

*Р.Г. Мелешенко, преподаватель, НУГЗУ,
В.К. Мунтян, к.т.н., зав. кафедрой, НУГЗУ*

МОДЕЛЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРИРОДНОГО ПОЖАРА С ПОМОЩЬЮ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

(представлено д-ром техн. наук Соболев А.Н.)

Получена модель локализации динамической области природного пожара – уравнение линии, вдоль которой необходимо осуществлять сбросы воды с пожарного самолета.

Ключевые слова: природный пожар, пожарная авиация, скорость локализации.

Постановка проблемы. В условиях пересеченной или горной местности, а также при условии быстрого распространения природного пожара одним из наиболее используемых способов борьбы с ним является создание заградительных полос сбросами растворов огнезадерживающих химикатов и воды (в особенности при защите населенных пунктов и объектов), которые осуществляются специализированной авиационной техникой [1]. Высокая стоимость данного вида борьбы с пожаром [2] приводит к необходимости повышения эффективности использования пожарных самолетов.

Анализ последних исследований и публикаций. В работах [3, 4] проводится оценка необходимого расхода воды при авиационном тушении кромки лесного пожара, показана низкая эффективность данного метода. В тоже время отсутствуют работы, обосновывающие целесообразность использования пожарной авиации при локализации природного пожара путем создания переувлажненной заградительной полосы перед его фронтом.

Постановка задачи и ее решение. Целью работы является создание математической модели локализации динамической области природного пожара сбросами воды с пожарных самолетов.

Борьба с лесными пожарами авиационными методами может осуществляться в виде локализации динамической области пожара – создания вокруг нее переувлажненной заградительной полосы (непрямая атака).

В ряде работ [5, 6] обоснована возможность детектирования кромки пожара дистанционными методами. Полученное в момент времени t_0 в привязке к карте местности изображение контура пожара может быть векторизовано, т.е. в глобальной системе координат с известным масштабом контур пожара (в том числе, – пятиугольного) может быть задан массивом A вершин M ломаных, аппроксимирующих контуры отдельных очагов

$$A = \begin{bmatrix} [(x_1^1; y_1^1), (x_2^1; y_2^1), \dots, (x_{N_1-1}^1; y_{N_1-1}^1), (x_{N_1}^1; y_{N_1}^1)] \\ [(x_1^2; y_1^2), (x_2^2; y_2^2), \dots, (x_{N_2-1}^2; y_{N_2-1}^2), (x_{N_2}^2; y_{N_2}^2)] \\ \dots \dots \dots \dots \\ [(x_1^M; y_1^M), (x_2^M; y_2^M), \dots, (x_{N_M-1}^M; y_{N_M-1}^M), (x_{N_M}^M; y_{N_M}^M)] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где M – количество очагов в момент времени t ; $(x_n^m; y_n^m)$ – координаты n -ой вершины ($n = 1 \dots N_m$) границы m -ого очага ($m = 1 \dots M$), заданные в глобальной системе; N_m – количество вершин контура m -ого очага.

В силу замкнутости границы первая и последняя точки каждого контура совпадают, т.е. $(x_1^m; y_1^m) = (x_{N_m}^m; y_{N_m}^m) \forall m = 1 \dots M$. Каждый из очагов занимает область пространства Ω_m .

Наличие информации о контуре пожара и ландшафтно-метеорологических условий в зоне пожара, позволяет получить дискретный прогноз его динамики с помощью какой-либо из моделей и программных продуктов [7-9].

Располагая данной информацией, руководитель тушения пожара (РТП) должен принять решение о целесообразности локализации всей группы очагов авиационными методами.

Чтобы принять или отвергнуть данное решение, руководитель должен соотнести тактические возможности имеющихся в его распоряжении сил и средств с масштабом задачи. В частности, необходимо выяснить, достаточна ли линейная скорость создания переувлажненной полосы для осуществления локализации.

Решением данной задачи при наличии информации в виде (1) о пространственных параметрах пожара является выпуклая оболочка (ВО) [10], охватывающая все точки массива A . Расчет ВО возможен с помощью ряда алгоритмов [11].

