

УДК 528.854

Е.Л. Сергеева

Национальный горный университет, Днепрпетровск

## ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ЛОГИЧЕСКОГО ВЫВОДА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПОЖАРООПАСНОСТИ ТЕРРИКОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ (НА ПРИМЕРЕ ДОНБАССА)

*Представлены практические аспекты применения данных мультиспектральной съемки Terra (ASTER) и Landsat (TM, ETM+) к решению задач мониторинга горнопромышленных регионов, в частности, составлению карты расположения пожароопасных терриконов участка Донецкого угольного бассейна. Выполнено построение системы нечеткого логического вывода для классификации терриконов Донбасса по степени пожароопасности на основе данных оценки значений приповерхностной температуры, полученной по тепловому каналу Landsat, и сведений о состоянии растительного покрова на основе расчета спектральных индексов.*

**Ключевые слова:** космическая съемка; террикон; спектральный индекс; нечеткий логический вывод.

### Введение

**Постановка проблемы.** Процессы горения углесодержащих пород, обусловленные эндогенными и экзогенными воздействиями, являются основополагающим фактором нарушения экономического и экологического баланса горнопромышленных регионов, представляя опасность здоровью и жизни населения. Высокая температура – характерная особенность участков поверхности земли с протекающими процессами тления либо горения. Выделение участков тепловых аномалий, вызванных угольными пожарами, является приоритетной проблемой более чем для 3,6 тысяч угольных месторождений мира, крупнейшие из которых находятся в Индии, Китае, США [1].

Основными источниками угольных пожаров Донбасса являются терриконы – искусственные насыпи конической формы, содержащие в среднем 5-15% угольных остатков. Процессы тления и горения углесодержащих пород терриконов обуславливают загрязнение атмосферы прилегающих территорий побочными продуктами горения, такими как SO<sub>2</sub>, NO, CO, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> и др. По завершении процессов горения поверхность недействующего террикона покрывается растительностью. Таким образом, наличие и состояние растительного покрова играет важную роль при оценке протекающих процессов тления и горения углесодержащих пород террикона. Индикаторами процессов горения являются показатель влагосодержания поверхности террикона и значение его приповерхностной температуры.

Для анализа состояния терриконов широко применяются методы полевых исследований, использующие данные замеров температуры и концентрации вредных газов над очагом горения. Одна-

ко для мониторинга крупных территорий такие методы непригодны либо малоэффективны. Поэтому в настоящее время широкое распространение получили методы обработки материалов космической съемки.

Пожароопасность представляет собой вероятность возникновения процессов тления и горения углесодержащих пород. Классы пожароопасности терриконов (например, "горящий террикон", "негорящий террикон") являются классами с нечеткими границами, характеризующиеся плавным переходом от класса к классу, что позволяет применять аппарат теории нечетких множеств и нечеткого логического вывода к решению задач оценки пожароопасности с использованием данных приповерхностной температуры, сведений о состоянии растительности и влажности поверхности террикона.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Решению проблем угольных пожаров с использованием материалов космической съемки, посвящены работы ряда научно-исследовательских организаций мира, среди которых: Федеральный институт геонаук и природных ресурсов (BGR, Германия), Научно-исследовательский институт геофизической разведки угля (RICGE, Китай), Немецкий аэрокосмический центр, Институт дистанционного зондирования (Индия), Институт фотограмметрии и дистанционного зондирования (Австрия), Система университетов штата Джорджия (США) и др. [2 – 7]. В Украине исследования проблем горнопромышленных регионов по данным космической съемки выполняются специалистами кафедры геоинформационных систем Национального горного университета [8].

Данные космической съемки в видимом, ближнем, среднем и тепловом инфракрасном поддиапа-

зонах электромагнитного спектра сканирующих радиометров ASTER, TM/ETM+, MODIS применяются для:

- обнаружения, картографирования и мониторинга угольных пожаров [9];
- выделения поверхностных тепловых аномалий [9, 10];
- классификации типов земного покрова [11].

В процессе анализа территорий широкое распространение получили методы исследований с использованием характеристик растительности (нормализованный разностный вегетационный индекс (Normalized Difference Vegetation Index,  $I_{NDVI}$ ), относительный вегетационный индекс (Ratio Vegetation Index,  $I_{RVI}$ ), вегетационный индекс "зелености" (Greenness Vegetation Index,  $I_{GVI}$ ), модифицированный почвенный вегетационный индекс (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index,  $I_{MSAVI}$ ) и другие) [12]. Качество растительности непосредственно зависит от интенсивности процессов горения углесодержащих пород. Для оценки влажности почв используется нормализованный разностный индекс влагосодержания (Normalised Difference Water Index,  $I_{NDWI}$ ).

