

Ю.А. Абрамов, д-р техн. наук, профессор, НУГЗУ,  
А.А. Тарасенко, канд. техн. наук, НУГЗУ

## ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ЗАДАНИЯ ВХОДНЫХ ДАННЫХ НА РЕЗУЛЬТАТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ НАЗЕМНОГО ЛАНДШАФТНОГО ПОЖАРА

Осуществлено сравнение континуального и дискретного подходов, используемых при описании пирологических факторов природной среды, в их влиянии на результаты моделирования динамики контура наземного ландшафтного пожара и его интегральных характеристик. Показаны преимущества континуального подхода.

**Ключевые слова:** ландшафтный пожар, моделирование, пирологические факторы.

**Постановка проблемы.** Прогноз динамики масштабного природного пожара является необходимым элементом составления плана пожаротушения [1].

Особенностью математических моделей, описывающих развитие пожара, является способ задания входных данных – субмоделей природной среды в зоне пожара. Для традиционного геоинформационного описания природных условий характерен дискретный подход – либо растровый (решеточный) (grid, lattice) для задания пирологических свойств среды, либо нерегулярные триангуляционные сети (TIN) для описания рельефа.

Существенным недостатком данных субмоделей является их линейность, разрывность, зависимость точности описания от параметра растра и, таким образом, от объема хранимой информации. Данные особенности определяют точность получения выходной информации при моделировании динамики контура пожара.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существует большое количество методик, математических моделей, алгоритмов и компьютерных программ [2-3], предназначенных для получения прогноза динамики природного пожара.

В настоящее время наиболее совершенным программным продуктом [4], предназначенным для моделирования динамики контура пожара, его метрических и энергетических характеристик в реальных природных условиях, является геоинформационная система FARSITE [5], созданная на основании моделей [6-7]. Данная программа ориентированна на моделирование динамики лесного (верхового и низового) пожара и базируется на растровой цифровой модели местности (ЦММ) (параметр растра 30 метров) при описании пиро-

логических свойств растительного покрова и рельефа. При этом квазилинейные ландшафтные объекты малой ширины ( $30/\sqrt{2} \approx 21$  м) оказываются «невидимыми». Это приводит к нарушению топологических соотношений между границами ландшафтных объектов при цифровом описании местности – несвязные (разделенные негорючими противопожарными барьерами – дорогами, малыми реками, минерализованными полосами и т.д.) области оказываются связными, что, в виду относительно малой интенсивности тепловыделения кромки пожара, оказывается критичным при моделировании наземного (низового) пожара и приводит к существенному различию между реальной динамикой области пожара и ее модельным прогнозом.

Предложенный в цикле работ [8-12] континуальный (векторно-функциональный) подход является альтернативным к дискретному и способен: с высокой точностью описать границы ландшафтных объектов; функционально задать пирологические свойства внутри границ объекта; описать реальный рельеф местности в виде всюду аналитической функции; задать неоднородное векторное поле приземной скорости ветра, сформированное под влиянием рельефа и растительного покрова; получить прогноз динамики наземного ландшафтного пожара в заданных условиях.

**Постановка задачи и ее решение.** Целью работы является определения влияния способа (дискретного или континуального) задания ЦММ в качестве входной информации модели динамики области наземного ландшафтного пожара на точность выходной информации.