Одним из наиболее простых и эффективных методов построения ВО является алгоритм Джарвиса «Заворачивания подарка». Использование данного алгоритма применительно к массиву (1) позволяет найти координаты ВО в виде массива B . ВО в дискретный момент времени t_j ($j \in \mathbf{N}$) представляет собой границу $\overline{\Omega}^j$ минимального выпуклого многоугольника $\Omega^j \equiv \Omega_{BO}(t_j)$, заданную набором K_j вершин

$$B^j \equiv B(t_j) = [(x_k^j; y_k^j)]_{k=1..K_j} \quad (2)$$

(здесь и далее индексом j будем обозначать номер временного шага).

В силу необратимости распространения пожара имеет место условие $\Omega^j \subseteq \Omega^{j+1} \forall j \in \mathbf{N}$, с учетом которого и ввиду выпуклости оболочки, описание динамики ВО удобно (в отличие от невыпуклого кон-

тура пожара) осуществлять в локальной полярной системе координат. При этом в качестве полярного полюса предлагается использовать центр масс области Ω^0 (в момент времени t_0).

Нахождение координат центра масс $(x_c; y_c)$ в глобальной системе координат может быть осуществлено с помощью следующей процедуры.

Как известно [12], для однородной области Ω

$$x_c = \int_{\Omega} x ds / \int_{\Omega} ds; \quad y_c = \int_{\Omega} y ds / \int_{\Omega} ds. \quad (3)$$

Очевидно, что непосредственное использование данного выражения для многовершинной области не является удобным. В случае задания контура ВО в виде (2) для осуществления вычисления знаменателя (3) (площади S_{Ω} области Ω) удобно использовать формулу [13]

$$\int_{\Omega} ds = S_{\Omega} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (x_{k+1} - x_k)(y_{k+1} + y_k). \quad (4)$$

Для вычисления числителей (3) воспользуемся формулой Грина [14]

$$\int_{\Omega} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) ds = \oint_{\bar{\Omega}} P dx + Q dy, \quad (5)$$

где $\bar{\Omega}$ – граница (замкнутый контур) области Ω .

В этом случае для x_c имеем $\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} = x$. Положим $P = 0$, а

$$Q = x^2/2. \quad \text{Тогда} \quad \int_{\Omega} x ds = \int_{\bar{\Omega}} \frac{x^2}{2} dy.$$

Для вычисления данного интеграла перейдем к параметрической записи уравнения отрезка – звена ломаной – контура $\bar{\Omega}$ многоугольника Ω .

Пусть задано k -ое звено многоугольника $\bar{\Omega}$ своими вершинами $[(x_k; y_k), (x_{k+1}; y_{k+1})]$. Тогда параметрическое (с параметром ℓ – континуальным номером вершины) уравнение звена l_k будет иметь вид

$$l_k(\ell) = \begin{cases} X_k(\ell) = x_k + (x_{k+1} - x_k) \cdot (\ell - k); \\ Y_k(\ell) = y_k + (y_{k+1} - y_k) \cdot (\ell - k); \end{cases} \quad k \leq \ell \leq k + 1. \quad (6)$$

В силу того, что $\bar{\Omega} = \bigcup_{k=1}^K l_k$, с учетом предыдущего выражения

получаем

$$\int_{\Omega} x ds = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K \int_k^{k+1} (x_k + (x_{k+1} - x_k) \cdot (\ell - k))^2 (y_{k+1} - y_k) d\ell. \quad (7)$$

Вычисляя последний интеграл, получим

$$\int_{\Omega} x ds = \frac{1}{6} \sum_{k=1}^K (y_{k+1} - y_k) (x_{k+1}^2 + x_k^2 + x_{k+1} x_k). \quad (8)$$

Продельвая аналогичные выкладки для y_c , и подставляя полученные выражения в (3), окончательно получим

$$x_c = \frac{\sum_{k=1}^K (y_{k+1} - y_k) (x_{k+1}^2 + x_k^2 + x_{k+1} x_k)}{3 \sum_{k=1}^K (x_{k+1} - x_k) (y_{k+1} + y_k)}; \quad (9)$$

$$y_c = \frac{\sum_{k=1}^K (x_{k+1} - x_k) (y_{k+1}^2 + y_k^2 + y_{k+1} y_k)}{3 \sum_{k=1}^K (x_{k+1} - x_k) (y_{k+1} + y_k)}.$$

Следует отметить что процедура (3)-(9) применима и для произвольного односвязного невыпуклого многоугольника.