Индикаторами процессов горения являются участки повышенного теплового фона – тепловые аномалии. Существующие подходы к мониторингу состояния терриконов по космоснимкам базируются, прежде всего, на методах и алгоритмах выделения поверхностных тепловых аномалий, которые, в свою очередь, делятся на [13]:

- алгоритмы с фиксированными порогами;
- контекстные адаптивные алгоритмы;
- многовременные алгоритмы.

Алгоритмы с фиксированными порогами основываются на разделении множества фоновых пикселей и пикселей тепловых аномалий на основе глобального, определенного для изображения порога.

Контекстные адаптивные алгоритмы производят выявление поверхностных тепловых аномалий, основываясь на вычислении температурных различий фоновых пикселей и пикселей пожара в пределах окрестности соседства анализируемого пикселя [13 – 15].

Многовременные алгоритмы применяются для выявления пикселей, неизменных на сериях разновременных изображений и, таким образом, используются для мониторинга аномалий приповерхностной температуры. Многовременные преобразования используются также для устранения шума (ложного влияния солнечного излучения и тепловой инерции подстилающей поверхности) и снижения вычислительных затрат обработки изображений [15].

Результатом выполнения таких алгоритмов является подмножество пикселей космоснимка, отнесенных к классу тепловых аномалий и соответствующих участкам исследуемой территории, харак-

теризующимся протекающими процессами горения углесодержащих пород без оценки степени принадлежности пикселей к классу.

**Целью работы** является оценка пожароопасности терриконов горнопромышленных регионов на основе построения системы нечеткого логического вывода с использованием спектральных индексов и сведений о температуре.

## 1. Исходные данные и тестовый участок

Площадь тестового участка, насыщенного терриконами, составляет 785 км<sup>2</sup> и включает часть территории города Донецк и его окрестностей (рис. 1). Общее число терриконов тестового участка – 102.

В работе использованы съемки TM/ETM+ (дата съемки: 09.05.2002) и ASTER (дата съемки: 29.07.2005) с пространственным разрешением 15 м, 30 м, 60 м и 90 м.

спомогательными данными для дешифровки терриконов Донбасса служили материалы съемки сверхвысокого разрешения Internet-сервиса Google и топографические карты.



Рис. 1. Тестовый участок

## 2. Построение системы нечеткого логического вывода

Нечетким множеством  $A$  в некотором пространстве  $X$  называется множество пар

$$A = (x, \mu_A(x)); x \in X,$$

где

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] -$$

функция принадлежности нечеткого множества  $A$ . Данная функция приписывает каждому элементу  $x \in X$  степень его принадлежности к нечеткому множеству  $A$  ( $0 \leq \mu_A \leq 1$ ) [16, 17].

Нечеткий логический вывод представляет собой аппроксимацию зависимости "входы-выход" на основе лингвистических высказываний "если-то" и

логических операций над нечеткими множествами. Схема процесса оценки пожароопасности терриконов на основе нечеткого логического вывода представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема процесса оценки пожароопасности терриконов на основе нечеткого логического вывода

Пусть  $X$  – множество характеристик терриконов Донбасса, состоящее из трех элементов,  $X = x_1, x_2, x_3$  :

- $x_1$  – растительность;
- $x_2$  – влажность;
- $x_3$  – температура.

Состояние растительности оценивается на основе значений нормализованного разностного вегетационного индекса ( $I_{NDVI}$ ). Для терриконов тестового участка  $x_1 \in [-0.02; 0.61]$ . Влажность почвы оценивается на основе нормализованного разностного индекса влагосодержания ( $I_{NDWI}$ );  $x_2 \in [0.63; 0.80]$ . Значения приповерхностной тем-

пературы ( $^{\circ}\text{C}$ ) рассчитываются по формуле Планка на основе данных канала 6 сенсора ETM+ [18];  $x_3 \in [19.21; 31.87]$ .

Поскольку изображение террикона может состоять из пикселей, соответствующих участкам растительного покрова, открытого грунта и смешанных пикселей, в расчет брались усредненные значения пикселей, составляющих изображение террикона.

