

А. С. ВАСИЛЬЕВ, А. В. КРАСНЯЩИХ, В. В. КОРОТАЕВ,  
О. Ю. ЛАШМАНОВ, Д. Ю. ЛЫСЕНКО, А. С. ШИРОКОВ

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕСНОГО ПОЖАРА КАК ИСТОЧНИКА ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Рассмотрены вопросы моделирования лесного пожара как источника инфракрасного излучения. Проанализированы основные компоненты лесного пожара, определяющие его характеристики. Приведен общий алгоритм синтеза тепловизионного изображения лесного пожара.

***Ключевые слова:** лесной пожар, тепловизионное изображение, моделирование лесного пожара, синтез изображения пожара.*

**Введение.** Лесные пожары наносят огромный и часто невосполнимый ущерб природно-экологическим и материальным ресурсам. Только за 2012 г. по данным Федеральной службы государственной статистики России на территории РФ возникло 20,2 тыс. природных пожаров общей площадью 2,1 млн га, выгорело 64 млн кубометров леса [1].

Таким образом, вывод напрашивается сам собой: мониторинг очагов пожаров на территории лесных массивов, их раннее обнаружение и оперативное информирование соответствующих служб — актуальная природоохранная задача, которая должна решаться в комплексе с использованием различных методов и средств.

Наиболее перспективным методом решения данной проблемы является комплексное использование тепловизионных и телевизионных камер, установленных на борту беспилотного летательного аппарата (ЛА) [2]. При этом тепловизионное изображение позволяет зафиксировать активную зону пожара даже в условиях сильного задымления. Телевизионное изображение оптического диапазона позволяет привязать зону пожара к конкретной местности, а также определить направление ветра. Основным источником информации для поиска контуров лесного пожара является его изображение в тепловизионном канале.

**Математическая модель лесного пожара.** Для исследования и разработки алгоритма поиска контуров лесного пожара как источника инфракрасного излучения была создана математическая модель пожара. Модель синтезирует изображение контуров лесного пожара в тепловизионном канале оптической системы с учетом различных параметров (вида пожара, его формы, характеристик окружающей среды, условий наблюдения). Общая структура математической модели лесного пожара представлена на рис. 1.

