20)$$

Из выражения (20) находим:

$$300 \log \frac{1}{\lambda_0} + \log \frac{1}{300D} = 1. \quad (21)$$

Из выражения (21) находим:

$$\log \frac{1}{300D} = 1 - 300 \log \frac{1}{\lambda_0}. \quad (22)$$

Из выражения (22) получим:

$$\frac{1}{300D} = \exp \left( 1 - 300 \log \frac{1}{\lambda_0} \right)$$

или

$$300D = \exp \left( 300 \log \frac{1}{\lambda_0} - 1 \right);$$

$$D = \frac{\exp[300 \log 1/\lambda_0 - 1]}{300}. \quad (23)$$

Следовательно, в точке, определяемой выражением (23),  $I(D)$  будет иметь максимум. Это подтверждается тем, что производная выражения (5) по  $D$  всегда является отрицательной величиной.

### Выводы

1. На базе одномерной однозональной модели возгорания в лесу разработана модель одномерного многозонального возгорания.

2. Показано, что средняя максимальнодостижимая температура в одномерной многозональной модели уменьшается с ростом максимальной дистанции расположения зон на оси абсцисс при наложении ограничения на интегральную величину интенсивности огня на всей дистанции.

3. Показано, что оптимальная зависимость интенсивности огня, приводящая к максимуму средней температуры в одномерной многозональной модели, имеет максимум в зависимости от дистанции. Приведена формула вычисления оптимальной точки на дистанции, в которой появляется такой максимум.

### Список источников

1. Biomass burning as a source of atmospheric gases: CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl and COS, Nature / P.J. Crutzen [et al.]. 1979. 282:253–256.

2. Crutzen P.J., Andreae M.O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, Science.1990. 250:1669–1678.

3. Biomass Burning Airborne and Spaceborne Experiment in the Amazonas (BASE-A) J. Geophysical Res / Y.J. Kaufman [et al.]. 1992. 97:14581–14599.

4. Particulate and trace gas emissions from large biomass fires in North America / L.F. Radke [et al.] // Global biomass burning. Cambridge, Mass. 1991. P. 209–224.

5. Penner J.E., Dickenson R.E., Neill C.A.O. Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget. Science, 1992. 256:1432–1434.

6. Intelligent video systems for unmanned aerial vehicles based on diffractive optics and deep learning. Proc. SPIE 11516(115161Q) / N.L. Kazanskiy [et al.]. 2020. DOI: 10.1117/12.2566468.
7. Guriev A.T., Aleshko R.A. Adapting the combined database of cartographic and attribute information of forest plantations by automating remote sensing data interpretation. Earth From Space-The most effective solutions. 2009. P. 233–234.
8. Ferreira-Leite F. Incidence and Recurrence of Large Forest Fires in Mainland Portugal // Natural Hazards. 2016. 84. P. 1035–1053.
9. Guede-Fernández F. A deep learning based object identification system for forest fire detection // Fire. 2021. Vol. 4. № 4. P. 75. DOI: 10.3390/fire4040075.
10. Hussin R., Juhari R. Detection using image processing based techniques // Indian Journal of Computer Science and Engineering. 2012. Vol. 41.
11. Butler B., Cohen J. Firefighter Safety Zones: A Theoretical Model Based on Radiative Heating // Int. J. Wildland Fire. 1998. 8 (2):73–77.
12. Temperature Uncertainties for Bare-Bead and Aspirated Thermocouple Measurements in Fire Environments / W. Pitts [et al.] // In Proc. Annual Conference on Fire Research. Nov. 1999. P. 15–16.
13. Kurt F. Prometheus Fire Growth Model: Design and Incorporation of Spotting and Breaching of Fire Break Functionality // Post-Fire Research Workshop. 2005. April, 27.
14. Manolakos E.S., Manatakis D.V., Xanthopoulos G. Temperature field modeling and simulation of wireless sensor network behavior during a spreading wildfire: 16<sup>th</sup> European signal conference (EUSIPCO 2008). Lausanne, Switzerland. 2008. August, 25–29.
15. Эльсгольц Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление. Новосибирск: изд-во «Наука», 1969. 424 с.

