

*Собина В.А., канд. техн. наук, преп., НУГЗУ,  
Соболь А.Н., д-р техн. наук, нач. каф., НУГЗУ,  
Тригуб В.В., канд. техн. наук, доц., НУГЗУ,  
Олениченко Ю.А., ад'юнкт, НУГЗУ*

## **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВИЗОРНОГО МОНИТОРИНГА ПОЖАРОВ НА ПОЛИГОНАХ ТВЁРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ**

В работе рассмотрена математическая модель тепловизорного мониторинга пожаров на полигонах твёрдых бытовых отходов на ранней стадии их возникновения. Приведена общая постановка задачи оптимального размещения средств мониторинга.

**Ключевые слова:** математическая модель, тепловизор, инфракрасное излучение

**Постановка проблемы.** В настоящее время существует проблема, связанная с недостаточностью мер, направленных на раннее обнаружение и своевременное тушение ландшафтных пожаров и пожаров на полигонах твёрдых бытовых отходов (ТБО), что приводит к их распространению на огромные площади, экологическим катастрофам и колоссальным материальным потерям. Современные исследования в этой области свидетельствуют о том, что угрозы пожаров на полигонах (ТБО) в ближайшем будущем будут только возрастать, в том числе и в связи с климатическими изменениями.

Становится очевидным, что активный мониторинг территории полигонов ТБО, раннее обнаружение очагов возгорания и оперативное информирование соответствующих служб являются актуальными задачами предупреждения пожаров на данных объектах. Таким образом, существует острая необходимость в создании качественно новой и эффективной технологии обнаружения очагов пожаров на полигонах ТБО на ранних стадиях возгорания.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существующие подходы к мониторингу ландшафтных пожаров и пожаров на полигонах ТБО имеют следующие недостатки:

1. При визуальном обнаружении пожара наблюдатель с помощью азимутального круга определяет направление на пожар и сообщает это направление в центр контроля с помощью средств связи. Из центра контроля производится определение, с какой еще вышки может быть обнаружен этот пожар, и производится связь с другим наблюдателем, который также обнаруживает пожар и определяет направление на него. После чего в центре контроля, используя известные направления с вышек на пожар, с помощью карты определяют местонахождение предполагаемого пожара и предпринимают меры для его ликвидации [1]. Недостатки данного способа очевидны – необходимость постоянного использования человеческих ресурсов в каждой точке расположения вышки и отсутствие возможности автоматизации процессов обнаружения и оповещения.

2. При авиационном мониторинге пилот на летательном аппарате (самолет, вертолет), оснащенный сканирующим тепловизором микроволнового диапазона и инфракрасными датчиками, с определенной периодичностью совершает облет полигонов. При обнаружении пожара производится определение его координат с их последующей передачей в центр контроля [2].

Недостатки способа определяются высокой стоимостью летного часа и невозможностью ведения постоянного мониторинга больших территорий, что может послужить причиной позднего обнаружения пожара. Также стоит отметить сильную зависимость чувствительности регистрирующей аппаратуры от широты обзора.

Использование беспилотных летательных аппаратов может несколько снизить стоимость летного часа, однако не избавляет от риска несвоевременного обнаружения пожара. Кроме того, стоимость беспилотного летательного аппарата достаточно высока.

3. При спутниковом мониторинге специализированные спутники, находящиеся на негеостационарных орбитах, производят снимки земной поверхности в инфракрасном диапазоне при помощи так называемых радиометров с последующей передачей их на наземную станцию для детального анализа [3]. На основе разности температуры поверхности земли и температуры очага возгорания возможно определить его

приблизительное местоположение. Можно выделить следующие недостатки данного подхода. Во-первых, требуемая для достоверного обнаружения площадь возгорания, как правило, составляет не менее 1 гектара, что делает обнаружение пожара на ранней стадии не просто затруднительным, а практически невозможным. Во-вторых, сильное влияние метеоусловий – облачность и сильный ветер могут привести к задержкам или даже невозможности обнаружения пожара, что помимо повышения угрозы от пожара увеличивает стоимость его ликвидации. Кроме того, недостаточна оперативность самого процесса мониторинга и передачи данных (до 4 раз в сутки). Не стоит забывать и о дороговизне ввода спутника в эксплуатацию, которая ставит под сомнение целесообразность спутникового мониторинга.

4. В работе [4] предложено использование для мониторинга полигонов ТБО термоподвесок. Вместе с тем, при возникновении очага возгорания и несвоевременном реагировании соответствующих подразделений, при тушении пожара, термоподвеска может быть выведена из строя, что в дальнейшем может сказаться на достоверности построения тепловых полей.

