

**ЕКОЛОГІЯ, ЕКОЛОГІЧНА КІБЕРНЕТИКА ТА ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

УДК 004.932:528.854

К. Л. Сергєєва<sup>1</sup>**ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ МІСЦЕВОСТІ  
З ТЕРИКОНАМИ ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОЇ ЗЙОМКИ**<sup>1</sup>Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпро

*Подано методику оцінки техногенного впливу териконів на навколишнє середовище прилеглих територій, що базується на інформаційній моделі пожежонебезпеки і враховує відомості про стан рослинного покриву, температуру та вологість поверхні. Запропоновано підхід до проведення геоінформаційного аналізу щільності міської забудови, ділянок рослинного покриву, водних об'єктів і відкритих ґрунтів у межах буферних зон териконів для виявлення територій, що найбільше піддаються негативному впливу продуктів тління. Проведено апробацію на даних мультиспектральної космічної зйомки Landsat-TM.*

**Ключові слова:** геоінформаційний аналіз, інформаційна модель, космічна зйомка, пожежонебезпека, терикон.

**Вступ**

Процеси тління териконів — різновид вугільних пожеж. Їх результатом є просідання та осипання поверхні, емісія тепла і шкідливих газів (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, HCl, SO<sub>2</sub>, NO, N<sub>2</sub>O та ін.) [1]. В Україні проблема тліючих териконів актуальна для територій Львівсько-Волинського, Донецького кам'яновугільних та Дніпровського буровугільного басейнів. Продукти тління інтенсивно впливають на ґрунти, повітряне середовище та водні об'єкти прилеглих територій у радіусі 3-х кілометрів. Згідно з чинними державними санітарними правилами та нормами ДСанПіН 2.2.7.029-99 «Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення» від 01.07.1999 р. і Державними санітарними правилами № 379/1404 для відходів вуглевидобувної промисловості в Україні встановлюються санітарно-захисні зони радіусом не менше ніж 300 м від основи терикону до призначених для забудови територій. Тому виявлення териконів, які чинять негативний вплив на навколишнє природне середовище, є першочерговим завданням для дотримання державних санітарних норм і своєчасного впровадження заходів щодо ліквідації вогнищ тління.

Для вирішення завдань виявлення, картування і моніторингу ділянок тління вуглевмістких порід, виділення поверхневих температурних аномалій вугільних пожеж та ін. вчені науково-дослідних центрів Німеччини, Індії, Австрії, США та ін. використовують дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з космосу [2]. Їх перевагами перед даними наземних спостережень є високе територіальне охоплення і можливість багаторазової повторної зйомки території. Зокрема, для вирішення завдань моніторингу процесів тління і горіння териконових ландшафтів використовуються дані космічних зйомок, зареєстровані у тепловому діапазоні електромагнітного спектра сенсорами ДЗЗ середньої просторової роздільної здатності (ПРЗ), серед яких, зокрема: ASTER (супутник Terra, ПРЗ 90 м), МСУ-В (супутник Океан-О, ПРЗ 250 м), BIRD (супутник BIRD, ПРЗ 370 м), МСУ-СК (супутники РЕСУРС-01-3/4, ПРЗ 548 м), MODIS (супутники Terra, Aqua, ПРЗ 1000 м), AVHRR (супутники NOAA, ПРЗ 1100 м) та ін. [3]. Сканери ТМ (Thematic Mapper) супутника Landsat-5 (ПРЗ 120 м), ЕТМ+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) супутника Landsat-7 (ПРЗ 60 м) і TIRS (Thermal InfraRed Sensor) супутника Landsat-8 (ПРЗ 100 м) дозволяють виконувати температурне картування територій з точністю до 0,5 К. Архівні дані ДЗЗ наявні у відкритому доступі, наприклад, з використанням сервісів Американського географічного товариства: EarthExplorer [<http://earthexplorer.usgs.gov>], USGS Global Visualization Viewer (GloVis) [<http://glovis.usgs.gov>], CRSSP Imagery-Derived Requirements (CIDR) [<http://cidr.cr.usgs.gov>]. Це забезпечує достатні умови для вирішення актуального завдання автоматизованої оцінки впливу процесів тління териконів на

компоненти навколишнього природного середовища.

