

Реалізований алгоритм кластеризації на основі нечітких відносин має право на існування, завдяки своїй унікальній властивості – використанню нечітких множин та відношень, що надає змогу кластеризувати дані незалежно від їх структури та форми.

Список літератури

1. Кластеризация на основе нечетких отношений. Алгоритм FuzzyRelationClustering. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.spellabs.ru/download/FuzzyRelationClustering.doc>. – Назва з екрану.
2. Б. Дюран, Кластерный анализ. / Б. Дюран, П. Оделл. Пер. с англ. Е.З. Демиденко. Под ред. А.Я. Боярского. – М.: „Статистика“, 1977. – 128 с.
3. Загоруйко Н.Г. Прикладные методы анализа данных и знаний. / Загоруйко Н.Г. –Новосибирск.: ИМ СО РАН, 1999, – 270 с.
4. Интеллектуальный анализ данных с помощью кластеризации. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kg.ru/?page_id=183. – Назва з екрану.
5. Алгоритмы кластерного анализа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dea-analysis.ru/clustering-5.htm>. – Назва з екрану.
6. Алгоритмы кластеризации на службе Data Mining. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.basegroup.ru/library/analysis/clusterization/datamining/>. – Назва з екрану.

Предложена математическая модель и метод кластеризации, учитывающий интуитивное представление

о группировке данных, не накладывая априорных предположений о структуре данных. Метод кластеризации FuzzyCluster разработан на основе нечеткого описания, способного функционировать в условиях априорной неопределенности относительно структуры данных, а также такого, который учитывает интуитивное представление о группировке данных. Сравнение результатов кластеризации алгоритмом FuzzyCluster с алгоритмами k-means и c-means на пяти стандартных наборах данных показывает его достоинства.

Ключевые слова: кластеризация, нечеткое множество, мера близости, функция принадлежности, нечеткое отношение

Authors propose a mathematical model and a method of clustering which takes into account the intuitive idea of grouping the data without imposing a priori assumptions about data structures. Clustering method FuzzyCluster was developed on the base of fuzzy description, capable of functioning under conditions of uncertainty about data structures, as well as that which takes into account the intuitive idea of data grouping. When comparing results of the five standard datasets clustering made by the algorithm FuzzyCluster with those made by the algorithms k-means and c-means we can see the advantages of the FuzzyCluster.

Keywords: clustering, fuzzy set, similarity measure, accessory function, fuzzy relation

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук
Б.С. Бусыгиним. Дата надходження рукопису 28.02.11

УДК 528.854

Б.С. Бусыгин, д-р техн. наук, проф.,
Е.Л. Сергеева

Государственное высшее учебное заведение „Национальный горный университет“, г. Днепропетровск, Украина,
e-mail: sergieieva@i.ua

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ТЕРРИКОНОВ ДОНБАССА ПО ДАННЫМ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЕМОК

B.S. Busygin, Dr. Sc. (Tech.), Professor,
Ye.L. Sergeeva

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: sergieieva@i.ua

MONITORING OF A WASTE BANKS STATE AT THE TERRITORY OF DONETS COAL BASIN USING MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGERY

Представлены практические аспекты применения данных мультиспектральных космических съемок к решению задач мониторинга терриконов горнопромышленных регионов, в частности, составлению карты расположения негорящих, тлеющих и горящих терриконов участка Донецкого угольного бассейна. Разработан подход к мониторингу состояния терриконов по набору разновременных космоснимков. Выполнена проверка предложенного подхода на данных космических съемок Landsat-TM участка Донбасса.

Ключевые слова: мониторинг, космическая съемка, террикон, приповерхностная температура, классификация с обучением, Landsat-TM

Введение. Донецкий каменноугольный бассейн, открытый в 1720 г., в течение почти 300 лет является крупнейшим индустриальным и промышленным центром Украины. Общая площадь бассейна составляет

около 60 тыс. км² и охватывает территории Днепропетровской, Донецкой и Луганской областей [1]. В Донбассе разведано свыше 800 месторождений более 50 видов минерального сырья, общая стоимость которых – свыше 3 триллионов долларов США. Из них запасы угля до глубины 1800 м составляют 140,8 миллиардов

тонн [2]. Побочным продуктом непрерывной работы угледобывающих предприятий является образование конических отвалов углесодержащих пород – терриконов. Тлеющие и горящие терриконы являются основополагающим фактором нарушения экологического и экономического баланса горнопромышленных территорий Донбасса, обуславливающим формирование сложной экологической ситуации, негативно влияющей на состояние атмосферы, почв, водных объектов, приводящей к деградации природных ландшафтов и причиняющей вред здоровью и жизни людей. На сегодняшний день в Донбассе насчитывается более 1 тыс. терриконов, треть из которых горят [3].