В качестве функции принадлежности для множества  $X$  характеристик терриконов использована гауссовская функция

$$\mu(x_i) = \exp\left(-\frac{x_i - a}{2b^2}\right), i = 1, 2, 3$$

где  $a$  – координата максимума функции принадлежности;  $b$  – коэффициент концентрации функции принадлежности.

Выходная переменная  $y$  – степень пожароопасности террикона.

Для выходной переменной  $y$  использована треугольная функция принадлежности на основе кусочно-линейной аппроксимации.

$$\mu(y) = \begin{cases} 0, & y < 0.1; & y > 0.9; \\ 2.5(y - 0.1), & 0.1 \leq y \leq 0.5; \\ -2.5(y - 0.5), & 0.5 < y \leq 0.9; \end{cases}$$

$T_1 =$  ["отсутствует", "редкая", "густая"] – множество термов для переменной  $x_1$ ;

$T_2 =$  ["пониженная", "умеренная", "повышенная"] – множество термов для переменной  $x_2$ ;

$T_3 =$  ["низкая", "средняя", "высокая"] – множество термов для переменной  $x_3$ ;

$T_y =$  ["незначительная", "существенная", "угрожающая"] – множество термов для переменной  $y$ ;  $y \in [0, 1]$ .

Террикон является горящим в том случае, если он не покрыт растительностью ( $x_1 =$  "отсутствует"), характеризуется пониженной влажностью почвы ( $x_2 =$  "пониженная"), и повышенным значением приповерхностной температуры ( $x_3 =$  "высокая").

По окончании эксплуатации и прекращении процессов горения террикон покрывается растительностью. Таким образом, террикон можно считать негорящим в том случае, если он полностью покрыт растительностью ( $x_1 =$  "густая") и характеризуется низким значением приповерхностной температуры ( $x_3 =$  "низкая"). Данные посылки составили основу нечеткой базы знаний, состоящей из 27 нечетких правил, позволяющих определить значение выходной переменной  $y$  (табл. 1).

Нечеткий вывод Мамдани выполнялся по базе знаний [19]:

$(x_1 = \tilde{t}_{1j}) \Theta_j (x_2 = \tilde{t}_{2j}) \Theta_j (x_3 = \tilde{t}_{3j}) \Rightarrow y = \tilde{d}_j, j = \overline{1, m}$ ,  
 где  $\tilde{t}_{ij}$  – нечеткий терм, которым оценивается переменная  $x_i$  в  $j$ -ом правиле,  $j = \overline{1, m}$ ;  $\tilde{d}_j$  – заключение  $j$ -го правила;  $m = 27$  – количество правил в базе знаний;  $\Theta_j$  – логическая операция объединения либо пересечения, связывающая фрагменты посылки  $j$ -го правила;  $\Rightarrow$  – нечеткая импликация.

$$\mu_j(X) = (\mu_j(x_1)) \chi_j (\mu_j(x_2)) \chi_j (\mu_j(x_3)), j = \overline{1, m},$$

где  $\chi_j$  – обозначает норму.

Результат нечеткого вывода можно представить в виде:

$$\tilde{y} = \left( \frac{\mu_1(X)}{\tilde{d}_1}, \frac{\mu_2(X)}{\tilde{d}_2}, \frac{\mu_3(X)}{\tilde{d}_3} \right).$$

Система нечеткого логического вывода для оценки пожароопасности терриконов состоит из следующих элементов (рис. 2):

- фазификатор, преобразующий множество характеристик терриконов ( $X$ ) в вектор нечетких множеств ( $\tilde{X}$ );
- нечеткая база знаний, содержащая информацию о зависимости  $y = f(X)$  в виде лингвистических правил "если-то";
- машина нечеткого логического вывода, которая на основе правил базы знаний определяет значение выходной переменной в виде нечеткого множества  $\tilde{y}$ , соответствующего нечетким значениям входных переменных ( $\tilde{X}$ );
- дефазификатор, преобразующий выходное нечеткое множество  $\tilde{y}$  в четкое число  $y$ .

Построение системы нечеткого логического вывода осуществлялось в системе MATLAB с использованием пакета прикладных программ Fuzzy Logic Toolbox, базовым понятием которого является система нечеткого вывода (Fuzzy Inference System, FIS-структура) [19].

Fuzzy Logic Toolbox включает 11 встроенных функций принадлежности, которые используют кусочно-линейную функцию, гауссовское распределение, сигмоидную кривую, квадратическую и кубические кривые.