### References

1. Biomass burning as a source of atmospheric gases: CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, NO, CH<sub>3</sub>Cl and COS, Nature / P.J. Crutzen [et al.]. 1979. 282:253–256.
2. Crutzen P.J., Andreae M.O. Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, Science.1990. 250:1669–1678.
3. Biomass Burning Airborne and Spaceborne Experiment in the Amazonas (BASE-A) J. Geophysical Res / Y.J. Kaufman [et al.]. 1992. 97:14581–14599.
4. Particulate and trace gas emissions from large biomass fires in North America / L.F. Radke [et al.] // Global biomass burning. Cambridge, Mass. 1991. P. 209–224.
5. Penner J.E., Dickenson R.E., Neill C.A.O. Effects of aerosol from biomass burning on the global radiation budget. Science, 1992. 256:1432–1434.
6. Intelligent video systems for unmanned aerial vehicles based on diffractive optics and deep learning. Proc. SPIE 11516(115161Q) / N.L. Kazanskiy [et al.]. 2020. DOI: 10.1117/12.2566468.
7. Guriev A.T., Aleshko R.A. Adapting the combined database of cartographic and attribute information of forest plantations by automating remote sensing data interpretation. Earth From Space-The most effective solutions. 2009. P. 233–234.
8. Ferreira-Leite F. Incidence and Recurrence of Large Forest Fires in Mainland Portugal // Natural Hazards. 2016. 84. P. 1035–1053.
9. Guede-Fernández F. A deep learning based object identification system for forest fire detection // Fire. 2021. Vol. 4. № 4. P. 75. DOI: 10.3390/fire4040075.
10. Hussin R., Juhari R. Detection using image processing based techniques // Indian Journal of Computer Science and Engineering. 2012. Vol. 41.
11. Butler B., Cohen J. Firefighter Safety Zones: A Theoretical Model Based on Radiative Heating // Int. J. Wildland Fire. 1998. 8 (2):73–77.

12. Temperature Uncertainties for Bare-Bead and Aspirated Thermocouple Measurements in Fire Environments / W. Pitts [et al.] // In Proc. Annual Conference on Fire Research. Nov. 1999. P. 15–16.
13. Kurt F. Prometheus Fire Growth Model: Design and Incorporation of Spotting and Breaching of Fire Break Functionality // Post-Fire Research Workshop. 2005. April, 27.
14. Manolakos E.S., Manatakis D.V., Xanthopoulos G. Temperature field modeling and simulation of wireless sensor network behavior during a spreading wildfire: 16<sup>th</sup> European signal conference (EUSIPCO 2008). Lausanne, Switzerland. 2008. August, 25–29.
15. Ehl'sgol'c L.EH. Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie. Novosibirsk: izd-vo «Nauka», 1969. 424 s.

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 20.09.2024; одобрена после рецензирования: 17.10.2024; принята к публикации: 20.10.2024

**Information about the article:**

The article was submitted to the editorial office: 20.09.2024; approved after review: 17.10.2024; accepted for publication: 20.10.2024

*Сведения об авторах:*

**Асадов Хикмет Гамид оглы**, начальник отдела института аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства (AZ1115, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С.С. Ахундова, стр. 1), доктор технических наук, профессор, e-mail: asadzade@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1180-1535>

**Байрамов Гусейн Закир оглы**, докторант Национального аэрокосмического агентства (AZ1115, Азербайджанская Республика, г. Баку, ул. С.С. Ахундова, стр. 1), e-mail: huseynbayramov0228@gmail.com

*Information about the authors:*

**Asadov Hikmat Hamid oglu**, head of department of research institute of aerospace informatics of National aerospace agency (AZ1115, Azerbaijan republic, Baku city, S.S. Akhundov str. 1), doctor of technical sciences, professor, e-mail: asadzade@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1180-1535>

**Bayramov Huseyn Zakir oglu**, PhD student of National aerospace agency (AZ1115, Azerbaijan Republic, Baku city, S.S. Akhundov. str. 1), e-mail: huseynbayramov0228@gmail.com