Тление и горение терриконов, подземные угольные пожары являются основной проблемой более чем 3,6 тысяч крупнейших угольных месторождений Индии, Китая, США, Австралии, Германии, России и других стран мира [4–12].

Постановка проблемы и анализ последних исследований. К наиболее ранним методам выявления и оценки угольных пожаров, относятся полевые исследования [6, 9]. Однако наземные методы замеров температуры и содержания вредных газов в разломах и трещинах непосредственно над очагами подземных пожаров не пригодны для мониторинга крупных угольнопромышленных территорий. Поэтому в настоящее время для решения задач обнаружения и мониторинга активных угольных пожаров используются данные дистанционного зондирования Земли из космоса [12, 13].

Активные угольные пожары проявляются на поверхности земли и отображаются на космических снимках посредством тепловых аномалий – участков повышенной приповерхностной температуры [14]. Выявление и мониторинг процессов тления и горения терриконов производится с использованием методов обработки, анализа и дешифрирования мультиспектральных космических снимков в рамках специализированных ГИС, таких как, ERDAS Imagine, ER Mapper, INVI и др. Верификация и оценка качества результатов анализа данных спутниковых наблюдений требует совместного использования материалов спутниковых и наземных исследований, что обуслав-

ливает необходимость создания подхода к анализу и мониторингу приповерхностных тепловых аномалий на основе материалов дистанционного зондирования Земли и наземных наблюдений [15–18].

Широко распространенными методами анализа и мониторинга динамики распространения процессов горения углесодержащих пород являются численное моделирование, расчет вегетационных и тепловых индексов, анализ разновременных данных спутниковых наблюдений.

Численное моделирование динамики распространения угольных пожаров позволяет получить наиболее полное понимание причин и следствий процессов горения углесодержащих пород, установить взаимосвязь между генерацией и переносом тепловой энергии в пределах угольного пожара и вблизи него, производить круглосуточные замеры температуры в пределах очага горения [11, 19].

Повышенная температура тлеющих и горящих терриконов, а также присутствие побочных продуктов горения (таких как SO₂, NO, CO, CH₄, N₂O, CO₂ и др.) обуславливает ухудшение состояния растительного покрова или полное его отсутствие. Таким образом, для выявления процессов горения могут использоваться показатели состояния растительности – вегетационные индексы.

Контекстные адаптивные алгоритмы обеспечивают выявление приповерхностных тепловых аномалий, основываясь на вычислении температурных расхождений фоновых пикселей и пикселей пожара в пределах области соседства анализируемого пикселя растра.

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

Разновременные преобразования применяются для выявления пикселей, неизменных на сериях разновременных изображений.

Частично поросшие растительностью терриконы близки по своим спектральным и температурным характеристикам к открытому грунту, что повышает вероятность ложного выявления участков термальной активности терриконов по данным космической съемки, выполненной в дневное время суток.

Таблица 1

Сведения о горящих и не горящих терриконах исследуемого участка

№	Наименование предприятия	Город	Координаты центра террикона		Состояние горения	Площадь, га
			Широта	Долгота		
1	ОП „Шахта им. В.И. Ленина“	Макеевка	48,0244	38,0240	горит	63,6
2	–	Донецк	47,9344	37,9000	горит	49,8
3	ОАО ЦОФ „Пролетарская“	Макеевка	48,0252	38,0466	не горит	10,7
4	ОАО ЦОФ „Колосниковская“	Макеевка	48,0285	38,0468	не горит	22,2
5	ОП „Шахта Холодная Балка“ ГП „Макеевуголь“	Макеевка	48,0041	38,0519	не горит	5,6
6	ОП „Шахта им. В.М. Бажанова“	Макеевка	48,0927	38,0014	не горит	18,1
7	ОП „Шахта Бутовская“ ГП „Макеевуголь“	Макеевка	48,0817	37,9006	не горит	7,9
8	ЧПП „Горняк-95“	Макеевка	48,0231	37,9862	не горит	1,4
9	АП „Шахта им. Засядько“	Донецк	48,0804	37,8097	не горит	63,0
10	ОАО „Шахтоуправление Донбасс“ ПО „Шахта Щегловская Глубокая“	Донецк	48,0666	37,8617	не горит	6,7
11	ОП „Шахта Заперевальная“	Донецк	47,9950	37,8773	не горит	22,0

Целью работы является разработка элементов методики мониторинга состояния терриконов по разновременным данным мультиспектральных космических съемок и данным наземных наблюдений.