Формирование и модификация нечетких правил осуществляется с использованием редактора базы знаний (Rule Editor) FIS-редактора. Визуализация нечеткого логического вывода производится с помощью GUI-модуля Rule Viewer, позволяющего проиллюстрировать ход логического вывода по каждому правилу, получение результирующего нечеткого множества и выполнение процедуры дефазификации (рис. 3).

На рис. 4 представлена визуализация поверхности "входы-выход" с помощью GUI-модуля Surface Viewer, позволяющего вывести графическое изображение зависимости значения выходной переменной от входных.

### 3. Обсуждение результатов

На основе построенной системы нечеткого логического вывода выполнено разбиение терриконов тестового участка на классы пожароопасности (рис. 5).

Таблица 1

Фрагмент нечеткой базы знаний

Растительность	Влажность	Температура	Пожароопасность
отсутствует	пониженная	высокая	угрожающая
отсутствует	пониженная	средняя	угрожающая
редкая	пониженная	высокая	угрожающая
редкая	умеренная	средняя	существенная
отсутствует	умеренная	низкая	существенная
редкая	пониженная	средняя	существенная
редкая	умеренная	низкая	незначительная
редкая	повышенная	средняя	незначительная
густая	повышенная	средняя	незначительная
густая	повышенная	низкая	незначительная

Весовые коэффициенты, определяющие меру уверенности эксперта в адекватности правил, в данной работе заданы равными 1.

Пусть  $\mu_j(x_i)$  – функция принадлежности входа  $x_i \in [x_i^-, x_i^+]$  нечеткому терму  $\tilde{t}_{ij}$ , т.е.

$$\tilde{t}_{ij} = \int_{x_i \in [x_i^-, x_i^+]} \mu_j(x_i) / x_i ; \mu_{d_j}(y) – функция принадлежности выхода  $y \in [y^-, y^+]$  нечеткому терму  $\tilde{d}_j$ , т.е.$$

$\tilde{d}_j = \int_{y \in [y^-, y^+]} \mu_{d_j}(y) / y$ .

$$\tilde{d}_j = \int_{y \in [y^-, y^+]} \mu_{d_j}(y) / y$$

Степень выполнения посылки  $j$ -го правила для текущего входного вектора  $X = x_1, x_2, x_3$  определяется как:

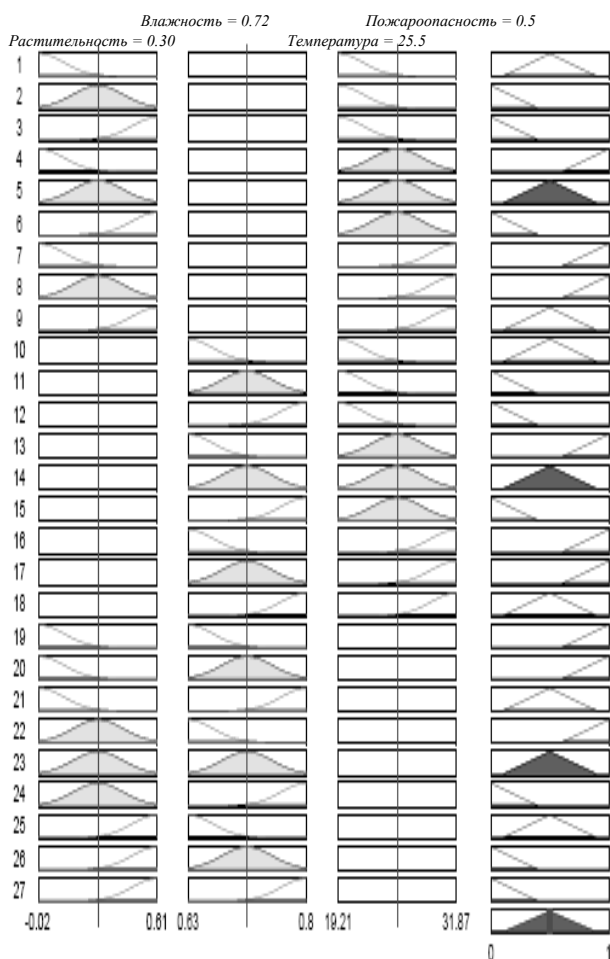


Рис. 3. Визуализация нечеткого логического вывода

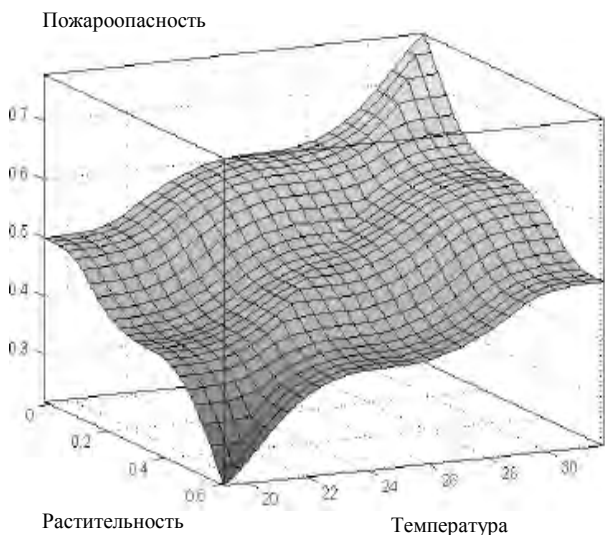
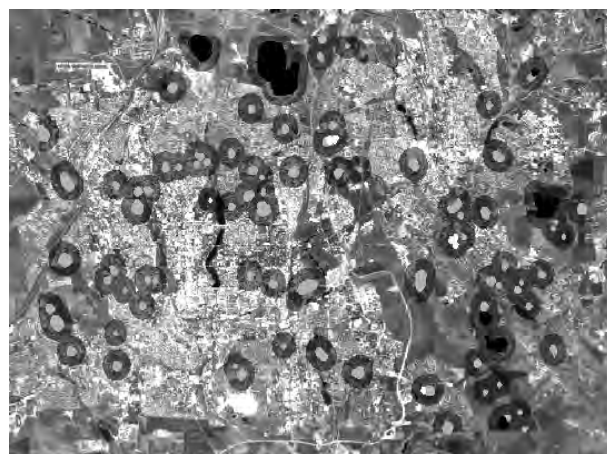


Рис. 4. Визуализация поверхности "входы-выход" с помощью Surface Viewer

Вокруг каждого террикона построены буферные зоны радиуса 500 м (рис. 5), в пределах которых следует ограничить пребывание людей и исключить возможность строительства жилых и хозяйственных зданий и сооружений.



- угрожающая пожароопасность
- существенная пожароопасность
- незначительная пожароопасность
- буферные зоны

Рис. 5. Разбиение терриконов тестового участка на классы пожароопасности

В результате выполнения процедур нечеткой классификации к классу терриконов с незначительной пожароопасностью отнесено 7 объектов, 7 терриконов отнесено к классу с угрожающей пожароопасностью. Из них, согласно имеющимся данным Internet-сервиса Google, горящими и склонными к возгоранию являются терриконы шахты им. Засядько на севере Донецкая, шахты "Восточная" и др. Негорящими являются поросшие растительностью недействующие терриконы.

## Выводы

В работе описан процесс построения системы нечеткого логического вывода для оценки пожароопасности терриконов Донецкого угольного бассейна на основе спектральных индексов и сведений о температуре, полученных по данным космической съемки.

Представленный процесс анализа данных мониторинга терриконов Донецкого угольного бассейна, базирующийся на их комплексной обработке и классификации на основе нечеткого логического вывода, позволяет использовать сведения о расположении терриконов, классифицировать их по пожароопасности и в дальнейшем производить комплексную оценку их техногенного воздействия на окружающую среду Донбасса.

## Список литературы

1. Stracher G.B. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe / G.B. Stracher, T.P. Taylor // *International Journal of Coal Geology*. – 2004. – 59. – P. 7-17.
2. Федеральный институт геонаук и природных ресурсов [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.bgr.de>.

