УДК 614. 84

Ю.А. Абрамов
А.А. Тарасенко
г. Харьков, УГЗ Украины

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЗОНЫ УЯЗВИМОСТИ ОБЪЕКТА «ЗАБОТЫ» ПОРАЖАЮЩИМИ ФАКТОРАМИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Постановка проблемы. Одной из задач гражданской обороны является сохранение жизни и здоровья граждан, материальных ценностей, целостности и функциональности социально важных объектов, называемых, согласно [1], объектами «заботы» (ОЗ), в условиях угрозы действия на них поражающих факторов чрезвычайных ситуаций (ЧС). Среди способов минимизации последствий влияния ЧС на ОЗ предусматриваются проведение локализационных мероприятий (в том случае, когда возможно управление процессом распространения границы области чрезвычайных ситуаций специализированными подразделениями МЧС), и проведение эвакуационных мероприятий (ЭМ), когда такое управление невозможно либо является недостаточно оперативным. Сами ЭМ, в свою очередь, должно базироваться на обоснованных расчетах, принимающих во внимание ряд факторов: мобилизационные возможности, включающие в себя количество и тактико-технические характеристики задействованных транспортных и погрузочных средств; пропускную способность транспортных путей эвакуации; количестве эвакуируемых субъектов; объем эвакуируемых материальных ценностей и др. В условиях, когда ОЗ оказывается лежащим на пути распространения динамической границы области ЧС (масштабного техногенного либо природного пожара, выброса отравляющего вещества, разлива нефтепродукта на поверхности воды и т.д.) скорость распространения границы (кромки пожара, поверхности допустимой концентрации отравляющего либо радиоактивного вещества, границы нефтяного пятна) определяет временные рамки проведения как эвакуационных, так и локализационных мероприятий. Поскольку часто заранее неизвестны местоположения и параметры возможных очагов области ЧС, план эвакуации особо значимых ОЗ должен предусматривать различные варианты потенциальной угрозы со стороны масштабных динамических ЧС природного и природно-техногенного характера.

Анализ последних достижений. При решении задачи определения уровня территориального риска в окрестности объекта повышенной опасности (ОПО), последний рассматривается как очаг поражающих факторов ЧС [1]. Решение данной задачи широко представлено в [2-3].

В тоже время, согласно [1], декларирование уровня риска для объекта «заботы» (который вовсе не идентичен ОПО, поскольку является не источником а реципиентом угрозы), со стороны внешних по отношению к нему поражающих факторов чрезвычайных ситуаций с неопределенными параметрами очага (каковыми могут являться перечисленные выше виды ЧС), не осуществляется, научные исследования в данном направлении не ведутся.

Детерминированным аналогом поля территориального риска для ОЗ со стороны внешних проявлений ЧС может являться зона уязвимости объекта, определяемая параметрами потенциального очага. В этом случае в качестве аналогов линий уровня риска могут выступать изохорны процесса достижения границей области ЧС контура ОЗ.

В идеализированных изотропных однородных ландшафтно-метеорологических условиях для точечного ОЗ либо ОЗ круговой формы изохроннами являются равноотстоящие концентрические окружности. В тех же условиях, но для ОЗ с более сложной (но выпуклой) границей, изохроны представляют собой семейство параллельных кривых [4].

Нетривиальным является решение данной задачи в неоднородных ландшафтно-

метеорологических условиях для ОЗ невыпуклой формы, когда распространение границы области ЧС осуществляется со скоростью, определяемой локальными условиями и геометрией контура области. В такой постановке решение упомянутой задачи до сих пор не рассматривалось.

Очевидно, что рассматривать решение данной задачи необходимо с привлечением моделей развития конкретного вида ЧС. В данной работе приведено решение задачи нахождения зоны уязвимости ОЗ при угрозе последнему со стороны природного пожара [5].

Цель статьи. Целью статьи является построение поля уязвимости объекта «заботы» поражающими факторами ЧС (природного пожара), линии уровня которого представляют собой изохроны процесса достижения границей области ЧС контура ОЗ.