*Метою роботи* є створення методики оцінки техногенного впливу териконів на навколишнє середовище прилеглих територій за допомогою інформаційного моделювання і геоінформаційного аналізу місцевості з териконами.

### Інформаційна модель пожежонебезпеки териконів

Показник пожежонебезпеки виражає ймовірність виникнення процесів тління вуглевмістих порід і є нечіткою оцінкою схильності терикона до займання [4]. Його обчислення базується, зокрема, на відомостях про стан рослинного покриву ( $x_1$ ), температуру ( $x_2$ ) та вологість ( $x_3$ ) поверхні.

Нехай пожежонебезпеку визначає число  $y \in [0; 1]$  (0 — відсутність пожежонебезпеки; 1 — загроза загоряння). Тоді інформаційна модель оцінки пожежонебезпеки — це функціональне відображення типу [5]:

$$\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3) \rightarrow y \in [0; 1], \quad (1)$$

де  $\mathbf{X}$  — вектор факторів, що впливають, представлених множиною нечітких термів (наприклад, рослинність відсутня, рідка, густа; температура низька, середня, висока; вологість поверхні терикону знижена, помірна, підвищена і т. д.).

Тому можна застосувати апарат теорії нечітких множин і нечіткого логічного виводу до вирішення завдання оцінки пожежонебезпеки. Результатом є нечітка множина класів пожежонебезпеки териконів, для перетворення якої в чіткі числа виконується дефазифікація (наприклад, за методом центру тяжіння) [4].

Для формального опису задачі прийняття рішень про віднесення терикону до категорії пожежонебезпеки вихідними даними є множина  $X = \{x_1, x_2, x_3\}$  характеристик стану терикону, на основі якої формується множина  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ , елементами якої, або альтернативами, є категорії пожежонебезпеки пікселів терикону.

Кожній множині альтернатив може відповідати єдиний результат  $\psi_i$  ( $\psi_i \in \Psi$ ) — категорія пожежонебезпеки терикону, що є функцією двох аргументів

$$\psi_{ij} = \phi(x_i, \mu_j), \quad i = 1, 2, 3, \quad j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де  $\mu_i$  ( $\mu_i \in M$ ) — функція належності нечітких оцінок пожежонебезпеки териконів до нечітких категорій пожежонебезпеки;  $x_i$  ( $x_i \in X$ ) — характеристики стану терикона.

Між множиною альтернатив і результатом відсутня будь-яка стохастична залежність, тому прийняття рішення відбувається в умовах невизначеності.

Терикон є тліючим, якщо на його поверхні присутня хоча б одна ділянка тління. Таким чином, маючи на меті виявити розташування тліючих териконів, у якості критерію прийняття рішення можна керуватися критерієм азартного гравця, згідно з яким терикон буде віднесений до найвищої категорії пожежонебезпеки його складових пікселів:

$$\xi_{\max} = \max_i \max_j \psi_{ij}. \quad (3)$$

Аналогічно, присутність низькотемпературних вологих озелених ділянок поверхні терикону вказує на затухання процесів тління.

На пожежонебезпеку терикона впливає також площа ділянки тління. Тому для прийняття рішення про віднесення терикону до однієї з категорій пожежонебезпеки (наприклад, загрозна, істотна, незначна і т. д.) слід враховувати співвідношення площ, зайнятих пікселями з відповідними категоріями пожежонебезпеки.

Нехай  $Y_{\max} = \{y_1, \dots, y_{k_1}\}$  — множина пікселів найвищої категорії пожежонебезпеки, присутньої на фрагменті зображення терикону і  $S_{\max}$  — площа, заповнена пікселями найвищої категорії;  $Y_{\text{mean}} = \{y_1, \dots, y_{k_2}\}$  — пікселі проміжної категорії і  $S_{\text{mean}}$  — площа, заповнена пікселями проміжної категорії пожежонебезпеки;  $Y_{\min} = \{y_1, \dots, y_{k_3}\}$  — пікселі найнижчої категорії і  $S_{\min}$  — площа, заповнена пікселями найнижчої категорії пожежонебезпеки ( $Y_{\max} \cap Y_{\text{mean}} \cap Y_{\min} = \emptyset$ ). Тоді модифікований критерій азартного гравця виглядає таким чином:

$$\xi_{\max}^* = \max_i \max_j \psi_{ij}, \frac{S_{\max}}{S_{\text{mean}}} > 0,5; \quad \xi_{\min}^* = \min_i \min_j \psi_{ij}, \frac{S_{\min}}{S_{\text{mean}}} > 0,5. \quad (4)$$