**Таблица 1 - Сравнение растровой и векторно-функциональной цифровой модели местности**

	Растровая (на примере [5-7])	Векторно-функциональная ([8-10])
Структурная единица	Растр $30 \times 30$ метров, $s=0.09$ га	Патч $100 \times 100$ метров, $s=1$ га
Границы ландшафтных объектов	Задаются ломаными с ортогональными звеньями длиной 30 м. Точность описания границы $30/\sqrt{2}$ м	Задаются ломаными, линейно аппроксимирующими картографированные границы. Точность совпадает с точностью карты
Рельеф	На каждом из растров задаются возвышение, крутизна и экспозиция в виде констант	На каждой из патчей задается бикубический сплайн, гладко сшитый с соседними (см. [8])
Пирологические свойства	Задаются в виде разрывной ступенчатой функции двух переменных (постоянное значение на каждом из растров)	Задаются в виде кусочно-непрерывной функции двух переменных (разрывы на границах объектов) (см. [9])
Приземный ветер	Постоянное векторное поле, не учитывает рельеф и растительный покров	Задание компонент скорости ветра в виде кусочно-непрерывной функции двух переменных (разрыв на границах объектов) (см. [10])

Особенности растровой и векторно-функциональной ЦММ приведены в табл. 1.

Графическая визуализация векторно-функциональной цифровой модели реальной местности (рис.1) приведена на рис. 2.



Рис. 1 – Космический снимок моделируемой местности

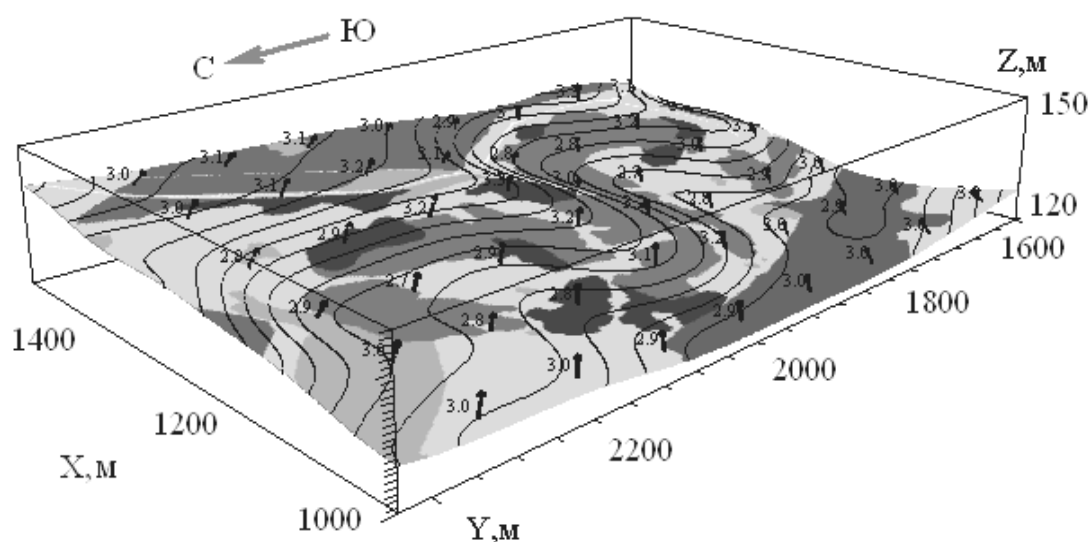


Рис. 2 – Визуализация векторно-функциональной ЦММ в зоне пожара (совмещенный 3-d рисунок тематических слоев рельефа, ветра и атрибутивной информации)