Постановка задачи и ее решение. Введем понятие поля уязвимости для объекта «заботы» в детерминированной постановке, когда возникновение очага ЧС рассматривается как достоверное событие. Критической уязвимостью ОЗ определим время достижения произвольным очагом ЧС ближайшей точки границы ОЗ за время, необходимое для его регламентной эвакуации. Лини уровня поля уязвимости ОЗ в фиксированных ландшафтно-метеорологических условиях определим как изохроны достижения границы ОЗ контуром области ЧС. В условиях природной среды, когда на скорость и направление развития границы области ЧС оказывают влияние метеорологические и ландшафтные факторы, а параметры области ЧС и ее местоположение по отношению к ОЗ заранее неизвестны, необходимо построить уровни пространственного поля уязвимости ОЗ в фиксированных (либо наиболее вероятных) метеорологических условиях.

Рассмотрим решение данной задачи на примере природного пожара, воспользовавшись положениями [5] о континуальном поле годографа $V(x;y;\varphi)$ радиус-вектора скорости распространения кромки пожара, которое не зависит от контура очага (здесь $\varphi \in [0;2\pi]$ - азимутальный угол; x и y – декартовы координаты) и гипотезой нормальной скорости [6], согласно которой скорость движения точки (x;y) кромки пожара направлена по нормали к контуру очага, а величина скорости определяется годографом скорости в данной точке. Ориентация годографа, как показано в [5], определяется градиентом рельефа и направлением локального ветра, а величина полуосей - теплофизическими свойствами растительного горючего материала. Задавая контур очага пожара и используя итерационную модель динамики контура, можно получить кроки пожара в дискретные моменты времени t_i. Данную задачу будем называть прямой, решение ее приведено в [7-8].

Скорость v_0 кромки в зависимости от значений ряда пирологических факторов в отсутствие склона и ветра определяется моделью Ротермела [9]. В силу неоднородного пространственного распределения значений данных факторов, имеет место зависимость $v_0(x;y)$.

Общей моделью скорости кромки под действием совместного влияния ветра и рельефа в произвольном азимутальном направлении φ (годографом радиус-вектора скорости) в произвольной точке $(x;y) \in \Omega$ является параметрически заданное выражение

$$V(x;y;\varphi) = \begin{cases} V_x(x;y;\varphi) \\ V_y(x;y;\varphi) \end{cases} = v_0(x;y) \cdot K_\Sigma(\alpha(x;y);\vec{v}_w(x;y);\psi_\Sigma(x;y);\varphi), \quad (1)$$

где

- $\varphi \in [0;2\pi]$ - азимутальное направление (угол между осью OX и произвольным лучом, проведенным из точки $(x;y)$ и лежащим в плоскости XOY);

- $K_\Sigma(\alpha(x;y);\vec{v}_w(x;y);\psi_\Sigma(x;y);\varphi)$ - безразмерный годограф радиус-вектора скорости кромки под действием совместного влияния ветра и рельефа, задаваемый параметрически

$$K_{\Sigma}=\begin{cases} K_{\Sigma x}=\dfrac{K_{fr\Sigma}\cos\varphi}{K_{fr\Sigma}\left(1-\cos(\varphi-\psi_{\Sigma})\right)+\cos(\varphi-\psi_{\Sigma})}; \\ K_{\Sigma y}=\dfrac{K_{fr\Sigma}\sin\varphi}{K_{fr\Sigma}\left(1-\cos(\varphi-\psi_{\Sigma})\right)+\cos(\varphi-\psi_{\Sigma})}; \end{cases} \tag{2}$$

- $K_{fr\Sigma}(\alpha(x;y);\vec{v}(x;y);\psi_{\Sigma}(x;y))$ - величина безразмерной (нормированной на v_0) фронтальной скорости кромки под действием совместного влияния ветра и рельефа

$$K_{fr\Sigma}=1+\sqrt{(K_{frw}-1)^2+(K_{frr}-1)^2+2(K_{frw}-1)(K_{frr}-1)\cos(\psi_w-\psi_r)}; \tag{3}$$

- $\psi_{\Sigma}\in[0;2\pi]$ - угол, который образует вектор фронтальной скорости кромки под действием совместного влияния ветра и рельефа с осью OX

$$\psi_{\Sigma}=\mathrm{arctg}(\tilde{V}_{fr\Sigma y};\tilde{V}_{fr\Sigma x}); \tag{4}$$