3. Научно-исследовательский институт геофизической разведки угля [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.ricge.com.cn>.
4. Немецкий аэрокосмический центр [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.dlr.de>.
5. Chatterjee R.S. Coal fire mapping from satellite thermal IR data – A case example in Jharia Coalfield, Jharkhand, India / R.S. Chatterjee // *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. – 2006. – 60. – P. 113-128.
6. Институт фотограмметрии и дистанционного зондирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.ipf.tuwien.ac.at>.
7. Glenn B. Stracher. Coal fires burning out of control around the world: thermodynamic recipe for environmental catastrophe / Glenn B. Stracher, Tammy P. Taylor // *International Journal of Coal Geology*. – 2004. – 59. – P. 7-17.
8. Busygin B. Using the space survey data for fire objects monitoring of the Donetsk coal basin / B. Busygin, I. Garkusha, K. Sergieieva // *International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010, 12<sup>th</sup>. Prague, Czech Republic, May 24-26, 2010: Proceedings*. – Prague: Lesnicka prace, 2010. – С. 25-30.
9. Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China / S. Voigt, A. Tetzlaff, J. Zhang, C. Kunzer, B. Zhukov, G. Strunz, D. Oertel, A. Roth, P. Dijk, H. Mehl // *International Journal of Coal Geology*. – 2004. – 59. – P. 121-136.
10. Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: Investigating two arid mining regions in north-central China / C. Kuenzer, J. Zhang, A. Tetzlaff, P. Dijk, S. Voigt, H. Mehl, W. Wagner // *Applied Geography*. – 2007. – 27. – P. 42-62.
11. Land use and vegetation fires in Jambi Province, Sumatra, Indonesia / F. Stolle, K.M. Chomitz, E.F. Lambin, T.P. Tomich // *Forest Ecology and Management*. – 2003. – 179. – P. 277-292.
12. Quantitative analysis of land surface temperature-vegetation indexes relationship based on remote sensing / W. Ma, Y. Chen, J. Zhou, Gong adu. // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2008. – XXXVII(B6b). – P. 261-264.
13. Extracting thermal anomalies of underground coal fire from multi-temporal daytime images / Zhuang Wei, Chen Yunhao, Cai Hongchun, Xu Jie // *Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. IGARSS 2007. IEEE International*. – 23–28 July 2007. – P. 3732-3735.
14. Detecting unknown coal fires: synergy of automated coal fire risk area delineation and improved thermal anomaly extraction / C. Kuenzer, Li.J. Zhang, S. Voight, H. Mehl, W. Wagner // *International Journal of Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 28, No. 20. – P. 4561-4585.
15. Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China / Stefan Voigt, Anke Tetzlaff, Jianzhong Zhang, Claudia Kunzer, Boris Zhukov, Gunter Strunz, Dieter Oertel, Achim Roth, Paul van Dijk, Harald Mehl // *International Journal of Coal Geology*. – 2004. – 59. – P. 121-136.
16. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств: пер. с франц. / А. Кофман. – М.: Радио и связь, 1982. – 432 с.
17. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский; пер. с польск. И. Д. Рудинского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
18. Detection of surface temperature from LANDSAT-7/ETM+ / Y. Suga, H. Ogawa, K. Ohno, K. Yamada // *Advanced Space Resources*. – 2003. – Vol. 32, No. 11. – P. 2235-2240.
19. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

Поступила в редколлегию 18.09.2010

Рецензент: канд. физ.-мат. наук, проф. Л.В. Сарычева, Национальный горный университет, Днепрпетровск.

**ПОБУДОВА СИСТЕМИ НЕЧІТКОГО ЛОГІЧНОГО ВИВІДУ  
ДЛЯ ОЦІНКИ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНОСТІ ТЕРИКОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ  
МАТЕРІАЛІВ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ (НА ПРИКЛАДІ ДОНБАСУ)**

К.Л. Сергеева

Представлені практичні аспекти застосування даних мультиспектральної зйомки Terra (ASTER) і Landsat (TM, ETM+) до вирішення задач моніторингу гірничопромислових регіонів, а саме, створення карти розташування пожежо-небезпечних териконів ділянки Донецького вугільного басейну. Виконано побудову системи нечіткого логічного виводу для класифікації териконів Донбасу за ступенем пожежо-небезпечності з використанням даних оцінки значень приповерхневої температури, отриманої для теплового каналу Landsat, а також даних про стан рослинного покриву на підставі розрахунку спектральних індексів.

**Ключові слова:** космічна зйомка; терикон; спектральний індекс; нечіткий логічний вивід.

**CONSTRUCTION OF THE FUZZY LOGICAL INFERENCE SYSTEM FOR FIRE-HAZARDOUS WASTE BANKS  
ASSESSMENT USING SATELLITE IMAGERY  
(BY EXAMPLE OF DONBASS)**

K.L. Sergieieva

The practical aspects of using the Terra (ASTER) and Landsat (TM, ETM+) multisensor survey data for solving the tasks of monitoring of mining regions, in particular, for mapping the fire-hazardous waste banks locations of the Donetsk coal basin area are presented. Construction of the fuzzy logical inference system for Donbass fire-hazardous waste banks classification using the values of surface temperature obtained from the Landsat thermal channel and information about the state of vegetation on the basis of spectral indices evaluation is performed.

**Keywords:** space survey; waste bank; spectral index; fuzzy logical inference.