Исследуемый участок. Исследуемый участок Донецкого угольного бассейна площадью 1 тыс. км² охватывает города Донецк, Макеевка и насчитывает 123 террикона (рис. 1), в том числе 2 горящих и 9 негорящих, сведения о которых представлены в таблице 1. Состояние прочих терриконов не известно.

Исходными данными являются каналы 1–5, 7 дневных мультиспектральных космических изображений Landsat-TM (спектральные диапазоны, мкм: 0,45-0,52;

0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,90; 1,55-1,75; 2,08-2,35), а также карты значений приповерхностной температуры, полученные по данным теплового канала 6 по формуле Планка. Дата съемки: 02.05.1985, 03.04.1986, 10.09.1986, 15.05.2007, 03.08.2007, 21.06.2009, 09.09.2009.

Вспомогательными данными для дешифровки терриконов служат материалы съемки сверхвысокого разрешения Internet-сервисов Google и топографические карты.

Каждому террикону соответствует объект – фрагмент мультиспектрального космического изображения, сформированный множеством смежных пикселов.

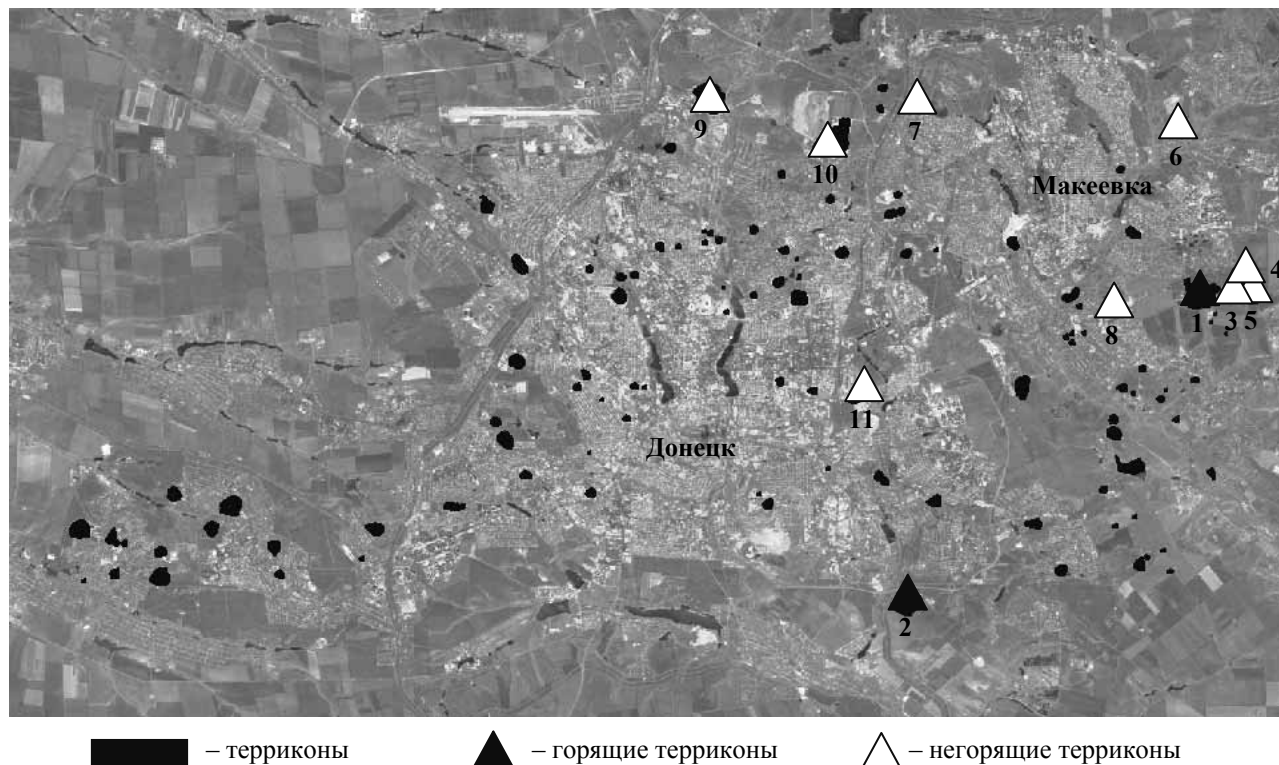


Рис. 1. Исследуемый участок: фрагмент мультиспектрального изображения Landsat-TM (дата съемки: 21.06.2009 г., синтез каналов – 4–3–2) с указанным расположением терриконов