- $\vec{\tilde{V}}_{fr\Sigma}$ - безразмерный (нормированной на v_0) вектор фронтальной скорости кромки под действием совместного влияния ветра и рельефа

$$\vec{\tilde{V}}_{fr\Sigma}=\begin{bmatrix}\tilde{V}_{fr\Sigma x}\\ \tilde{V}_{fr\Sigma y}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}(K_{frw}-1)\cos\psi_w+(K_{frr}-1)\cos\psi_r\\ (K_{frw}-1)\sin\psi_w+(K_{frr}-1)\sin\psi_r\end{bmatrix}; \tag{5}$$

- $K_{frw}(\sigma(x;y);\delta(x;y);\rho(x;y);\omega(x;y);v_w(x;y))$ - величина безразмерной (нормированной на v_0) фронтальной скорости кромки под действием изолированного влияния ветра (справедлива для $v_w\le 8$ м/с)

$$K_{frw}=1+7.47\left(\frac{\omega}{3.348\delta\rho\sigma^{-0.8189}}\right)^{-0.715\exp(-3.591\cdot10^{-4}\sigma)}\frac{v_w^{0.02526\sigma^{0.54}}}{\exp(0.133\sigma^{0.55})}; \tag{6}$$

- $\psi_w(x;y)$ - направление горизонтальной составляющей вектора скорости ветра $\vec{v}_w$ (угол, который образует проекция данного вектора с осью OX)

$$\psi_w=\mathrm{arctg}(v_{wy};v_{wx}); \tag{7}$$

- $\vec{v}_w(x;y;z)$ - неоднородное векторное поле скорости ветра

$$\vec{v}_w=\begin{bmatrix}v_{wx}(x;y;z)\\ v_{wy}(x;y;z)\\ v_{wz}(x;y;z)\end{bmatrix}; \tag{8}$$

- $K_{frr}(\alpha_{max}(x;y))$ - величина безразмерной (нормированной на v_0) фронтальной скорости кромки под действием изолированного влияния рельефа (справедлива для

$\alpha_{max} \le 40^0$)

$$K_{frr} = \frac{1}{\left[1 - 1{,}447 \cdot \sin \alpha_{max}\right]^{1{,}253}}; \qquad (9)$$

- $\alpha_{max}(x;y)$ - максимальная крутизна поверхности рельефа в точке $(x;y)$ - угол величины склона в направлении ψ_r градиента поверхности рельефа $Z(x;y)$

$$\alpha_{max} = \mathrm{arctg}\left(\sqrt{\left(\frac{\partial Z(x;y)}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z(x;y)}{\partial y}\right)^2}; 1\right); \qquad (10)$$

- $\psi_r(x;y)$ - направление градиента поверхности рельефа (угол между вектором градиента и осью OX)

$$\psi_r = \mathrm{arctg}\left(\frac{\partial Z(x;y)}{\partial y}; \frac{\partial Z(x;y)}{\partial x}\right); \qquad (11)$$

- $Z(x;y)$ - уравнение поверхности рельефа.

Выражение (1) не может задать модуль скорости в точке $(x;y)$ пока не определено направление распространения участка контура. Данное направление, согласно модели нормальной скорости, совпадает с направлением внешней нормали к контуру.

Пусть в плоскости XOY параметрически задана проекция контура очага в виде

$$\tilde{L}(m) = \begin{cases} \tilde{X} = \tilde{X}(m); \\ \tilde{Y} = \tilde{Y}(m). \end{cases} \qquad (12)$$

Единичный вектор нормали $\vec{n}$ в текущей точке $(x(m);y(m))$ контура $\tilde{L}(m)$ будет иметь координаты

$$\vec{n} = \left[n_x; n_y\right] = \begin{bmatrix} \dfrac{-d\tilde{Y}}{dm} \Big/ \sqrt{\left(\dfrac{d\tilde{X}}{dm}\right)^2 + \left(\dfrac{d\tilde{Y}}{dm}\right)^2} \\ \dfrac{d\tilde{X}}{dm} \Big/ \sqrt{\left(\dfrac{d\tilde{X}}{dm}\right)^2 + \left(\dfrac{d\tilde{Y}}{dm}\right)^2} \end{bmatrix}. \qquad (13)$$

Угол $\gamma(m)$, который образует данный вектор с осью OX в точке контура $(x(m);y(m))$, равен

$$\gamma(x(m);y(m)) = \mathrm{artg}(n_y; n_x). \qquad (14)$$

Подставляя данное выражение в (1)-(2) вместо φ, получим значение скорости $V(x(m);y(m))$ движения текущей точки m контура пожара.