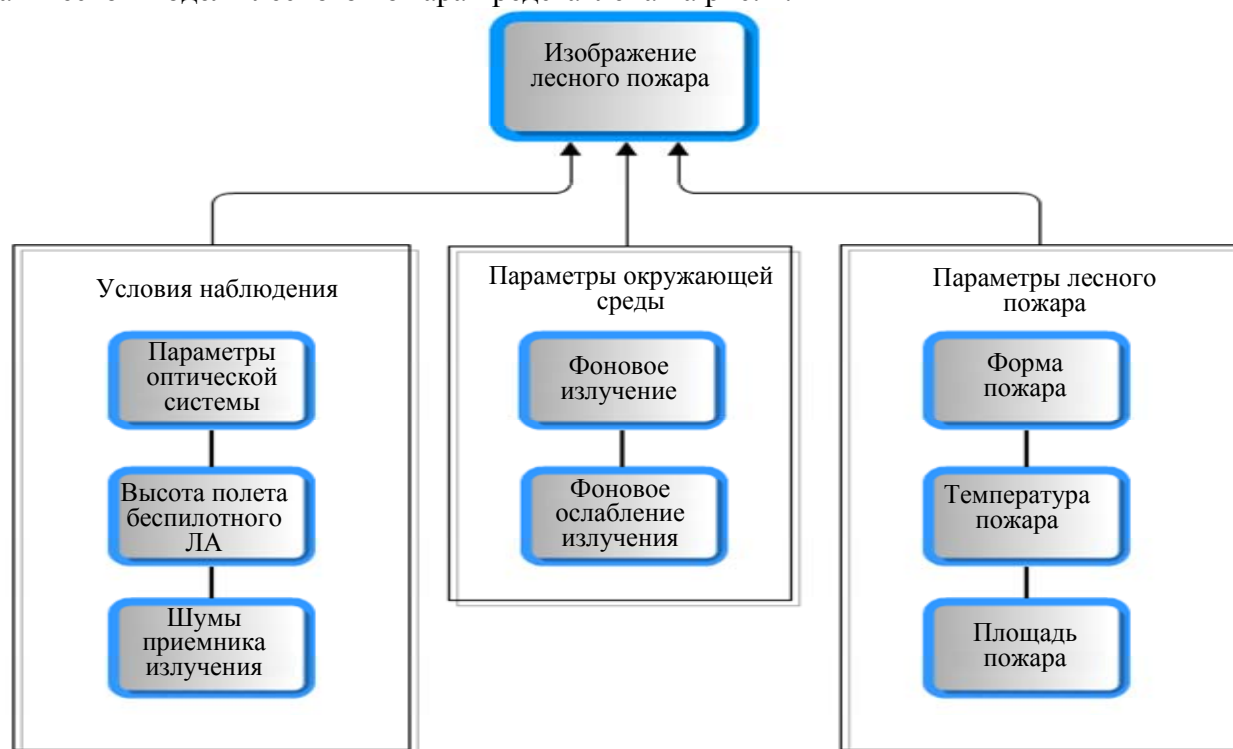


Рис. 1

**Параметры лесного пожара.** Форма пожара постоянно меняется в ходе развития возгорания и зависит от многих факторов — силы и направления ветра, рельефно-ландшафтного состава лесного массива, времени, прошедшего с момента возгорания, и т.п. Наиболее часто встречаются следующие формы:

- округлая форма — наблюдается при равномерном распространении огня в безветренную погоду при однородных горючих материалах и относительно ровной местности;
- неравномерная (разносторонняя) форма — характерна при переменном ветре, разнородных горючих материалах, пересеченной местности;
- эллиптическая (вытянутая) форма — возникает при сильном ветре, относительно ровной местности, однородности горючих материалов.

Границы пожара формируются кромкой, которая имеет ширину 1—3 м на флангах и до 8 м на участке фронта пожара [3].

Для синтеза формы пожара целесообразно использовать каноническое уравнение эллипса на плоскости:

$$\frac{((x - x_0) \cos \varphi)^2}{a^2} + \frac{((y - y_0) \sin \varphi)^2}{b^2} = 1,$$

где  $x_0, y_0$  — положение эллипса на плоскости;  $\varphi$  — угол наклона эллипса к оси  $Ox$ ;  $a, b$  — большая и малая полуось соответственно.

Задавая размеры полуосей эллипса  $a$  и  $b$ , можно получить изображение пожара как округлой, так и эллиптической формы. Соотношение размеров полуосей позволяет имитировать силу ветра, а угол наклона эллипса — направление.

Температура лесного пожара является одной из основных характеристик. Она может отличаться как для различных видов пожара, так и на различных его участках. По температуре можно выделить следующие виды лесного пожара [3]:

- верховой: 900—1200 °С;
- низовой: 400—900 °С;
- подземный: 400—600 °С.

Для реализации модели, формирующей преобразование температуры объекта в видимое изображение, можно использовать прямую зависимость между тепловым контрастом объекта и яркостью его тепловизионного изображения:

$$U(x, y) = \alpha_T \Delta T(x', y'); \quad \Delta T = T(x', y') - T_0,$$

где  $U(x, y)$  — яркость изображения в точке  $(x, y)$ ;  $\alpha_T$  — коэффициент преобразования температуры с учетом спектральной характеристики;  $T(x', y')$  — температура объекта в точке  $(x', y')$ ;  $T_0$  — заданная температура фона.

Площадь возгорания является важнейшим фактором при определении тактики борьбы с лесным пожаром. На основе этого параметра проводится расчет требуемых средств и сил, направляемых на тушение пожара. Выделяют следующие виды пожара по площади:

- загорание: огнем охвачено 0,1—2 га;
- малый: 2—20 га;
- средний: 20—200 га;
- крупный: 200—2000 га.