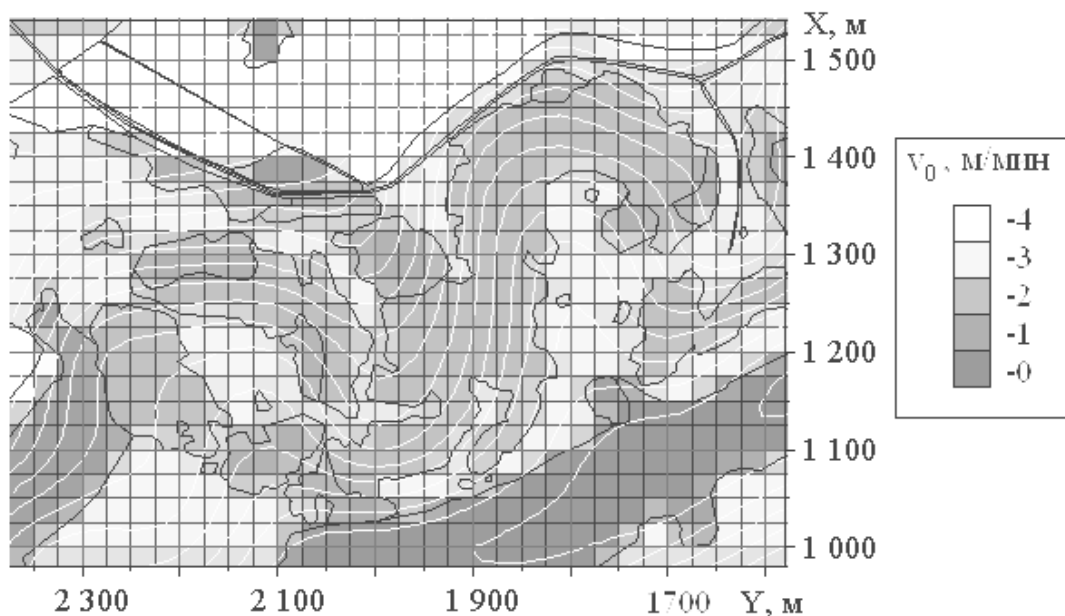
Благодаря «естественному» способу описания поверхности рельефа и корректному заданию границ ландшафтных объектов, векторно-функциональная модель обладает большей наглядностью, нежели растровая (рис. 3).

Для сравнения двух подходов была проведена «растеризация» векторно-функциональной ЦММ. Для этого была осуществлена дискретизация на 25-ти метровых растрах (выбрана кратность стометровым патчам), которая обеспечивает даже более высокую точность, нежели [5]. Дискретизация каждого  $j$ -ого теплофизического фактора  $F_j$ , заданного в виде [9], на каждом  $i$ -ом растре осуществлялась осреднением

$$\bar{F}_j(s_i) = \iint_{s_i} F_j(x; y) dx dy / s_i, \quad (1)$$

где  $s_i = 1/16$  га.

При этом интегрирование на каждом из растров осуществлялось численно методом прямоугольников (на 100 точках).



**Рис. 3 - Тоновое изображение дискретного поля  $v_0(x; y)$  невозмущенной скорости распространения кромки пожара на фоне векторной карты местности**

Найденное дискретное многокомпонентное поле теплофизических факторов позволило с помощью модели Ротермела [13-14] получить значение невозмущенной скорости  $v_0(x; y)$  распространения кромки пожара (рис.3).

Дискретизация рельефа  $Z(x; y)$ , заданного в виде [8], осуществлялась линейной аппроксимацией его на каждом из растров. Параметры  $A_i, B_i, C_i$  аппроксимирующих плоскостей

$$\tilde{z}_i(x; y) = A_i x + B_i y + C_i = 0 \quad (2)$$

находились из численного решения системы нелинейных уравнений, которые связывают средние значения возвышения, экспозиции и крутизны нелинейной поверхности рельефа с аналогичными параметрами линейной аппроксимации на каждом из растров

$$\left\{ \begin{array}{l} \iint_{s_i} Z(x; y) dx dy = \iint_{s_i} \tilde{z}_i(x; y) dx dy; \\ \iint_{s_i} \operatorname{arctg} \left( -\frac{\partial Z}{\partial y}; -\frac{\partial Z}{\partial x} \right) dx dy = \iint_{s_i} \operatorname{arctg} \left( -\frac{\partial \tilde{z}_i}{\partial y}; -\frac{\partial \tilde{z}_i}{\partial x} \right) dx dy; \\ \iint_{s_i} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\left( \frac{\partial Z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial Z}{\partial y} \right)^2} \right) dx dy = \iint_{s_i} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\left( \frac{\partial \tilde{z}_i}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \tilde{z}_i}{\partial y} \right)^2} \right) dx dy. \end{array} \right. \quad (3)$$

Вычисление левых частей первого и третьего уравнения при этом осуществлялось аналитически на отдельных сплайнах поверхности  $Z(x; y)$ , второго – численно (методом прямоугольников через каждый метр). Правые части всех уравнений вычислялись аналитически.