Таким образом, существует необходимость в разработке такого подхода к мониторингу ландшафтных пожаров и пожаров на полигонах ТБО, который исключил бы вышеперечисленные недостатки. Одним из таких подходов является использование тепловизионного мониторинга [5-7]. Тактико-технические характеристики тепловизоров приведены, например, в [8-10].

**Постановка задачи и её решение.** Целью данной работы является разработка математической модели оптимального размещения тепловизоров для мониторинга пожаров на полигонах ТБО.

Рассмотрим постановку данной задачи. Представим полигон ТБО в виде геометрического объекта, горизонтальная проекция которого представляет собой, в общем случае, многоугольник  $S_0$ . Для мониторинга пожаров на полигоне  $S_0$  будем использовать тепловизоры  $S_i$ ,  $i = 1, \dots, N$ , которые обладают следующими характеристиками:

– размер чувствительного детектора (матрицы)  $p_{i,x}$ ,  $p_{i,y}$ , в пикселях;

– параметры объектива FOV (field of view)  $\gamma_{i,x}$ ,  $\gamma_{i,y}$ , в градусах. Данные параметры называются полем зрения тепловизора. Встречаются и другие определения этого параметра, такие как угол обзора, угол зрения, угол визирования, угловое пространство. Это параметр объектива тепловизора, описывающий размеры пространства при снимке объекта.

Следует отметить, что область обзора тепловизора имеет вид прямоугольника  $S'_i$ ,  $i \in \{1, \dots, N\}$  [11], горизонтальная проекция которого  $S''_i$  определяется параметрами  $a_i(p_{i,x}; \gamma_{i,x}; D_i)$  и  $b_i(p_{i,y}; \gamma_{i,y}; D_i)$ , где  $D_i$  - расстояние от тепловизора до контролируемого объекта. Также необходимо рассмотреть такой параметр, как минимальное расстояние  $\rho_{\min}$  от полигона ТБО до вышек с тепловизорами.

Для определения параметров очага пожара необходимо, чтобы тепловизоры размещались вдоль ортогональных координатных осей, которые, в свою очередь, будут параллельны сторонам габаритного прямоугольника для  $S_0$ .

Необходимо определить минимальное количество тепловизоров (в том числе вдоль каждой оси), горизонтальные проекции областей обзора которых  $S''_i$  будут полностью покрывать горизонтальную проекцию  $S_0$ , и при этом параметр контролируемого объекта (очага пожара) не превышал заданного.

Математическую модель оптимального размещения тепловизоров для мониторинга пожаров на полигонах ТБО запишем в следующем виде

$$\min_{u \in W} N(u_i, a_i, b_i); u_i = \{x_i; y_i\}; i = 1, \dots, N; N = N_x + N_y; \quad (1)$$

где  $W$

$$\omega \left( p_{N_x}, \{x_{0,1}; y_{0,1}; \dots; x_{0,n}; y_{0,n}\}, \{0; 0\}, \{x_0; y_0\} \right) = S_0; \quad (2)$$

$$\omega \left( \{a_j; b_j\}, \{a_k; b_k\}, \{x_j; y_j\}, \{x_k; y_k\} \right) \rightarrow \min; \quad (3)$$

$$j = 1, \dots, N_x; k = j + 1, \dots, N_x;$$

$$\omega \left( \bigcup_{l=1}^{N_y} S_l, \{x_{0,1}; y_{0,1}; \dots; x_{0,n}; y_{0,n}\}, \{0; 0\}, \{x_0; y_0\} \right) = S_0; \quad (4)$$

$$\omega(\{a_l; b_l\}, \{a_m; b_m\}, \{x_l; y_l\}, \{x_m; y_m\}) \rightarrow \min; \quad (5)$$

$$l = 1, \dots, N_y; m = l + 1, \dots, N_y;$$

$$\left( \bigcup_{j=1}^{N_x} S_j \right) \cup \left( \bigcup_{l=1}^{N_y} S_l \right) = \bigcup_{i=1}^N S_i;$$

$$\rho(S_i, S_0) \geq \rho_{\min}; \delta(S_i) \leq \delta_{\max}; i = 1, \dots, N. \quad (6)$$

В модели (1)÷(6) выражение (1) представляет собой функцию цели задачи, причем  $u_i = \{x_i; y_i\}; i = 1, \dots, N$  – параметры размещения вышек с тепловизорами;  $N_x$  и  $N_y$  – количество тепловизоров, размещаемых вдоль соответствующих координатных осей. Выражение (2) представляет собой условие полного покрытия области  $S_0$  горизонтальными проекциями  $s_j$  областей обзора тепловизоров, расположенных вдоль соответствующей координатной оси; (3) – условие минимизации области пересечения между проекциями  $s_j$  и  $s_k$ . Здесь  $\omega(\cdot)$  –  $\omega$ -функция покрытия [12]. Условия (4) и (5) аналогичны, соответственно, выражениям (2) и (3), при этом записаны для тепловизоров, размещаемых вдоль другой координатной оси. Выражения (6) представляют собой, соответственно, условие размещения вышек с тепловизорами не ближе  $\rho_{\min}$  от полигона ТБО, где  $\rho(\cdot)$  – расстояние в евклидовой метрике, а также условие, связанное с параметром (размером) контролируемого объекта, причем  $\delta_{\max}$  – заданное значение параметра.

