



УДК 528.88:528.854

С. С. Кохан, А. А. Москаленко

## ОЦІНКА МОЖЛИВОСТІ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ЗВАЛИЩ ЗА БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИМИ КОСМІЧНИМИ ЗНІМКАМИ

Описана возможность решения задачи идентификации свалок на основе данных, полученных с многоспектральных космических снимков. По космическим снимкам определены яркостные характеристики свалок. Исследована эффективность некоторых методов классификации для идентификации мест захоронения отходов.

Possibilities of dumps identification based on multispectral images have been shown in the article. Spectral brightness of dumps has been determined with use of satellite images. The effectiveness of some methods of image classification for identification of dumps is shown.

**Вступ.** Непродумане використання земель стає першопричиною виникнення багатьох негативних явищ як економічного, так і екологічного характеру. Шостий розділ Земельного кодексу України під назвою «Охорона земель» наголошує на важливості охорони земель, у т. ч. на захисті їх від шкідливого антропогенного впливу [9].

Прикладом негативного антропогенного впливу на землю є утворення великих обсягів сміття в результаті господарської діяльності людини. Найпоширеніший нині спосіб видалення сміття – складування на звалищах. Більшість із цих звалищ несанкціоновані. Вони кільцем оточують великі міста і населені пункти, займаючи величезні території, які могли б використовуватись під сільськогосподарські угіддя, ліси, пасовища...

Проте зайняті площі – не єдиний мінус звалищ, більшим лихом є нещадне забруднення навколишнього середовища. Несанкціоновані звалища не обласшовуються належним чином, що зумовлює надходження продуктів гниття і розпаду в ґрунт і ґрунтові води. Опади, просочуючись крізь товщу сміття, насичуються шкідливими хімічними сполуками. Комунальні відходи на звалищах утворюють фосфорорганічні сполуки і діоксиди, генеруючи пожежонебезпечні гази. Температура гниття сміття настільки висока, що виникають пожежі, а разом з димом у повітря потрапляє велика кількість шкідливих речовин. Харчові відходи привертають увагу гризунів, інших тварин, мігруючих птахів, які є переносниками хвороботворних мікроорганізмів. Найчастіше звалища містять змішані відходи (будівельне сміття, комунальні відходи, ґрунт з виїмок), що значно ускладнює екологічну ситуацію на прилеглих територіях.

Оперативне виявлення звалищ комунальних і будівельних відходів наявними на сьогодні методами пов'язане з великими затратами часу й коштів.

За оглядовістю, оперативністю отримання та об'єктивністю дані ДЗЗ із космосу можуть бути важливим джерелом геопросторової інформації. Тому ідентифікація звалищ сміття за даними ДЗЗ є досить актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями питань впливу звалищ на навколишнє середовище займалися І. Б. Абрамов, А. В. Лущик,

А. П. Лущик, В. Г. Чуніхін [1]. Праця О. В. Бровкіної [2] присвячена застосуванню методів автоматичної класифікації аерокосмічних даних для ідентифікації структури звалищ.

Питання геодинамічного районування території Київської області з використанням космічних знімків (для аналізу розміщення полігонів захоронення відходів) досліджували В. С. Готинян, М. В. Арістов, О. В. Томченко, Л. І. Миколенко [8]. Оцінку впливу на довкілля Васильківського місця видалення відходів засобами ДЗЗ/ГІС-технологій дано у праці Л. Д. Грекова, Г. Я. Красовського та В. І. Клименка [9]. Проте проблема оперативного виявлення несанкціонованих звалищ залишається малодослідженою.

**Мета цього дослідження** – аналіз можливості використання даних ДЗЗ для ідентифікації звалищ комунальних і будівельних відходів.

**Методика дослідження.** Питання використання матеріалів ДЗЗ для ідентифікації звалищ відходів вирішується в три етапи:

- визначення показників яскравості віддзеркаленого електромагнітного випромінювання звалищ за різними спектральними каналами космічних знімків;
- застосування методів класифікації даних ДЗЗ для ідентифікації звалищ;
- оцінка вірогідності результатів класифікації.

У дослідженні застосовувались модулі з цифрової обробки космічних знімків програмних засобів Idrisi та Erdas Imagine v.9.1. Зокрема, в Erdas Imagine виконано радіометричні та спектральні поліпшення зображень, геометричну корекцію знімків. Зображення класифіковано в Idrisi, послуговуючись при цьому набором команд з модулів визначення сигнатур та жорстких класифікаторів.