На данном ландшафте было задано постоянное поле приземного ветра.

Таким образом было осуществлено задание исходных данных в том виде, который используется в моделях [6-7], положенных в основу программы FARSITE (даже в более точном, поскольку использован более мелкий растр).

Для определения влияния способа задания ЦММ на расчетную динамику области пожара был осуществлен сравнительный компьютерный эксперимент – рассчитана с помощью моделей [11-12] динамика одного и того же очага пожара по «дискретной» и по «континуальной» местности. На рис. 4 приведены четырехминутные кроки пожара.

Сравнение рисунков выявляет главный недостаток растрового подхода – кромка пожара «не замечает» противопожарного барьера в виде грунтовой дороги (ширина 2 м), а результат моделирования демонстрирует распространение пожара на близлежащее хлебное поле.

Для сравнения на рис. 4-б для тех же ландшафтных условий, но заданных в виде векторно-функциональных моделей, приведен расчет динамики развития того же очага. При этом использован континуальный

нуальный подход при описании свойств ландшафта и дифференциальный - при задании скорости ветра.

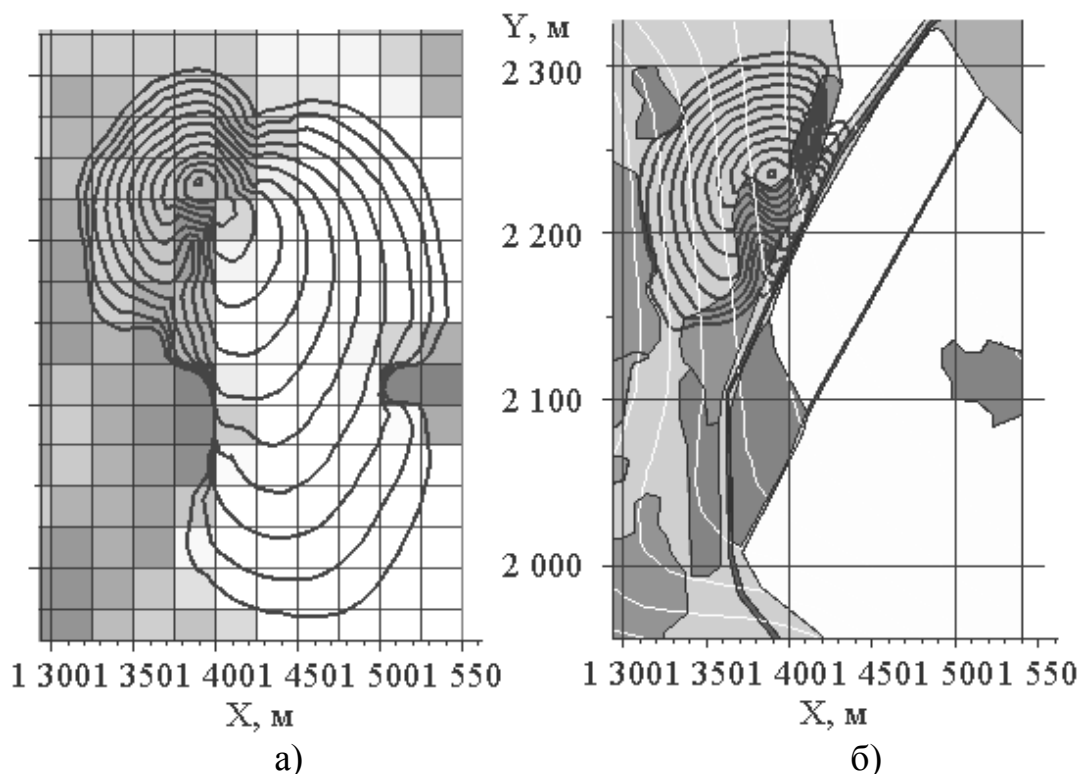


Рис. 4 – Динамика области пожара (ветер северный,  $2.5 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ ): а – при растровом задании ландшафта; б - при векторно-функциональном задании ландшафта