Найдя согласно (9) координаты центра масс области Ω^0 , свяжем с ним локальную полярную систему координат с полярной осью, коллинеарной оси ОХ глобальной декартовой системы координат, осуществив сдвигку координат каждой точки в массиве В (2), т.е. проделав замену $(x_k^j; y_k^j) \rightarrow (x_k^j - x_c; y_k^j - y_c)$.

В этой системе координат в момент времени t_j полярное уравнение звена l_k^j ломаной $\bar{\Omega}^j$, получаемое из уравнения прямой, проходящей через две точки $\frac{x - x_k^j}{x_{k+1}^j - x_k^j} = \frac{y - y_k^j}{y_{k+1}^j - y_k^j}$ путем стандартной замены $x = \rho \cos \varphi$; $y = \rho \sin \varphi$, может быть задано в виде

$$\rho_k^j(\varphi) = \frac{y_k^j (x_{k+1}^j - x_k^j) - x_k^j (y_{k+1}^j - y_k^j)}{\sin \varphi (x_{k+1}^j - x_k^j) - \cos \varphi (y_{k+1}^j - y_k^j)}, \quad (10)$$

$$\varphi \in [\arctg(y_k^j, x_k^j); \arctg(y_{k+1}^j, x_{k+1}^j)].$$

Соответственно, в момент времени t_j сама ВО (т.е. линия $\bar{\Omega}^j = \rho^j(\varphi)$) в полярных координатах может быть задана в виде

$$\bar{\Omega}^j(\varphi) = \sum_{k=1}^{K_j-1} \rho_k^j(\varphi) \cdot [\eta(\varphi - \varphi_k^j) - \eta(\varphi - \varphi_{k+1}^j)], \quad 0 \leq \varphi < 2\pi, \quad (11)$$

где $\eta(\varphi)$ – функция Хэвисайда, $\varphi_k^j = \text{arctg}(y_k^j, x_k^j)$.

Кроки прогноза пожара $\Delta t = t_{j+1} - t_j$ могут быть выбраны достаточно малыми, что позволяет полагать, что радиальная скорость $v^j(\varphi)$ на протяжении временного интервала $[t_j; t_{j+1}]$ зависит лишь от φ , но не от t . В этом случае она может быть задана в виде

$$v^j(\varphi) = \frac{\bar{\Omega}^{j+1}(\varphi) - \bar{\Omega}^j(\varphi)}{\Delta t}. \quad (12)$$

Тогда радиальная скорость $V(\varphi, t)$ на всем интервале прогнозирования $[t_0; t_0 + \Delta t \cdot J]$ может быть задана как

$$V(\varphi, t) = \sum_{j=0}^{J-1} v^j(\varphi) \cdot [\eta(t - t_j) - \eta(t - t_{j+1})]. \quad (13)$$

Выражение (13) представляет собой линейную сплайн-интерполяцию (по времени) дискретных значений скорости (12) и позволяет вычислить значение радиальной скорости в произвольный (а не только дискретный) момент времени $t \in [t_0; t_0 + \Delta t \cdot J]$ для любого $\varphi \in [0; 2\pi]$. Следует подчеркнуть, что $V(\varphi, t)$ является радиальной скоростью, т.е. скоростью распространения ВО в направлении вдоль луча с полярным углом φ .

Учитывая (12) выражение для ВО в произвольный момент времени $t \in [t_0; t_0 + \Delta t \cdot J]$ в полярных координатах может быть задано выражением

$$\bar{\Omega}(\varphi, t) = \bar{\Omega}(\varphi, t_0) + V(\varphi, t) \cdot (t - t_0). \quad (14)$$

Располагая континуальным прогнозом динамики ВО пожара (14) и значением средней скорости локализации V_l [15], можно получить форму локализационной кривой $R(\varphi)$, т.е. линии вдоль которой необходимо осуществлять сбросы воды.