### Методика оцінки техногенного впливу териконів

На основі інформаційної моделі пожежонебезпеки (1) запропоновано методику оцінки впливу продуктів тління териконів на навколишнє середовище прилеглих територій (рис. 1). Вона складається з етапів введення даних, формування простору ознак, класифікації, оцінки пожежонебезпеки териконів, дослідження щільності об'єктів різних класів у межах буферних зон териконів, аналізу та візуалізації результатів.



Рис. 1. Узагальнена схема методики оцінки техногенного впливу териконів

На початкових етапах проводиться формування вибірки даних різночасових багатоспектральних (зокрема, теплових) космічних зображень, створення бази геоданих наземних спостережень і формування контрольної вибірки териконів з відомим станом (наприклад, озеленений, палаючий, діючий та ін.). За даними теплових космічних зображень за формулою Планка оцінюється яскравісна температура. Обчислюються значення спектральних індексів. Зокрема, стан рослинного покриву визначається за даними про нормалізований різницевий вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), обчислений для багатоспектрального аерокосмічного зображення. Нормалізований різницевий індекс вмісту вологи (Normalized Difference Water Index, NDWI) дозволяє визначати вологість поверхні терикона [5].

Отримані набори характеристик подаються на вхід процедур контрольованої класифікації (наприклад, з використанням методу найближчого сусіда та функції міри близькості за мінімумом спектральних відстаней між векторами характеристик) та кластеризації (зокрема, на основі алгоритмів *k*-середніх, нечітких *c*-середніх, найближчого сусіда для формування ієрархічного дерева бінарних кластерів) для локалізації териконів і побудови контурів їх буферних зон.

Обчислення кількісного показника пожежонебезпеки проводиться на основі побудови системи нечіткого логічного виводу, яка базується на математичній моделі, створеній з використанням теорії нечітких множин і нечіткої логіки.

Оцінка техногенного впливу териконів на навколишнє природне середовище передбачає розрахунок низки показників, таких як площа ділянок у межах буферних зон териконів, зайнятих рослинністю, водними об'єктами, ґрунтами. Показник щільності міської забудови в межах буферних зон дозволяє оцінювати вплив побічних продуктів тління і горіння териконів на здоров'я населення.

### Результати аналізу космічного зображення

Як тестову ділянку обрано насичену териконами територію м. Донецьк і його околиць з огляду на наявність вибірки даних наземних спостережень станом на 2012 р., наданої Управлінням екологічної безпеки Донецької міськради. Площа тестової ділянки становить 785 км<sup>2</sup>, загальна кількість териконів — 115. Допоміжними даними для дешифрування териконів слугували матеріали зйомки надвисокої роздільної здатності Інтернет-сервісу Google і топографічні карти.

Стан рослинності оцінювався на основі індексу NDVI. Відомо, що для густої рослинності значення індексу знаходяться у діапазоні від 0,7 до 1; для розрідженої рослинності — від 0,5 до 0,7; для відкритих ґрунтів — нижче 0,5. Для териконів тестової ділянки  $x_1 \in [-0,17; 0,73]$ . Вологовміст

грунту оцінювався на основі індексу NDWI, значення якого знаходяться у діапазоні від  $-0,5$  до  $0,1$  для відкритих ґрунтів; для розрідженої рослинності — від  $0,1$  до  $0,2$ ; для густої рослинності і водних об'єктів — вище  $0,2$ . Для териконів тестової ділянки  $x_2 \in [-0,27; 0,38]$ . Значення яскравісної температури ( $^{\circ}\text{C}$ ) розраховані на основі даних каналу 6 сенсора ТМ:  $x_3 \in [23,68; 39,16]$ .