Результат моделирования существенно контрастирует с первым случаем – несмотря на достаточно хорошее совпадение контуров пожара в северо-западной его части (до дороги), во втором случае имеет место остановка пожара противопожарным барьером, что находит свое подтверждение при наблюдении за реальным пожаром.

Таким образом, нарушение топологических соотношений между границами ландшафтных объектов, имеющее место при растровом задании ландшафта, не позволяет адекватно описать динамику области пожара.

Прогнозируемые интегральные параметры пожара позволяют количественно оценить степень рассогласования двух моделей. На рис. 5 приведены графики, демонстрирующие динамику роста периметра и площади пожара, а на рис 6 – графики динамики относительных погрешностей данных величин.

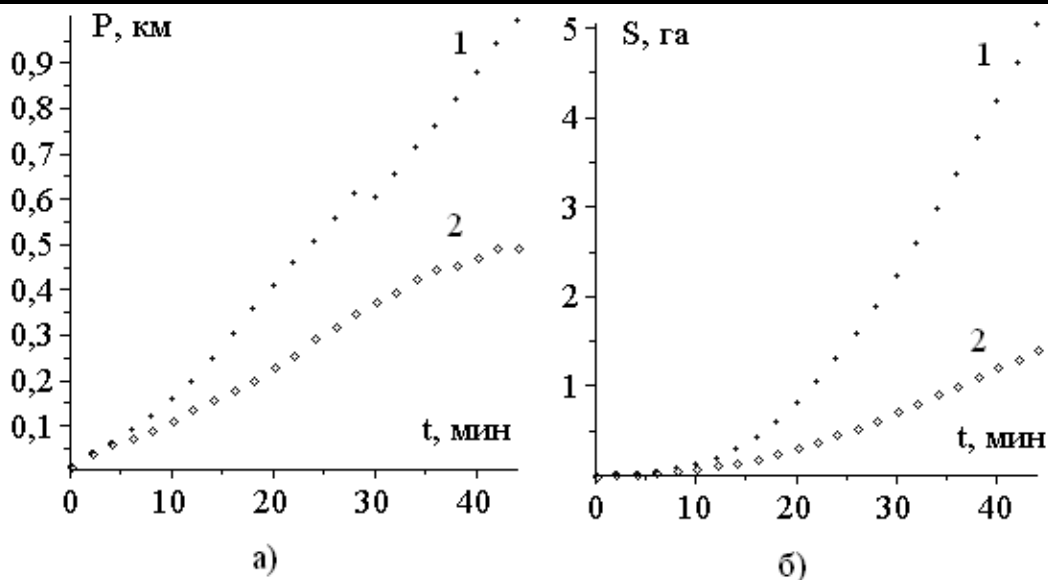


Рис. 5 – График динамики: а- периметра пожара; б- площади пожара. Задание ландшафта: 1 – дискретное; 2 –континуальное