Мониторинг состояния терриконов. Схема процесса мониторинга состояния терриконов по разновременным данным мультиспектральных космических съемок представлена на рис. 2 и включает следующие этапы:

- ввод данных и дешифровка терриконов;
- оценка приповерхностной температуры и формирование вектора характеристик объектов;
- классификация с обучением, оценка точности и визуализация результатов классификации;
- отслеживание динамики изменения состояния терриконов.

1. *Оценка приповерхностной температуры.* Определение приповерхностной температуры по данным Landsat-TM производится в следующей последовательности.

На предварительном этапе расчета температуры осуществляется преобразование первичных, необра-

ботанных данных космических съемок в количество излучения, попадающего на сенсор (Вт/(м²·ср·мкм)).

Определение действительных значений излучения на основе необработанных данных космических съемок осуществляется по формуле [20]

$$L_{\lambda} = \frac{L_{max\lambda} - L_{min\lambda}}{Qcal_{max} - Qcal_{min}} (Qcal - Qcal_{min}) + L_{min\lambda},$$

где: L_{λ} – количество излучения, попадающего на сенсор ($L_{min\lambda} = 1,238$; $L_{max\lambda} = 15,303$); $Qcal$ – калиброванное значение пиксела

$$(Qcal_{min} = 0; Qcal_{max} = 255).$$

Расчет температуры (°C) производится по формуле Планка

$$T = K_2 / \ln(K_1 / L_{\lambda} + 1) - 273,15,$$

где: K_1, K_2 – калибровочные константы.

Следует отметить, что высокие значения приповерхностной температуры для летних снимков, заре-

гистрированных в дневное время суток, зачастую соответствуют участкам открытого грунта – полям, открытым горным роботам и т.п.

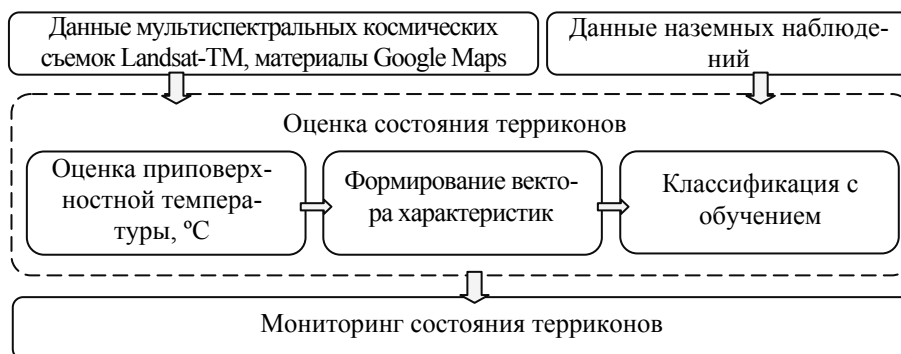


Рис. 2 Схема процесса мониторинга состояния терриконов

2. *Классификация с обучением.* Отнесение исходного множества объектов-терриконов (рис. 1) к одному из двух классов (“негорящий террикон”, “горящий террикон”) производилось по минимуму спектральных расстояний между векторами характеристик исходного множества 112 терриконов, состояние которых не определено, и соответствующими характеристиками эталонных объектов – горящих и негорящих терриконов (табл. 1).

Пусть q_{ki} – усредненное значение коэффициента отражения в k -м канале фрагмента мультиспектрального изображения террикона в i -й момент времени, t_i – усредненное значение приповерхностной температуры

(°C). Тогда для каждого террикона формируется вектор характеристик. Метрики векторов характеристик q_1 и q_2 двух фрагментов изображений Q_1 и Q_2 включают евклидову метрику $d_1(q_1, q_2)$, метрику city-block $d_2(q_1, q_2)$, косинусную метрику $d_3(q_1, q_2)$, корреляционную метрику $d_4(q_1, q_2)$, метрику Махаланобиса $d_5(q_1, q_2)$ и метрику Минковского $d_6(q_1, q_2)$ [21].