Для синтеза этого компонента модели необходимо найти зависимость между геометрическими параметрами объекта и его оптическим изображением. В первом приближении такую связь можно определить исходя из законов геометрической оптики. Линейный масштаб изображения рассчитывается на основе значений фокусного расстояния  $f'$  оптической системы и расстояния  $Z$  до объекта [4]:

$$M = f' / Z,$$

тогда площадь объекта в пространстве изображения будет равна

$$S_{\text{из}} = S_{\text{об}} M^2,$$

где  $S_{\text{об}}$  — площадь объекта в пространстве предметов.

**Параметры окружающей среды и условия наблюдения.** Одним из немаловажных параметров, влияющих на правильность принятия решения о наличии пожара, являются шумы. Основными видами шумов в оптико-электронной системе обнаружения пожаров являются шумы фона и шумы приемника.

К фоновому шуму можно отнести фоновое излучение объектов поверхности земли (нагретые в дневное время деревья, камни и т.д.) и фоновое ослабление излучения (атмосферой,

облаком пара и т.д.). Флуктуации инфракрасного излучения наземных фонов обусловлены временными и пространственными градиентами как собственного, так и отраженного излучения, которые, в свою очередь, зависят от температуры, коэффициентов излучения и отражения, положения и структуры объектов, входящих в фоновое образование, условий наблюдения и т.п. При этом большинство фонов в первом приближении можно рассматривать как случайное яркостное поле, которое описывается статистическими методами [5].

Для синтеза фонового шума была применена модель на основе нормального случайного поля. Формирование поля осуществляется с использованием кубической сплайн-интерполяции матрицы со случайными элементами, распределенными по нормальному закону. Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение матрицы для шума фонового излучения рассчитываются на основе значения фоновой температуры, а для шума фонового ослабления — исходя из экспоненциального закона Бугера для оптически однородной среды.

Синтезированные изображения фонового излучения и фонового ослабления представлены на рис. 2, а и б соответственно.

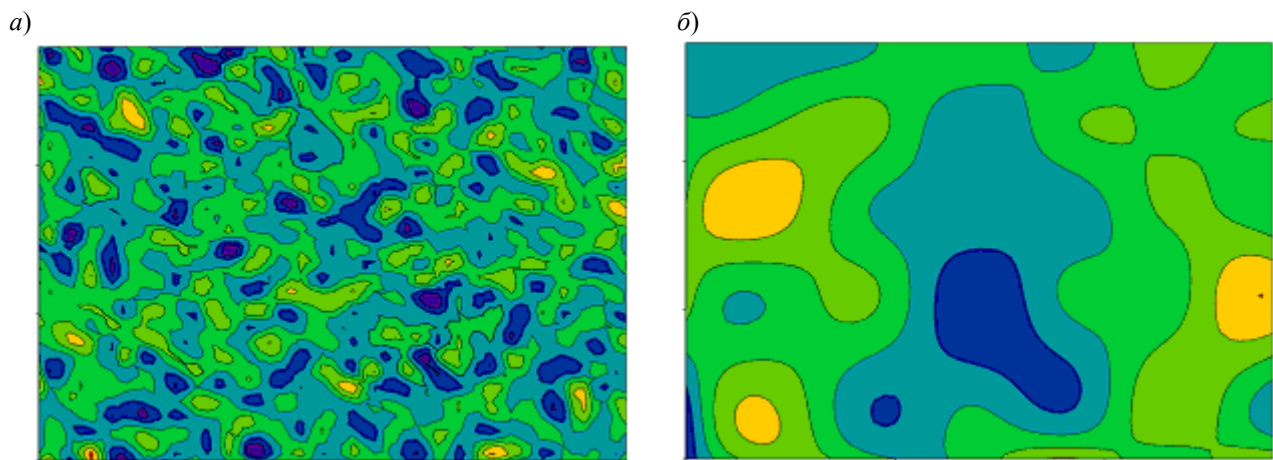


Рис. 2

Шумы приемника имеют различный характер возникновения и определяются как конструкцией приемника, так и процессами формирования сигнала. Результирующий шум приемника может быть синтезирован в виде модели аддитивного белого гауссова шума.