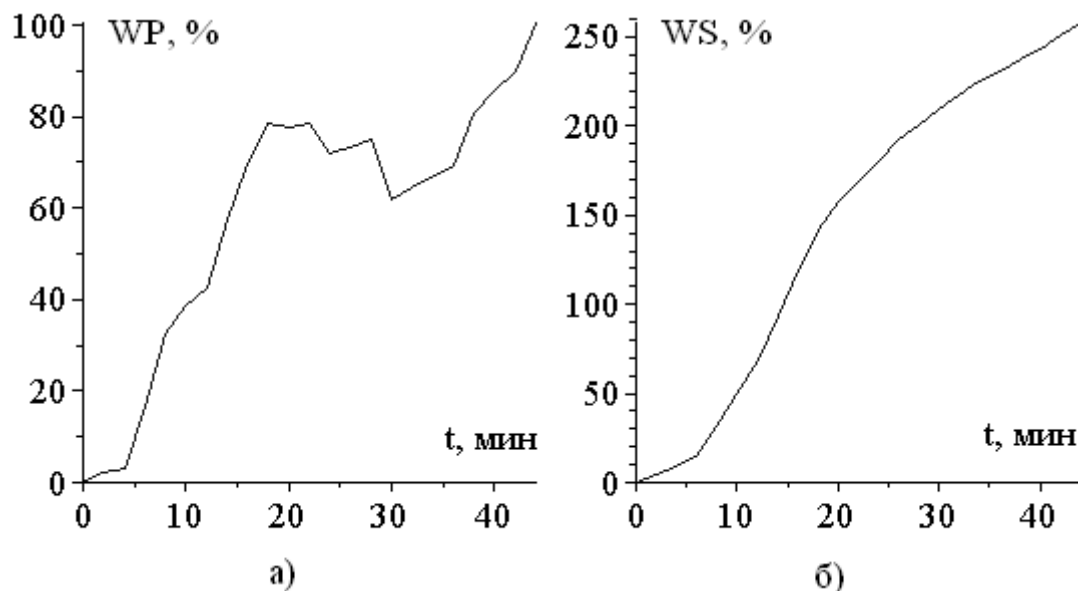


Рис. 6 – График динамики относительной погрешности: а- периметра пожара; б- площади пожара

Из анализа данных графиков видно, что даже для пожара продолжительностью менее часа результаты моделирования величины периметра пожара, полученные на основе дискретного подхода, демонстрируют более чем стопроцентное расхождение, а по площади – более чем 250% по сравнению с результатами, полученными на основании континуального подхода. Следует подчеркнуть, что приведенные результаты получены осреднением на 25-ти метровом растре, а при осреднении на 30-ти метровом следует ожидать еще более высоких погрешностей.

В заключении необходимо сопоставить объем информации,

описывающей ландшафтно-метеорологические условия при разных подходах. В табл. 2 приведено сравнение количества информации, которой описывается единица площади ландшафта при дискретном (для 25-ти метрового растра) и континуальном (для стометрового патча) подходах.

**Таблица 2 - Сравнение количества хранимой информации для описания 1 га площади ландшафта**

Задаваемый параметр	Подход при задании ландшафта	
	Дискретный	Континуальный
Рельеф	16 растров × 3 параметра	16 параметров
Координаты растра / Граница объектов	16 растров × 2 координаты растра	~ 20 вершин на 1 га × 2 координаты вершины
Свойства объектов	16 растров × 1 значение × 8 тематических слоев	~5 разнородных объектов на 1 га × 1 значение × 10 тематических слоев
Скорость ветра	3 компоненты скорости ветра на всей области	3 компоненты скорости ветра × 16 параметров

Разница в количестве описываемых тематических слоев объясняется заданием дополнительных параметров, необходимых для описания влияния растительности на скорость ветра при континуальном подходе.

Из таблицы видно, что при континуальном подходе имеет место выигрыш при описании рельефа и при задании тематических слоев в пределах их границ и значительный проигрыш - при задании скорости приземного ветра. Последний фактор в конечном итоге определяет меньшую в 1.8-1.9 скорость обработки информации при описании динамики наземного ландшафтного пожара в случае использования континуального подхода по сравнению с дискретным. В тоже время континуальный подход обеспечивает несравнимо более высокую точность.

**Выводы.** Использование векторно-функциональных моделей позволяет существенно повысить точность описания динамики контура наземного ландшафтного пожара по сравнению с наиболее совершенными способами описания, существующими на данный момент. Повышение точности достигается за счет использования в качестве входных данных континуально задаваемых пространственно распределенных параметров ландшафта, а также за счет дифференциального подхода при задании поля скорости приземного ветра.