Следует отметить, что при тепловизорном мониторинге полигонов ТБО вместо людей на вышках используется надёжная статическая камера ночного видения, оснащённая тепловизором с микроболометром и цветной камерой высокого разрешения. Каждая вышка оснащается устройством связи с ситуационным центром, где оператор может наблюдать сразу за несколькими камерами. При обнаружении пожара оператор

также имеет возможность получить подтверждение с другой ближайшей камеры. Возможность получения текущих азимутальных координат положения поворотных устройств позволяет при помощи простых расчетов с достаточной точностью определять координаты очага возгорания.

К преимуществам данного подхода можно отнести все преимущества визуального мониторинга, а также минимизацию человеческих ресурсов, задействованных в процессе мониторинга. Также очень важным достоинством является определение параметров очага возгорания на достаточно ранних стадиях.

**Выводы.** В данной работе разработана математическая модель определения оптимального количества и мест размещения средств мониторинга полигонов твердых бытовых отходов. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование особенностей данной математической модели и разработку метода определения минимального количества и мест размещения тепловизоров для мониторинга полигонов ТБО.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Ю.А. Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами / Ю.А. Андреев, А.В. Брюханов. – Красноярск, 2011. – 272с.
2. Воробьев С.Ю. Методы и средства дистанционного мониторинга лесных пожаров/ С.Ю. Воробьев, Л.В. Катковский // Научный журнал "Доклады БГУИР" №2 том 49, 2009. – С. 21-33.
3. Копылов В.Н. Космический мониторинг окружающей среды/ В.Н. Копылов. Монография. – Ханты-Мансийск: Полиграфист, 2008. – 216 с.
4. Олениченко Ю.А. Подход к оптимизации размещения средств мониторинга тепловых полей полигонов твердых бытовых отходов / Ю.А. Олениченко, А.Н. Соболев, А.Г. Коссе // Проблемы надзвичайних ситуацій. – Х.: НУЦЗУ, 2013. – Вип. 18. – С. 145-152.
5. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / В.П. Вавилов. – М.: ИД Спектр, 2013. – 544 с.

6. Вавилов В.П. Тепловой контроль / В.П. Вавилов // 5 том справочника «Неразрушающий контроль» под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 2006 – 688 с.
7. Будадин О.Н. Тепловой контроль / О.Н. Будадин, В.П. Вавилов, Е.В. Абрамова. – М.: ИД Спектр, 2013. – 176 с.
8. Криксунов Л.З. Тепловизоры/ Л. З. Криксунов, Г. А. Падалко. – К.: Техніка, 1987 – 166 с.
9. Вавилов В.П. Тепловизоры и их применение/ В.П. Вавилов, А.Г. Климов. – М.: Интел универсал, 2002 – 88 с.
10. Драгун В.Л. Тепловизионные системы в исследовании тепловых процессов/ В.Л. Драгун. – М.: Наука, 1967. – 256 с.
11. Программа для вычисления FOV – поля зрения тепловизоров: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.thermoview.ru/articles/fov/>.
12. Стоян Ю.Г. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования / Ю.Г. Стоян, С.В. Яковлев. – К.: Наук. думка, 1986. – 265 с.

Собина В.О., Соболев О.М., Тригуб В.В., Олениченко Ю.А.

**Математична модель тепловізорного моніторингу пожеж на полігонах твердих побутових відходів**

В роботі розглянуто задачу виявлення пожеж на полігонах твердих побутових відходів на початковій стадії їх виникнення. Наведено загальну постановку задачі та математичну модель оптимального розміщення засобів моніторингу.

**Ключові слова:** математична модель, тепловізор, інфрачервоне випромінювання

Sobina V.A., Sobol A.N., Trigub V.V., Olenychenko Yu.A.

**Mathematical model of imager monitoring fires in refuse dumps**

In this paper the problem of detecting fires in refuse dumps at early stage is considered. A general statement of the problem and mathematical model of optimum placement of monitoring tools are given.

**Key words:** mathematical model, imager, infrared radiation