На параметры тактики локализации пожара с воздуха влияет высокая скорость распространения кромки пожара и достаточно низкая скорость создания переувлажненной полосы. Из этого положения следует, что создание противопожарного барьера не должно осуществляться в непосредственной близости от быстро распространяющихся тактических элементов контура пожара, иначе производительность авиасил может оказаться недостаточной для осуществления прокладки непрерывной переувлажненной полосы.

Поэтому, с одной стороны, при локализации пожара при малой скорости локализации необходимо отступить от кромки пожара как можно дальше.

С другой стороны, степень переувлажнения растительного горючего материала, а значит и эффективность задержки огня, зависит от продолжительности интервала времени между моментом сброса и моментом подхода пламени пожара к противопожарному барьеру, поскольку в условиях повышенной температуры происходит быстрое испарение избыточной влаги водяного сброса. В работе [16] приводятся данные о том, что продолжительность данного интервала не должна превышать 15 мин. Беря за основу данное время и располагая значением скорости (13) можно найти предельное расстояние r от кромки пожара до точки сброса, которое обеспечивает эффективную локализацию. Осуществляя в (14) замену $\bar{\Omega}(\varphi, t) \rightarrow \bar{\Omega}(\varphi, t) + r$ зададим динамику таким образом переопределенной – расширенной ВО.

В работе [17] получено выражение, описывающее траекторию движения сил пожаротушения при ликвидации наземного ландшафтного пожара. Для обхода динамической ВО необходимо учесть дифференциалы более высоких порядков, поскольку пренебрежение ими, допустимое для описания локализации кромки пожара в [17], приводит к нефизическим результатам, связанным с наличием отрезков ВО большой угловой протяженности.

Пусть осуществление сбросов началось в момент времени T_0 ($T_0 \geq t_0$), при этом скорость прокладки непрерывного противопожарного барьера (переувлажненной полосы) равна V_l .

Рассмотрим малый элемент локализационной кривой, прокладываемый за время Δt . Между моментами времени t и $t + \Delta t$, согласно теореме косинусов, имеем (рис. 1)

$$\bar{\Omega}^2(\varphi, t) + \bar{\Omega}^2(\varphi + \Delta\varphi, t + \Delta t) - 2\bar{\Omega}(\varphi, t)\bar{\Omega}(\varphi + \Delta\varphi, t + \Delta t)\cos(\Delta\varphi) - V_l\Delta t = 0. \quad (15)$$

Ограничиваясь первыми членами ряда Тейлора, имеем

$$\bar{\Omega}(\varphi + \Delta\varphi, t + \Delta t) \approx \bar{\Omega}(\varphi, t) + \frac{\partial\bar{\Omega}(\varphi, t)}{\partial\varphi}\Delta\varphi + \frac{\partial\bar{\Omega}(\varphi, t)}{\partial t}\Delta t + \frac{\partial^2\bar{\Omega}(\varphi, t)}{\partial\varphi\partial t}\Delta\varphi\Delta t; \quad (16)$$

$$\cos(\Delta\varphi) \approx 1 - \frac{(\Delta\varphi)^2}{2}. \quad (17)$$

Учитывая, что $\frac{\partial\bar{\Omega}(\varphi, t)}{\partial t} = V(\varphi, t)$ и $\frac{\partial^2\bar{\Omega}(\varphi, t)}{\partial\varphi\partial t} = \frac{\partial V(\varphi, t)}{\partial\varphi}$, под-

ставляя (16) и (17) в (15) и решая полученное уравнение относительно Δt , получаем решение (которое обозначим как ΔT)

$$\Delta T(\varphi, t, \Delta\varphi) = \frac{1}{2} \left[\left(V + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \Delta\varphi \right)^2 - V_1^2 \right]^{-1} \times \left[-\Delta\varphi \left(V + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \Delta\varphi \right) \left(2 \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \varphi} + \bar{\Omega} \Delta\varphi \right) \pm \right. \\ \left. \pm \left[(\Delta\varphi)^2 \left(V + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \Delta\varphi \right)^2 \left(2 \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \varphi} + \bar{\Omega} \Delta\varphi \right)^2 - 4 \left(\left(V + \frac{\partial V}{\partial \varphi} \Delta\varphi \right)^2 - V_1^2 \right) (\Delta\varphi)^2 \times \right. \right. \quad (18) \\ \left. \left. \times \left[\left(\frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \varphi} \right)^2 + \bar{\Omega}^2 + \Delta\varphi \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial \varphi} \bar{\Omega} \right] \right]^{1/2} \right].$$

Поскольку с учетом (13) и (14) разделение переменных в (18) невозможно, то исключается возможность аналитического нахождения линии сброса воды путем интегрирования. Поэтому нахождение данной кривой осуществим численно с использованием итерационной процедуры.