Для зображення Landsat-5 ТМ м. Донецьк, зареєстрованого 28.06.2012 р., здійснено віднесення териконів тестової ділянки до категорій пожежонебезпеки з використанням інформаційної моделі (1) й критерію (4). Розраховано показники абсолютної частоти зустрічальності ( $P_1$ , %) териконів для кожної з трьох категорій пожежонебезпеки (незначна, істотна, загрозна) та відповідної характеристики (стан, форма), частки териконів ( $P_2$ , %) з вказаною в рядку табл. 1 характеристикою від загальної кількості териконів з відповідною категорією пожежонебезпеки і частки териконів ( $P_3$ , %) з відповідною категорією пожежонебезпеки від загального числа териконів з відповідною характеристикою.

Таблиця 1

Загальні відомості про пожежонебезпеку териконів тестової ділянки

Характеристика терикона		Пожежонебезпека									Всього
		Незначна, %			Істотна, %			Загрозна, %			
		$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	
Стан	Тліє	2	6	7	17	44	59	10	77	34	29
	Не тліє	23	64	58	15	38	38	2	15	5	40
	Згаслий	9	25	64	5	13	36	0	0	0	14
	Озеленений	24	67	73	8	21	24	1	8	3	33
	Частково озеленений	1	3	10	8	21	80	1	8	10	10
	Діє	0	0	0	3	8	30	7	54	70	10
Форма	Не діє	36	100	51	30	77	43	4	31	6	70
	Конус	25	69	53	16	41	34	6	46	13	47
	Хребтовидний	1	3	50	1	3	50	0	0	0	2
	Плоский	2	6	17	6	15	50	4	31	33	12
	Усічений конус	8	22	30	16	41	59	3	23	11	27
Всього		36			39			13			—

Для досліджуваної ділянки в результаті класифікації багатоспектрального зображення виділені ділянки чотирьох типів земного покриття (класів): будівлі й споруди, відкритий ґрунт, водні об'єкти, рослинність. Навколо окреслених за даними Google контурів териконів побудовані буферні зони радіусом 300 м і проаналізовано щільність ділянок різних типів земного покриття в межах буферних зон териконів (табл. 2).

Таблиця 2

Статистика за ділянками різних типів земного покриття

Статистика	Тип земного покриття	Будівлі й споруди	Відкритий ґрунт	Водні об'єкти	Рослинність
Площа, зайнята об'єктами класу, $\text{км}^2$		121,9	246,5	10,0	674,6
Частка площі території тестової ділянки, %		12	23	1	64
Площа у межах буферних зон териконів, зайнята об'єктами класу, $\text{км}^2$		14,1	72,8	0,1	393,0
Частка об'єктів, розташованих у межах буферних зон териконів, відносно загальної кількості, %		12	29	1	58

Із даних табл. 1 випливає, що більшість териконів характеризується істотною і загрознаючою пожежонебезпекою (54 і 39 % відповідно). Для 59 % териконів, що не горять або згасли, пожежонебезпека є незначною, а для 37 % — суттєвою. Схожа ситуація спостерігається для озелених і частково озелених териконів — лише для 5 % озелених териконів пожежонебезпека загрозна. Діючі терикони з незначною пожежонебезпекою відсутні, а для 70 % з них пожежонебезпека є загрознаючою. Для териконів, що не діють, загрозна пожежонебезпека спостерігається лише у 6 % випадків, на той час як, відповідно, у 51 і 43 % випадків вона незначна або істотна. Всі терикони з незначною пожежонебезпекою не діють, а серед діючих териконів відсутні об'єкти, поже-

жонебезпеки яких є незначною. Терикони із загрозовою пожежонебезпекою у 77 % випадках є тліючими, а 89 % териконів з незначною пожежонебезпекою — не горять або згасли.

Присутність зелених насаджень на поверхні териконів знижує їх схильність до займання — 69 % териконів з незначною пожежонебезпекою і 41 % териконів з істотною пожежонебезпекою є озелененими або частково озелененими.

Встановлено, що 12 % площі буферних зон териконів тестової ділянки зайняті промисловими і житловими будівлями та спорудами, що піддаються таким чином негативному екологічному впливу. Зелені насадження у межах буферних зон (58 % площі буферних зон) здатні послабити негативний вплив териконів на навколишнє природне середовище.