Влияние оптической системы описывается с использованием весовой функции объектива. Для устройства, линзовая оптическая система которого характеризуется малыми (до единиц градусов) углами падения лучей на плоскость входного зрачка, весовая функция объектива может быть аппроксимирована гауссоидой вращения:

$$h(x, y) = \exp\left\{-\frac{(x^2 + y^2)}{2R^2}\right\},$$

где  $R$  — радиус пятна рассеяния.

**Результаты моделирования.** С учетом всех рассмотренных параметров была получена функция синтеза тепловизионного изображения лесного пожара:

$$g(x, y) = \left\{ \left[ f(x(T_{об}), y(T_{об})) M(H, f') + \eta_{фон}(T_{фон}) \right] \eta_{осл}(a_\lambda, l) \right\} h(x, y) + \eta_{пр},$$

где  $f(x(T_{об}), y(T_{об}))$  — функция формирования формы лесного пожара с учетом температуры очага возгорания;  $M(H, f')$  — функция масштабирования изображения, зависящая от высоты и фокусного расстояния объектива;  $\eta_{фон}(T_{фон})$  — функция формирования фона с учетом температуры окружающей среды;  $\eta_{осл}(a_\lambda, l)$  — функция формирования поля ослабления

излучения при прохождении атмосферы с учетом влияния коэффициента пропускания атмосферы  $a_\lambda$  и дистанции прохождения излучения  $l$ ;  $h(x, y)$  — весовая функция оптической системы;  $\eta_{\text{пр}}$  — шумы приемника.

На основе полученной функции в среде математического моделирования MatLab была написана программа синтеза изображения лесного пожара в тепловизионном канале. Результаты моделирования представлены на рис. 3, где  $a$ ,  $b$ ,  $v$  — тепловизионное изображение лесного пожара, полученное с использованием математической модели;  $z$  — реальное изображение.