Нахождение изолиний поля уязвимости объекта «заботы» представляет собой задачу, обратную прямой – необходимо найти линию (изохрону), которая бы определяла расстояние

между ближайшей точкой границы области ЧС по отношению к ОЗ, чтобы за указанное время t_i произошло достижение данной точки, движущейся с переменной скоростью, контура ОЗ.

Решение данной обратной задачи сводится к решению прямой в измененной постановке.

Получим сопряженное поле $V^*(x;y;\varphi)$ годографов, которое будет характеризоваться ориентацией годографов, противоположной исходному. В этом случае вместо угла ψ_Σ необходимо использовать противоположный ему угол ψ_Σ^*

$$\psi_\Sigma^* = \mathrm{arctg}(-\tilde{V}_{fr\Sigma y}; -\tilde{V}_{fr\Sigma x}). \qquad (15)$$

В полученном сопряженном поле годографов зададим контур очага в виде границы ОЗ в виде

$$\tilde{L}_{оз}(m) = \begin{cases} \tilde{X}_{оз}(m); \\ \tilde{Y}_{оз}(m), \end{cases} \qquad (16)$$

но с обратным, нежели в (12), направлением обхода контура, что обеспечивает необходимую ориентацию вектора нормали (13) для границы ОЗ. Для введенных таким образом исходных условий, решим прямую итерационную задачу нахождения динамики границы области ЧС в дискретные моменты времени t_i

$$\tilde{L}_{оз}(m;t_{i+1}) = \begin{cases} \tilde{X}_{оз}(m;t_i) + V_x^*(X_{оз}(m;t_i);\tilde{Y}_{оз}(m;t_i))\cdot\Delta t; \\ \tilde{Y}_{оз}(m;t_i) + V_y^*(\tilde{X}_{оз}(m;t_i);\tilde{Y}_{оз}(m;t_i))\cdot\Delta t; \end{cases} \quad i = 0,1,2,.., \qquad (17)$$

где $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ - временной шаг.

В силу взаимообратного характера действия прямого и сопряженного ему годографов (рис. 1), данная постановка однозначно решает поставленную задачу нахождения изолиний поля уязвимости ОЗ в неоднородных ландшафтно-метеорологических условиях.

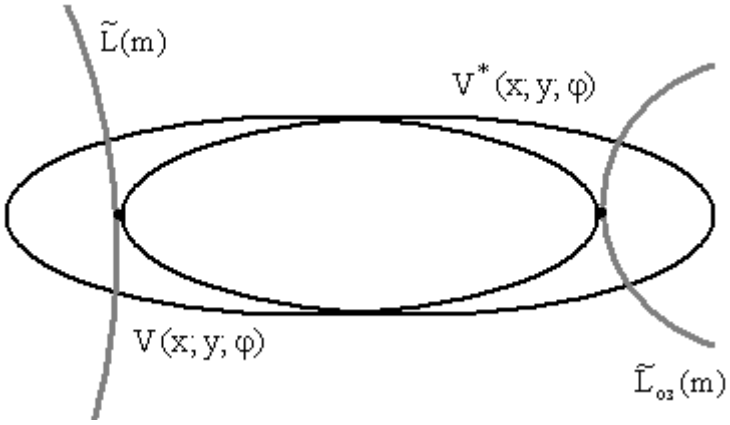

Рис. 1 – Исходный и сопряженный ему годограф скорости распространения области ЧС

Введем в рассмотрение параметры конкретного гетерогенного ландшафта, на котором задается поле приземного ветра (8) и пространственно распределенные теплофизические характеристики растительного покрова, что позволяет получить на рассматриваемой области прямое и сопряженное поле годографов скорости (рис.2).