Виходячи з отриманих результатів аналізу просторового розподілу ділянок різних типів земного покриву можна зробити висновок, що щільність міської забудови максимальна в центральних районах тестової ділянки та є найнижчою на приміських територіях. Щільність рослинного покриву зростає з віддалення від центральної частини міста та є максимальною за межами міста. Вміст водних об'єктів поблизу териконів є незначним (1 %), близьким до нуля і в деяких випадках присутність ненульових значень пояснюється похибкою класифікації.

Обчислено сумарний показник техногенного впливу териконів як частка площі території в межах буферних зон, зайнятої об'єктами міської забудови, рослинністю та водними об'єктами (рис. 2). Цей показник, зокрема, характеризується високими значеннями в центральній частині міста, де щільність рослинного покриву є мінімальною.

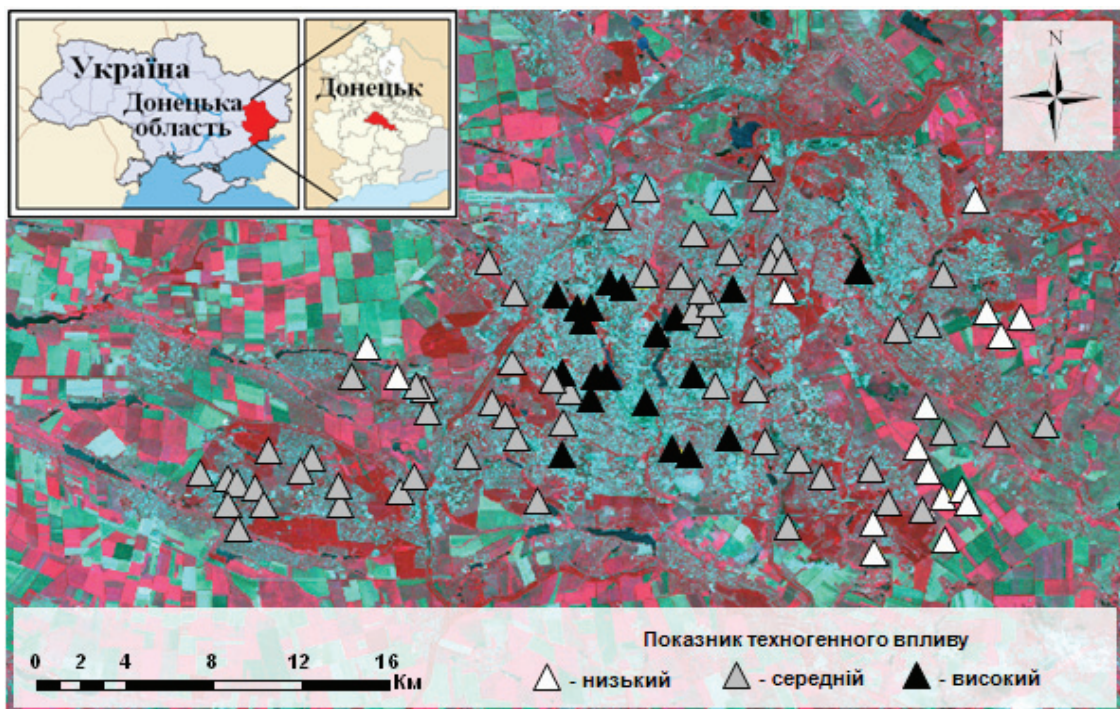


Рис. 2. Класифікація териконів за сумарним показником техногенного впливу

### Висновки

Процеси тління териконів вугільних басейнів України і країн світу становлять небезпеку для навколишнього природного середовища і здоров'я населення. Сенсори дистанційного зондування Землі з космосу (такі як ASTER, MCY-B, BIRD, MCY-CK, MODIS, AVHRR, TM, ETM+, TIRS та ін.) дозволяють здійснювати моніторинг та оцінку стану територій гірничопромислових регіонів, виявляти й аналізувати ділянки тління териконів. Застосування сучасного апарату інформаційного моделювання і геоінформаційного аналізу сприяє підвищенню ефективності вирішення комплексу завдань обробки, аналізу, моделювання й візуалізації даних космічних спостережень териконів для своєчасної ліквідації вогнищ тління.