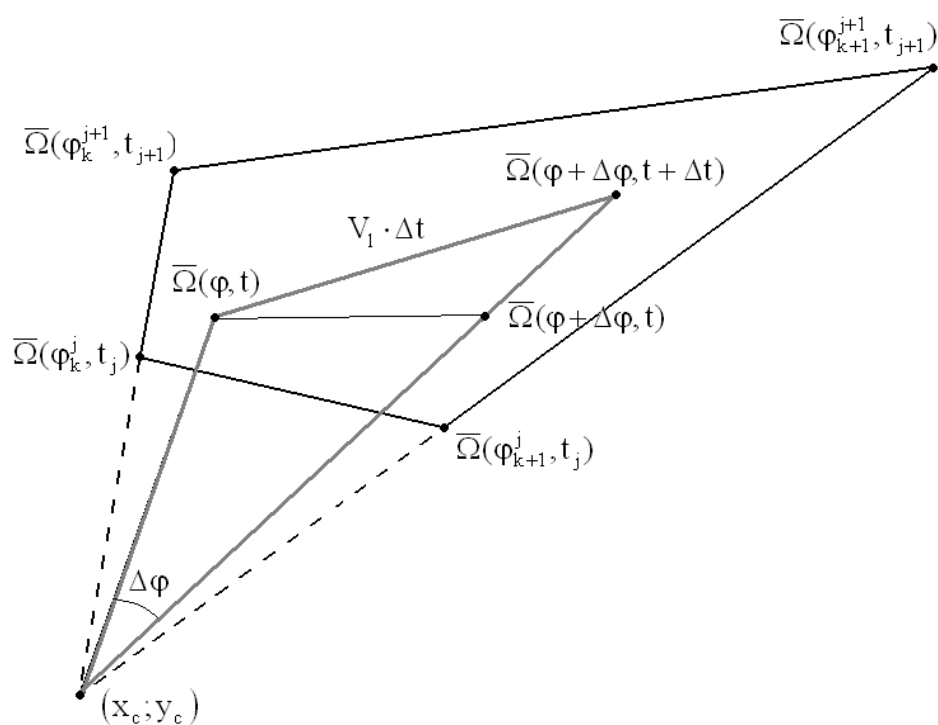


Рис. 1. К выводу уравнения линии сброса воды

Для этого задаются координаты $(X_0; Y_0)$ первого сброса в момент времени T_0 . Координаты $(X_0; Y_0)$ пересчитываются в локальной полярной системе в виде $\Phi_0 = \arctg(Y_0 - y_c, X_0 - x_c)$, $R_0 = \sqrt{(X_0 - x_c)^2 + (Y_0 - y_c)^2}$, т.е. задается точка (R_0, Φ_0) . Задается малое постоянное приращение угла $\Delta\Phi$, так что $\Phi_{n+1} = \Phi_n + \Delta\Phi$. Согласно (18) рассчитывается $\Delta T_n(\Phi_n, T_n, \Delta\Phi)$, что позволяет вычислить $T_{n+1} = T_n + \Delta T_n(\Phi_n, T_n, \Delta\Phi)$. Подстановка в (14) позволяет вычислить

$R_{n+1} = \overline{\Omega}(\Phi_{n+1}, T_{n+1})$, после чего процедура повторяется. Полученное таким образом множество вершин $\{(R_n, \Phi_n)\}_{n=0...N}$ может быть линейно интерполировано ломаной линией $R(\varphi, t)$

$$R(\varphi, t) = \sum_{n=0}^{N-1} R_n \cdot [\eta(\varphi - \Phi_n(t)) - \eta(\varphi - \Phi_{n+1}(t))]. \quad (19)$$

Выражение (19) решает задачу нахождения линии сброса воды для локализации природного пожара. На рис. 2 приведен пример, иллюстрирующий динамику локализации области пожара (прогноз пожара получен на основе модели [9]).