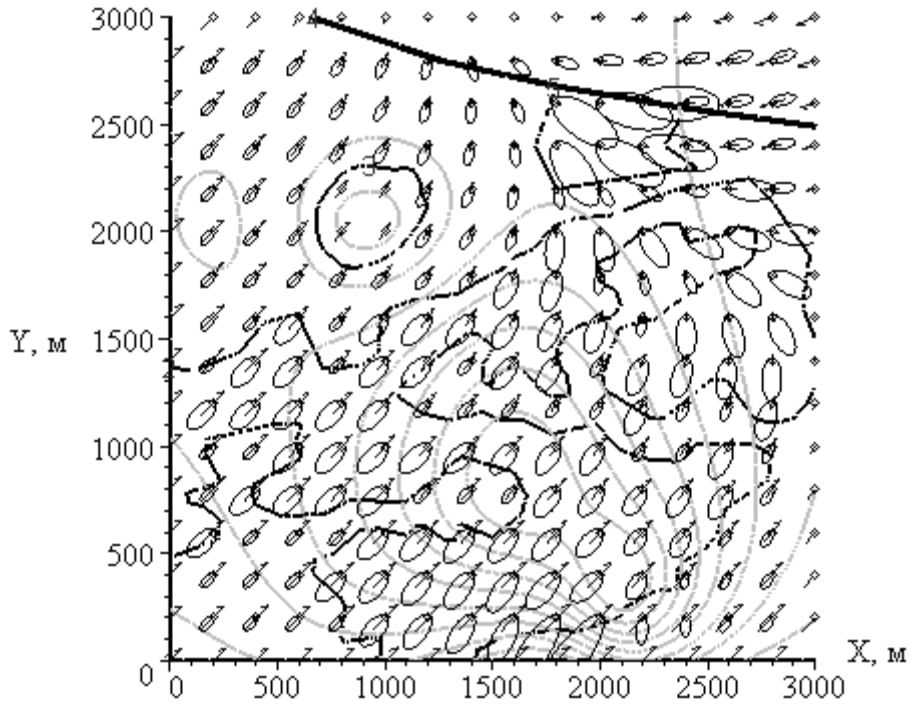

Рис. 2 – Сопряженное поле годографов скорости $V^*(x;y;\varphi)$ для модельных ландшафтно-метеорологических условий

Для сопряженного поля характерна ориентация годографов против направления суммарного действия ветра и градиента рельефа, а для элементов ландшафта с отсутствием горючего вещества, как для прямого, так и для сопряженного поля, годографы вырождаются в точки.

Подставляя в модель (1)-(17) параметры конкретных ландшафтно-метеорологических условий, получим параметры поля уязвимости объекта «заботы» поражающими факторами ЧС в виде изохрон процесса достижения границей области ЧС контура ОЗ (рис. 3).