## ЛИТЕРАТУРА

1. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. – М.: Госкомлес СССР, 1976. – 110 с.
2. A.L. Sullivan. A review of wildland fire spread modelling, 1990-present. Empirical and quasi-empirical models // <http://arxiv.org/abs/0706.4128v1>.
3. A.L. Sullivan. A review of wildland fire spread modelling, 1990-present.
4. Mathematical analogues and simulation mod // <http://arxiv.org/abs/0706.4130v1>.
5. Richard D. Stratton. Guidance on Spatial Wildland Fire Analysis: Models, Tools, and Techniques. General Technical Report RMRS-GTR-183. 2006–20 p.
6. <http://www.pbs.org/wgbh/nova/fire/simulation.html>.
7. Finney M.A. FARSITE: Fire Area Simulator / M.A. Finney - Model Development and Evaluation. USDA For. Serv. Res. Pap. RMRS-RP-4. 1989.
8. Finney M.A. Design of Regular Landscape Fuel Treatment Patterns for Modifying Fire Growth and Behavior / M.A. Finney // Forest Science 47(2), 2001. - p. 219-228.
9. Абрамов Ю.А. Формирование априорной информации для системы ликвидации последствий чрезвычайной ситуации / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. АЦЗ України. Вип. 6.– Харків: УЦЗУ, 2007. – С. 11-22
10. Тарасенко О.А. Математичне моделювання вихідних параметрів областей надзвичайних ситуацій / О.А. Тарасенко // Проблеми надзвичайних ситуацій. Зб. наук. пр. УЦЗ України. Вип. 8. - Харків: УЦЗУ, 2008. - С. 185-193
11. Абрамов Ю.А. Математическая модель локальных воздушных течений над поверхностью рельефа / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Науковий вісник будівництва. Вип. 45.– Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2008. – С. 132-139
12. Абрамов Ю.А. Аналитическая математическая модель контура зоны локальной чрезвычайной ситуации / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Науковий вісник будівництва. Вип. 42.– Харків: ХДТУБА, ХОТВ АБУ, 2007. – С. 171-174
13. Тарасенко А.А. Модель динамики контура природного пожара под действием совместного влияния ландшафтно-метеорологических факторов / Ю.А. Абрамов, А.А. Тарасенко // Проблемы пожарной безопасности. - Харьков: УГЗУ, 2008. – Вып. 24. - С. 194-200

14. Rothermel R.C. Predicting Behavior and Size of Crown Fires in the Northern Rocky Mountains / R.C. Rothermel // USDA For. Serv. Research Paper INT-438. 1991–52 p.

15. Andrews P.L. Charts for Interpreting Wildland Fire Behavior Characteristics / P.L. Andrews, R.C. Rothermel // USDA For. Serv. General Technical Report INT-131. 1982 – 24 p.

nuczu.edu.ua

Ю.О. Абрамов, О.А. Тарасенко

**Вплив способу завдання вхідних даних на результат моделювання динаміки наземної ландшафтної пожежі.**

Проведено порівняння континуального та дискретного підходів, що застосовуються при описі пірологічних факторів природного середовища, в їх впливі на результати моделювання динаміки контуру наземної ландшафтної пожежі та її інтегральних характеристик. Показано переваги континуального підходу.

**Ключові слова:** ландшафтна пожежа, моделювання, пірологічні фактори.

Y.A. Abramov, O.A. Tarasenko

**Influence of specifying input data method at the result of ground wildfire simulation.**

The comparison of the continuum and discrete approaches for the describing pyrological factors of the environment is present. Their impact on the results of contour dynamics simulation of the wildfire and its integral characteristics. The advantages of the continuum approach are shown.

**Keywords:** landscape fire modeling, pyrological factors.