Викладена методика аналізу даних супутникових спостережень за станом териконів, що базується на їх комплексній обробці й класифікації на основі нечіткого логічного виводу, дозволяє використовувати відомості про розташування териконів, класифікувати їх за пожежонебезпекою і здійснювати комплексну оцінку їх техногенного впливу на навколишнє природне середовище.

Виконано геоінформаційний аналіз території тестової ділянки з терриконами за даними мульти-спектральної космічної зйомки Landsat-TM за допомогою розрахунку щільності міської забудови, ділянок рослинного покриву і відкритих ґрунтів у межах буферних зон терриконів радіусом 300 м. Встановлено частку площі буферних зон терриконів тестової ділянки, зайнятої об'єктами, що піддаються небезпечній дії продуктів тління.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Смирный М. Ф. Экологическая безопасность терриконовых ландшафтов Донбасса : моногр. / М. Ф. Смирный, Л. Г. Зубова, А. Р. Зубов. — М. : изд-во ВНУ им. В. Даля. — 2006. — 232 с.
2. Integrating satellite remote sensing techniques for detection and analysis of uncontrolled coal seam fires in North China / [S. Voigt, A. Tetzlaff, J. Zhang, and etc.] // International Journal of Coal Geology. — 2004. — Vol. 59. — P. 121—136.
3. Kuenzer C. Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications / C. Kuenzer, S. Dech // Springer. Series: Remote Sensing and Digital Image Processing. — 2013. — Vol. 17. — 537 p.
4. Сергеева Е. Л. Построение системы нечеткого логического вывода для оценки пожароопасности терриконов с использованием материалов космической съемки (на примере Донбасса) / Е. Л. Сергеева // Системи обробки інформації : зб. наук. пр. — Харків : вид-во Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба. — 2010. — № 7 (88). — С. 51—56.
5. Сергеева Е. Л. Автоматизированный анализ состояния терриконов по данным дистанционного зондирования Земли на основе ГИС-технологии / Е. Л. Сергеева // Збірник наукових праць НГУ. — Д. : Національний гірничий університет, 2013. — № 41. — С. 103—112.

Рекомендована кафедрою комп'ютерного еколого-економічного моніторингу та інженерної графіки ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 19.09.2016

**Сергеева Катерина Леонідівна** — канд. техн. наук, доцент кафедри геоінформаційних систем, e-mail: sergieieva@i.ua.

Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», Дніпро

**K. L. Sergieieva<sup>1</sup>**

## Geoinformation Analysis of Areas with Slagheaps Using Satellite Imagery

<sup>1</sup>State Higher Educational Institution «National Mining University», Dnipro

*Procedure of estimation slagheaps anthropogenic impact on the environment of surrounding areas has been presented. It is based on information model of fire danger and takes into account information about the state of vegetation, temperature and surface humidity. An approach to conducting geoinformation analysis of urban areas, vegetation sites, water bodies and open soil density within slagheaps buffer zones has been proposed in order to identify areas exposed to negative effects of decay products. Approbation has been conducted using Landsat-TM multispectral satellite image.*

**Keywords:** geoinformation analysis, satellite imagery, information model, fire danger, slagheap.

**Sergieieva Kateryna L.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Geoinformation Systems, e-mail: sergieieva@i.ua

**Е. Л. Сергеева<sup>1</sup>**

## Геоинформационный анализ местности с терриконами по данным космической съемки

<sup>1</sup>Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет», Днепр

*Представлена методика оценки техногенного воздействия терриконов на окружающую среду прилегающих территорий, базирующаяся на информационной модели пожароопасности и учитывающая сведения о состоянии растительного покрова, температуры и влажности поверхности. Предложен подход к проведению геоинформационного анализа плотности городской застройки, участков растительного покрова, водных объектов и открытых ґрунтов в пределах буферных зон терриконов для выявления территорий, наиболее подверженных негативному воздействию продуктов тления. Проведена апробация на данных мультиспектральной космической съемки Landsat-TM.*

**Ключевые слова:** геоинформационный анализ, космическая съемка, информационная модель, пожароопасность, террикон.

**Сергеева Екатерина Леонидовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры геоинформационных систем, e-mail: sergieieva@i.ua