Классификация с обучением производилась с использованием функции меры близости (ФМБ) по минимуму расстояния d между классифицируемыми и эталонными фрагментами изображения.

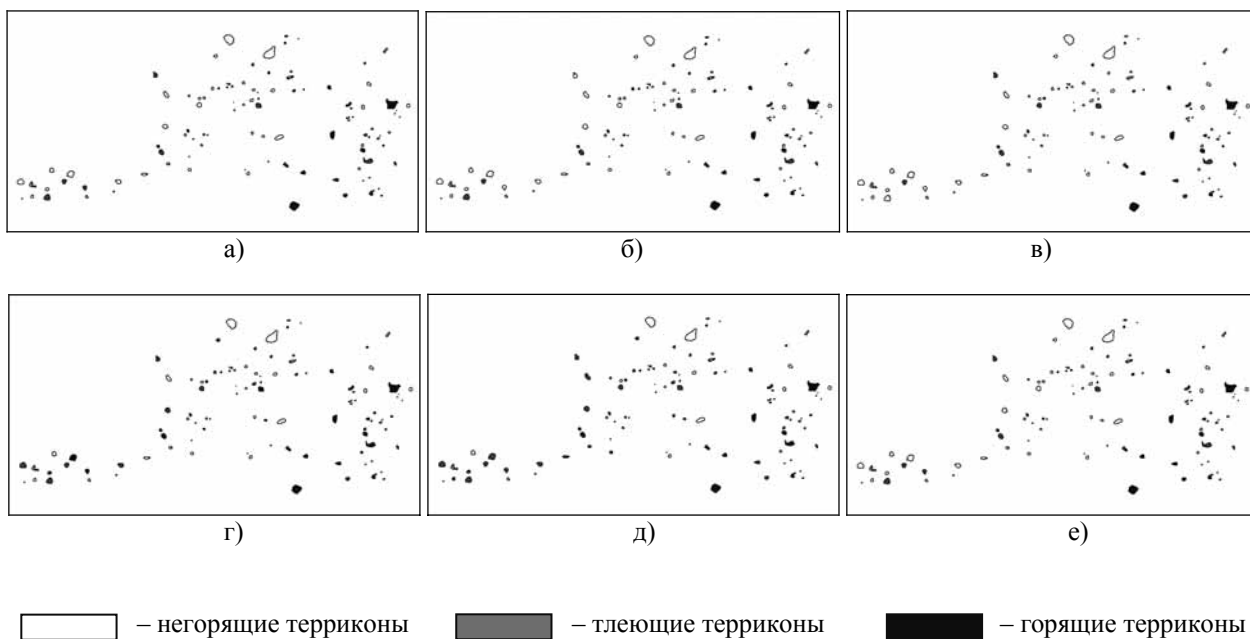


Рис. 3. Классификация терриконов с использованием функции меры близости на основе метрик: а) евклидова; б) city-block; в) косинусная; г) корреляционная; д) Махаланобиса; е) Минковского

Результаты классификации терриконов

Класс	Метрика					
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6
Горящие	14	12	8	21	17	14
Негорящие	73	70	88	51	37	73
Тлеющие	36	41	27	51	69	36

3. *Отслеживание динамики изменения состояния терриконов.* Мониторинг состояния терриконов заключается в анализе временной динамики изменения принадлежности террикона к классу „горящий террикон“, „негорящий террикон“ в соответствии с решающим правилом:

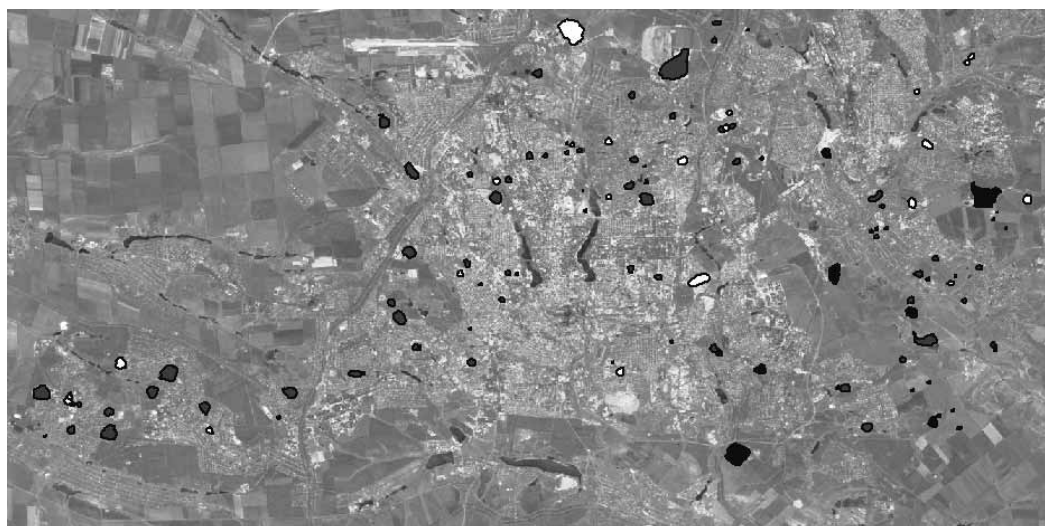
1) террикон относится к классу „негорящий террикон“ либо „горящий террикон“ в случае, если он признан таковым как минимум для 6 из 7 космических;

2) при частом переходе террикона из состояния в состояние невозможно принять однозначное решение о его классовой принадлежности и в этом случае террикон интерпретируется как „тлеющий“.

На рис. 3 представлены результаты классификации в соответствии с различными метриками, в частности, отмечены терриконы, признанные горящими и негорящими как минимум для 6 из 7 анализируемых моментов наблюдений.

Суммарное число терриконов, отнесенных к классам „негорящий террикон“, „тлеющий террикон“ и „горящий террикон“, представлено в табл. 2.

Результаты классификации (рис. 3) объединены для построения результирующей карты расположения негорящих, тлеющих и горящих терриконов (рис. 4). По шести метрикам к классу горящих терриконов одновременно отнесено 8 объектов, к классу негорящих – 28. Число тлеющих терриконов – 87.



□ – негорящие терриконы ■ (gray) – тлеющие терриконы ■ (black) – горящие терриконы

Рис. 4. Карта расположения негорящих, тлеющих и горящих терриконов

Выводы. В работе показано состояние проблемы разработки методики выявления и анализа угольных пожаров, в частности, определения расположения тлеющих и горящих терриконов.

Представленные элементы методики позволяют производить мониторинг состояния терриконов по разновременным данным мультиспектральной космической съемки Landsat-TM и данным наземных наблюдений.

В результате классификации с обучением определено состояние терриконов участка Донбасса – городов Донецк и Макеевка. Установлено, что 6,5% терриконов исследуемого участка являются горящими, у 22,8% терриконов процессы тления и горения отсутствуют.

Предложенные элементы методики позволят составить базу геоданных терриконов Донбасса, пригодную для мониторинга, анализа и прогноза угольных пожаров.

Список литературы

1. Большая Советская Энциклопедия. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://bse.scilib.com/article/032065.html>
2. Современные экологические проблемы Донецкого бассейна. [Электронный ресурс] / Панов Б.С., Шевченко О.А., Дудик А.М., Дудик С.А., Селяков С.Ю. – Режим доступа: <http://masters.donntu.edu.ua>