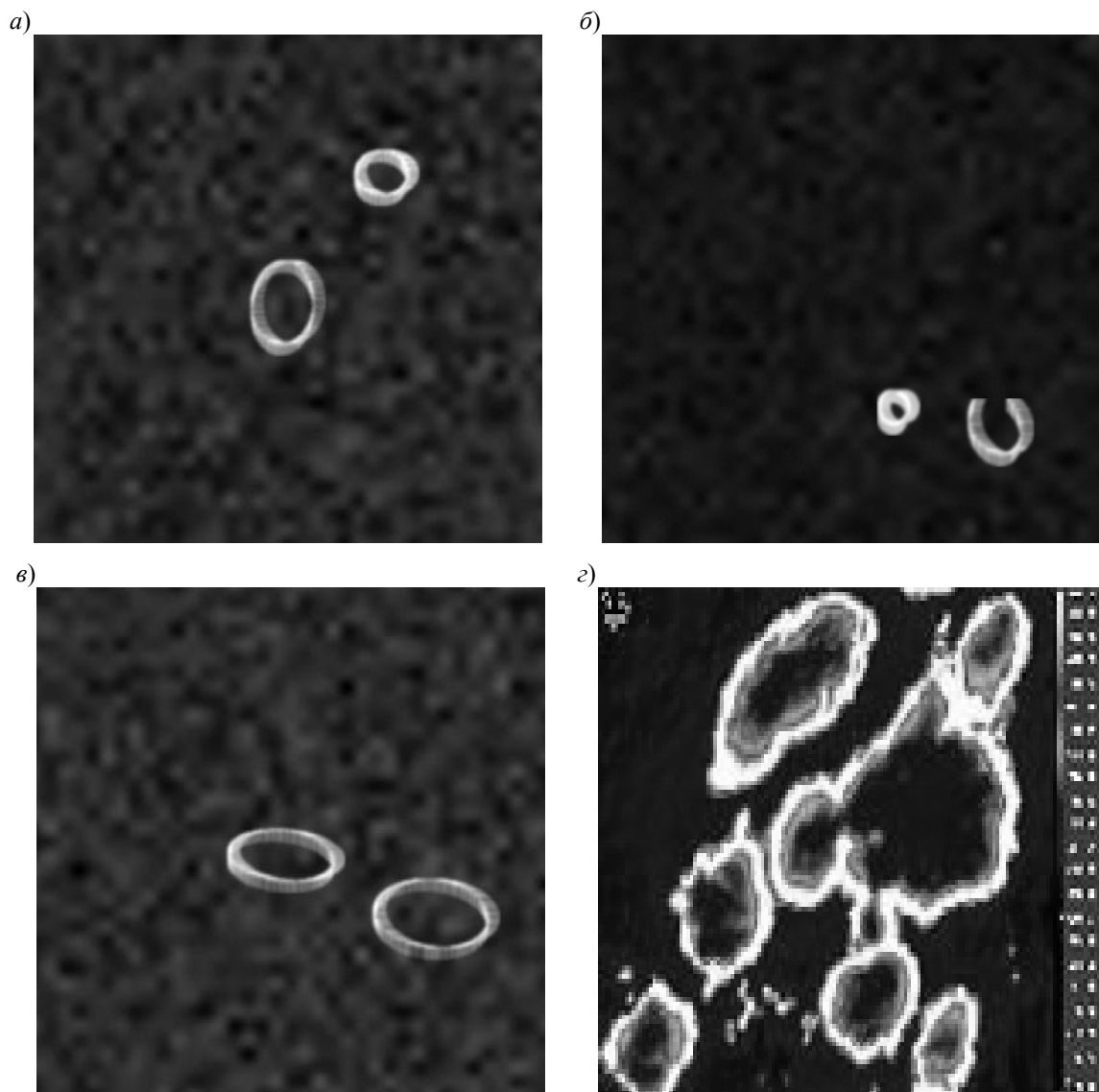


Рис. 3

**Заключение.** На основе разработанной математической модели лесного пожара как источника инфракрасного излучения реализован алгоритм поиска контуров возгораний.

Работа выполнена в рамках создания оптико-электронной системы обнаружения лесных пожаров на базе беспилотного космического аппарата — комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства по теме „Разработка программно-технического комплекса обнаружения и прогнозирования крупномасштабных природных пожаров“, заключенного между Министерством образования и науки Российской Федерации и ЗАО „Транзас“ (Санкт-Петербург) при участии Научно-образовательного центра СПбНИУ ИТМО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]: <[http://www.gks.ru/free\\_doc/new\\_site/business/sx/les2.htm](http://www.gks.ru/free_doc/new_site/business/sx/les2.htm)>.
2. Васильев А. С., Краснящих А. В., Коротаяев В. В., Лашманов О. Ю., Лысенко Д. Ю., Ненарокомов О. Н., Широков А. С., Ярышев С. Н. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 50—55.
3. Щетинский Е. А. Тушение лесных пожаров. М.: ВНИИЛМ, 2002. 104 с.
4. Коротаяев В. В., Краснящих А. В. Телевизионные измерительные системы: Учеб. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. 108 с.
5. Джабиев А. Н., Ишанин Г. Г., Панков Э. Д. Оптическое излучение естественных объектов и фонов и его имитация: Учеб. пособие. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. 199 с.

**Сведения об авторах**

- Александр Сергеевич Васильев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: yoshikawa06@gmail.com
- Андрей Владимирович Краснящих** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: csus@mail.ru
- Валерий Викторович Коротаяев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой; E-mail: korotayev@grv.ifmo.ru
- Олег Юрьевич Лашманов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: o.lashmanov@gmail.com
- Дмитрий Юрьевич Лысенко** — Группа компаний „Транзас“, Санкт-Петербург; руководитель группы проектов; E-mail: Dmitry.Lysenko@transas.com
- Анатолий Сергеевич Широков** — Группа компаний „Транзас“, Санкт-Петербург; ведущий специалист; E-mail: Anatoliy.Shirokov@transas.com

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и  
систем СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
20.09.12 г.