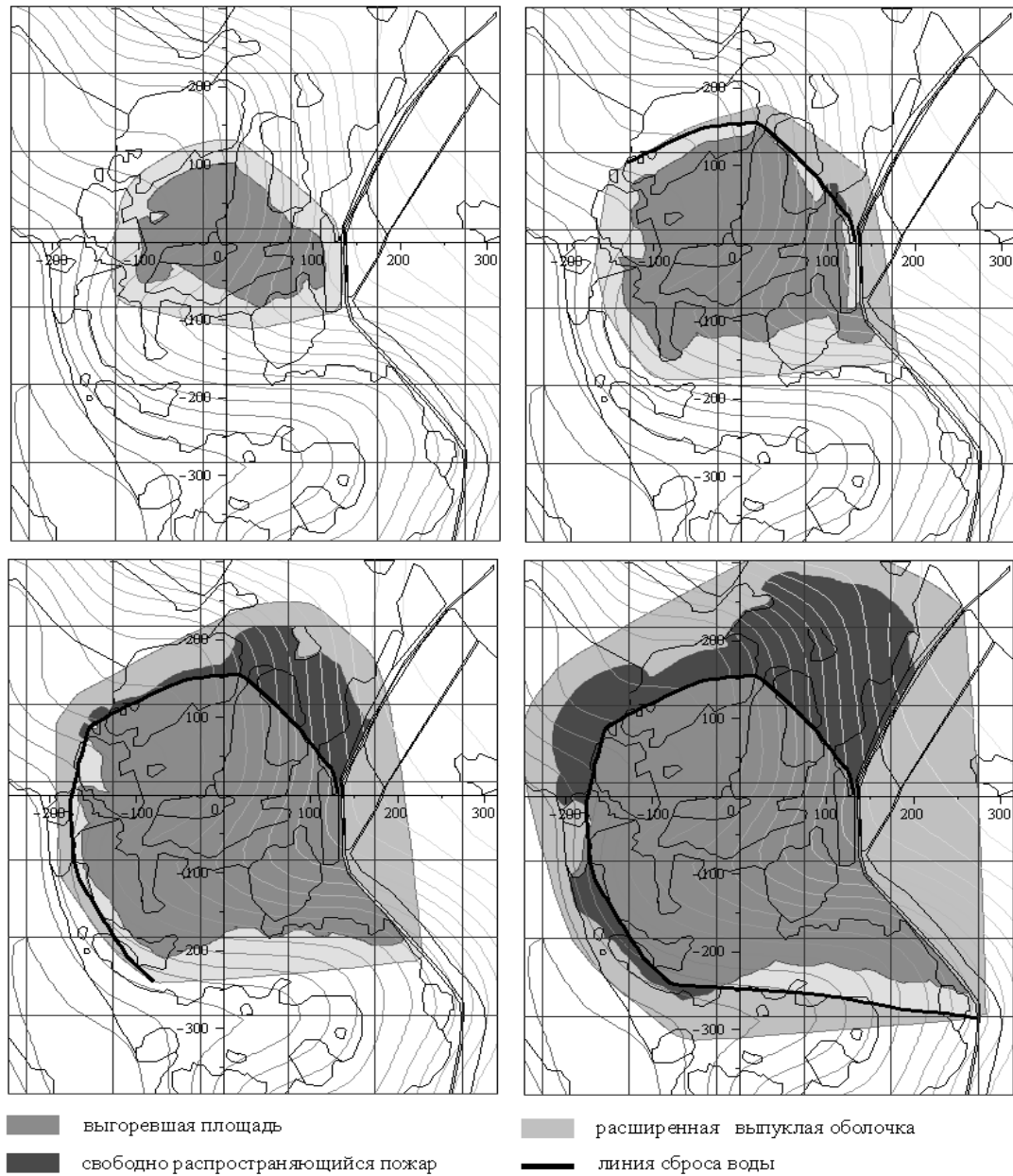


Рис. 2. Пример расчета линии сброса воды для локализации динамической области природного пожара