3. On pollution of the biosphere in industrial areas: the example of the Donets coal Basin/ Panov B.S., Dudik A.M., Shevchenko O.A., Matlak E.S. // *International Journal of Coal Geology*. – 1999. – Vol. 40. – P. 199–210.
4. Chatterjee R.S. Coal fire mapping from satellite thermal IR data – A case example in Jharia Coalfield, Jharkhand, India/ Chatterjee R.S. // *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. – 2006. – 60. – P. 113–128.
5. Prasun K. Gangopadhyay Application of remote sensing to identify coalfires in the Raniganj Coalbelt, India / Prasun K. Gangopadhyay, Kuntala Lahiri-Dutt, Kanika Saha // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2006. – 8. – P. 188–195.
6. Uncontrolled coal fires and their environmental impacts: Investigating two arid mining regions in north-central China/ Kuenzer C., Zhang J., Tetzlaff A., Dijk P., Voigt S., Mehl H., Wagner W. // *Applied Geography*. – 2007. – 27. – P. 42–62.
7. Prakash A. Design and implementation of a dedicated prototype GIS for coal fire investigations in North China / Prakash A., Vekerdy Z. // *International Journal of Coal Geology*. – 2004. – 59. – P. 107–119.
8. Spaceborne remote sensing for detection and impact assessment of coal fires in North China/ Herwig O., Achim R., Stefan V., Harald M. // *Acta Astronautica*. – 2002. – Vol. 51. – No. 1–9. – P. 569–578.
9. Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China / Voigt S., Tetzlaff A., Zhang J., Kunzer C., Zhukov B., Strunz G., Oertel D., Roth A., Dijk P., Mehl H. // *International Journal of Coal Geology*. – 2004. – 59. – P. 121–136.
10. Zhang J. Thermal surface characteristics of coal fires 1 results of in-situ measurements / Zhang J., Kuenzer C // *Journal of Applied Geophysics*. – 2007. – 63. – P. 117–134
11. Thermal characteristics of coal fires 2: Results of measurements on simulated coal fires / Zhang J., Kuenzer C., Tetzlaff A., Oertel D., Zhukov B., Wagner W. // *Journal of Applied Geophysics*. – 2007. – 63. – P. 135–147.
12. 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.
13. Detecting unknown coal fires: synergy of automated coal fire risk area delineation and improved thermal anomaly extraction / Kuenzer C., Zhang, Li J., Voight S., Mehl H., Wagner W. // *International Journal of Remote Sensing*. – 2007. – Vol. 28. – No. 20. – P. 4561–4585.
14. Quantitative analysis of land surface temperature-vegetation indexes relationship based on remote sensing. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. / Ma W., Chen Y., Zhou J., Gong adu – 2008. – Vol. XXXVII(B6b) . – P. 261–264.
15. Пивняк Г.Г. Концептуальный подход к созданию Государственной системы мониторинга и прогноза угольных пожаров по данным космических съемок/ Пивняк Г.Г., Бусыгин Б.С., И.Н.Гаркуша // IX Международная конференция „Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты“. Киев. 11–14 мая 2010. – Электрон. видан. CD-ROM. – А020.
16. Pivnyak G. Geographic information technology monitoring and mapping of coal fires in Ukraine, according to the space survey / Pivnyak G., Busygin B., Garkusha I // 12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010. Prague. – P. 416–422.
17. Busygin B. Using the space survey data for fire objects monitoring of the Donetsk coal basin / Busygin B., Garkusha I., Sergieieva K. // 12th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production SWEMP 2010. Prague. – P. 25–30.
18. Бусыгин Б.С. Выявление тепловых аномалий по данным съемки сканера ASTER. / Бусыгин Б.С., Гаркуша И.Н., Зацепин Е.П. // Наукові праці ДонНТУ: Серія гірн.-геол., 2010. – Вип. 12 (173). – С. 73–81.
19. Numerical modeling for analyzing thermal surface anomalies induced by underground coal fires / Wessling S., Kuenzer C., Kessels W., Wuttke M.W. // *International Journal of Coal Geology*. – 2008. – 74. – P. 175–184.
20. Географические информационные системы и дистанционное зондирование. [Электронный ресурс]- Режим доступа: <http://gis-lab.info>
21. Бусыгин Б.С. Распознавание образов при геолого-геофизическом прогнозировании/ Бусыгин Б.С., Мирошниченко Л.В. – Днепропетровск: Изд-во ДГУ, 1991. – 168 с.

Представлено практичні аспекти застосування даних мультиспектральних космічних зйомок до вирішення задач моніторингу териконів гірничопромислових регіонів, зокрема, створення карти розташування непалаючих, тліючих і палаючих териконів ділянки Донецького вугільного басейну. Розроблено підхід до моніторингу стану териконів за набором різночасових космоснімків. Виконано перевірку запропонованого підходу на даних космічних зйомок Landsat-TM ділянки Донбасу.

Ключові слова: моніторинг, космічна зйомка, терикон, приповерхнева температура, контрольована класифікація, Landsat-TM

Practical aspects of waste banks state monitoring tasks solving at mining regions using multispectral satellite imagery are presented, in particular, mapping the location of nonburning, smoldering and burning waste banks at the Donets Coal Basin region. The approach to waste banks state monitoring using multi-temporal satellite imagery is created. The verification of the proposed approach is performed using the Landsat-TM imagery for the Donets Coal Basin region.

Keywords: monitoring, satellite imagery, waste bank, surface temperature, classification, Landsat-TM

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук І.О. Садовенком. Дата надходження рукопису 22.02.11