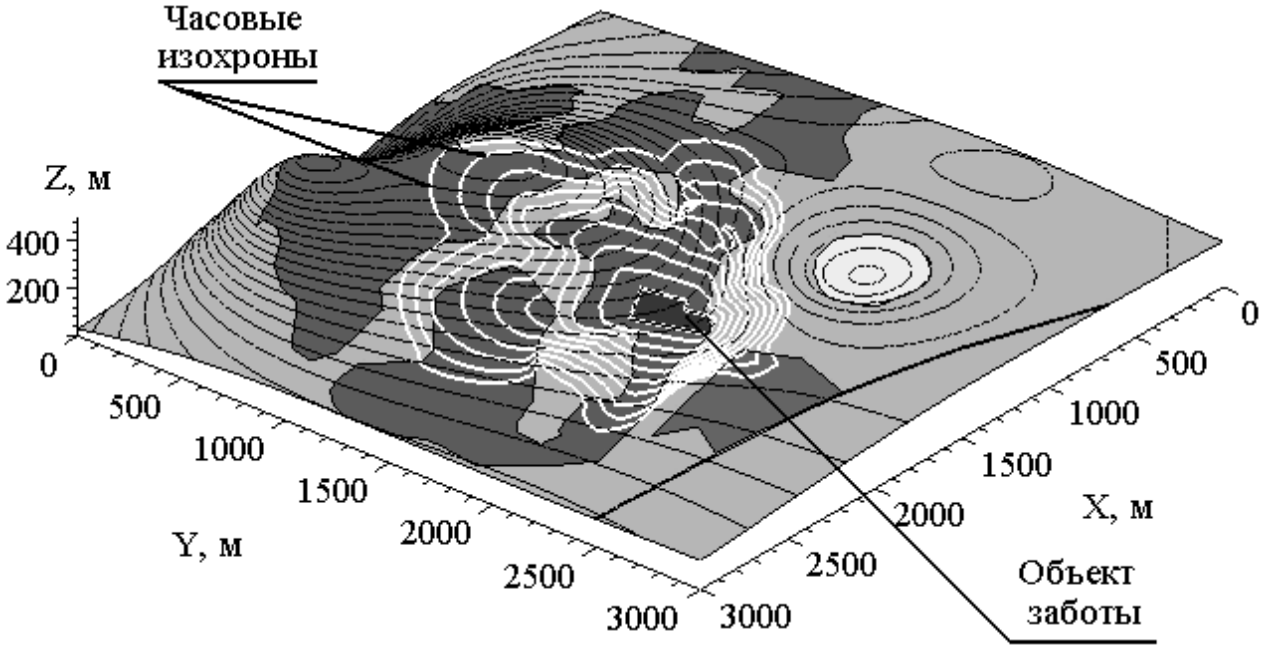

Рис. 3 – 3-D изображение часовых изохрон зоны уязвимости для объекта «заботы» в

неоднородных ландшафтно-метеорологических условиях

Данная зона уязвимости ОЗ представляет собой частный случай, характерный для конкретного поля ветра. Зная розу ветров данной местности, можно получить подобные зоны уязвимости при характерных параметрах ветра. Тогда объединение [10] всех полученных зон уязвимости ОЗ для каждого из поля ветров позволит найти общую зону уязвимости ОЗ.

Выводы. На примере природного пожара получена математическая модель поля уязвимости объекта «заботы» поражающими факторами ЧС, линии уровня которого представляют собой изохроны процесса достижения границей области ЧС контура ОЗ. Данные изохроны позволяют для фиксированных метеорологических условий определить резерв времени, который имеется у подразделений МЧС и сил ГО для проведения локализационных и эвакуационных работ, прежде чем граница области пожара не достигнет ОЗ. Особенно ценным получение параметров зоны уязвимости является в случае множественных очагов ЧС, например, - при пятнистом лесном пожаре, поскольку при этом нет необходимости строить прогноз динамики контура отдельно для каждого очага.

Литература:

1. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об’єктів підвищенної небезпеки. К.: Основа, 2003. – 192 с.
2. Меньшиков В.В., Швыряев А.А.Опасные химические объекты и техногенный риск: Учебное пособие. - М.: Изд-во Химия, фак. Моск. ун-та, 2003. - 254 с.
3. Гражданкин А.И., Дегтярев Д.В., Лисанов М.В., Печеркин А.С. Риск аварии как оценка нежелательных потерь//Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах: Труды Международной Научной Школы МА БР–2002 (Санкт-Петербург, 2-5 июля, 2002 г.). - СПб: Издательство “Бизнес-Пресса”. - 2002 – С.515-518.
4. Рева Г.В., Куценко Л.М., Росоха С.В. Анімаційне комп’ютерне моделювання деяких процесів в задачах пожежної безпеки // Проблемы пожарной безопасности. Харьков: Фолио, 2003. Юбилейный вып. – С. 147 – 164.
5. Абрамов Ю.А., Тарасенко А.А. Влияние природних факторов на скорость распространения ландшафтного пожара. – Харьков: УГЗ Украины, 2008. – 54 с.
6. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 161с.
7. Абрамов Ю.О., Тарасенко О.А. Модель динаміки контуру ландшафтної пожежі з урахуванням метеорологічних даних. Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції (Черкаси, 2008). – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2008. – С. 5-7
8. Абрамов Ю.О., Тарасенко О.А. Моделі динаміки контуру ландшафтної пожежі з урахуванням топографічних даних. Природничі науки та їх застосування в діяльності служби цивільного захисту: Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції (Черкаси, 2008). – Черкаси: АПБ ім. Героїв Чорнобиля, 2008. – С. 7-10
9. Гусев В.Г., Корчунова И.Ю. О методе расчета скорости распространения лесного низового пожара // Лесные пожары и борьба с ними. – Л.: ЛНИИЛХ, 1986. – С. 31 – 50
10. Воробьев О.Ю., Валендик Э.Н. Вероятное множественное моделирование распространения лесных пожаров. Новосибирск: Наука, СО АН СССР, 1978. – 160 с.

The mathematical model of a field of vulnerability of object protected from the hazard factors of an extreme situation is proved. Field level lines are isochrones of achievement object contour by extreme situation border.

Получена математическая модель поля уязвимости объекта «заботы» поражающими факторами чрезвычайной ситуации, линии уровня которого представляют собой изохроны процесса достижения границей области чрезвычайной ситуации контура объекта.

Отримано математичну модель поля уразливості об'єкта «турботи» вражаючими факторами надзвичайної ситуації, лінії рівня якого являють собою изохрони процесу досягнення

границею області надзвичайної ситуації контуру об’єкта.