Выводы. Наличие прогноза динамики области природного пожара и значения скорости прокладки переувлажненной заградительной полосы, получаемой путем сбросов воды с пожарного самолета, позволяют получить уравнение линии противопожарного барьера, что важно для планирования тактики борьбы с пожаром.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арцибашев Е.С., Гусев В.Г. Авиационные способы борьбы с лесными пожарами в условиях радиационного загрязнения радионуклидами // Предупреждение, ликвидация и последствия пожаров на радиоактивно загрязненных землях: Сб. науч. тр.- Вып. 54. – Гомель, ИЛ НАН Беларуси, 2002.- 190 с.

2. Keating E. Air attack against wildfires understanding U.S. Forest Service requirements for large aircraft / E. Keating, A. Morral, C. Price and other // RAND, 2012. – 142 p.

3. Абдурагимов И.М. Проблема тушения крупных лесных пожаров и крупномасштабных пожаров твердых горючих материалов в зданиях // Пожаровзрывобезопасность – 2012. – т. 21, №2. – С. 69-74.

4. Абдурагимов И.М. Проблема тушения лесных и торфяных пожаров (тепловая теория тушения пожаров твердых горючих материалов на открытых пространствах и внутри зданий и сооружений) // Пожаровзрывобезопасность – 2012. – т. 21, №10. – С. 66-76.

5. Комяк В.А. Радиотепловая сканирующая система для пожарных служб авиационной охраны лесов / В.А. Комяк, С.А. Шило // Харьков: Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова 2003.- 25 с.

6. Азатян В.В., Болодьян И.А., Шебеко Ю.Н., Копылов С.Н. Применение летательных аппаратов для обнаружения и тушения лесных пожаров. – М.: Изд. Фгу ВНИИПО МЧС России. – 2003. – № 2. – С. 140-141.

7. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 161 с.

8. M.A. Finney. FARSITE: Fire Area Simulator – Model Development and Evaluation. USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4. 1989.

9. Абрамов Ю.А., Басманов А.Е., Тарасенко А.А. Моделирование пожаров, их обнаружения, локализации и тушения. – Харьков: НУГЗУ, 2011. – 927 с.

10. Препарата Ф. Вычислительная геометрия: Введение / Ф. Препарата, М. Шеймос. – М.: Мир, 1989. – 478 с.

11. Построение выпуклой оболочки множества точек. Электронный документ. Режим доступа <http://algotlist.manual.ru/maths/geom/convhull>.

12. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике /М. Я. Выгодский. — М.: АСТ: Астрель, 2006. – С. 991.

13. Андреева Е.В. Вычислительная геометрия на плоскости / Е.В. Андреева, Ю.Е. Егоров // Информатика. – 2002. – №40. – С. 28-31.

14. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 2 / Г.М. Фихтенгольц. – М.: Наука, 1972 – 357 с.

15. Мелешенко Р. Г. Критерий принятия решения о целесообразности привлечения авиации для локализации лесного пожара / Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян // Проблемы пожарной безопасности: Сб.научн.тр.-Вып33.-Харьков: НУГЗУ, 2013. -С.122-131.

16. Москвилин Е.А. Применение авиации для тушения лесных пожаров / Е.А. Москвилин // Пожарная безопасность. – М: 2009. – №1-С. 89-92.

17. С.Ф. Кривошлыков. Модель локализации простого ландшафтного пожара с произвольной формой очага / С.Ф. Кривошлыков, Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Проблемы пожарной безопасности. – 2006. – Вып. 20. – С. 115-118.

Р.Г. Мелешенко, В.К. Мунтян

Модель локалізації природної пожежі за допомогою авіаційної техніки

Отримана модель динамічної локалізації області природної пожежі-рівняння лінії, вздовж якої необхідно здійснювати скиди води з пожежного літака.

Ключові слова: природна пожежа, пожежна авіація, швидкість локалізації.

R.G. Meleschenko, V.K. Mountyan

Localization model natural fire with the help of aviation equipment

Obtained localization model of the dynamic nature of fire-the equation of the line along which it is necessary to discharge water from a fire aircraft.

Keywords: natural fire, fire fighting aviation, speed localization.