Вірогідність результатів визначено за площею секцій складування твердих побутових відходів, яка, за даними І. Б. Абрамова та А. В. Лущика [1], становить 35,75 га від 56,3 га загальної площі сміттєзвалища.

Вигляд звалища відходів на знімку високого просторового розрізнення QuickBird відображує мал. 1.

**Характеристики яскравості об'єктів спостереження.** Джерелом інформації про об'єкти зондування земної поверхні дистанційними методами є їх електромагнітне випромінювання – власне (теплове) або віддзеркалене. При цьому випромінювання може мати природне або штучне походження. До природного належить власне

© С. С. Кохан, А. А. Москаленко, 2009



Мал. 1. Звалище комунальних відходів

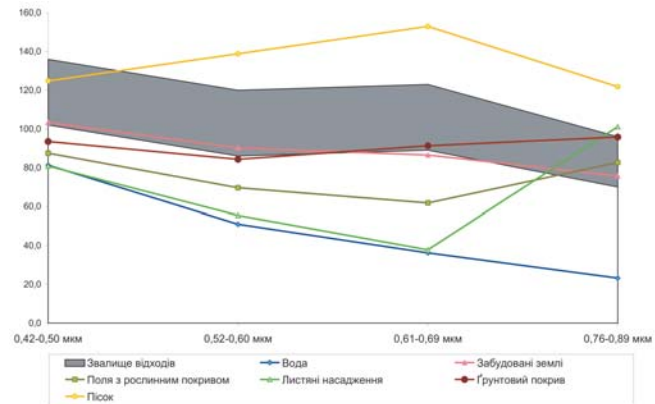
(теплове) випромінювання об'єкта і віддзеркалене випромінювання при освітленні земної поверхні Сонцем. У нашому дослідженні використано віддзеркалене електромагнітне випромінювання.

Відходи, що складаються на звалищах, як і інші покриття, поглинають, віддзеркалюють і випромінюють електромагнітні хвилі. Вивчення спектральних характеристик звалищ відходів виконано шляхом вимірювання віддзеркаленого електромагнітного випромінювання цільового та довколишніх покриттів за багатоспектральними (мультиспектральними) знімками. Використано космічні знімки ALOS<sup>1</sup>, отримані мультиспектральним сенсором (AVNIR-2) з просторовим розрізненням 10 м. Відомості з цих знімків знайшли застосування у вирішенні таких задач [3]:

- створення й оновлення карт і планів (масштаб 1:50 000 і дрібніше);
- вивчення змін рельєфу, спричинених різними факторами;
- контроль за використанням природних ресурсів;
- спостереження за стихійними явищами;
- розв'язання прикладних завдань.

Крім цих завдань, автори розглядають можливість використання даних із супутника ALOS для ідентифікації звалищ побутових відходів. У чотирьох спектральних діапазонах: блакитному (0,42-0,50 мкм), зеленому (0,52-0,60 мкм), червоному (0,61-0,69 мкм) і ближньому інфрачервоному (0,76-0,89 мкм) визначено інтенсивність електромагнітного випромінювання, віддзеркаленого від звалища відходів і навколишніх типів покриття (вода, пісок, сільськогосподарські угіддя з рослинністю, відкритий ґрунт, ліси та забудована територія). За цими даними побудовано графік (мал. 2).

<sup>1</sup> Космічні знімки надано ТОВ «ТВІС» для навчальних цілей.



Мал. 2. Криві значень яскравості віддзеркаленого електромагнітного випромінювання для різних типів покриття за спектральними каналами

На графіку звалище позначене широкою смугою, оскільки у своїй структурі воно має неоднорідні об'єкти з різними спектральними характеристиками. З мал. 2 видно, що звалища в першому спектральному каналі мають перекриття спектральних значень піском та забудовою, у другому – із забудовою, в третьому – з ґрунтовим покривом, у четвертому – з ґрунтовим і рослинним покривами, а також забудованими землями. Ці перекриття спектральних значень зумовлені неоднорідністю звалища, що може містити, окрім побутових відходів, ґрунт з виїмок і, якщо дотримується технологія, то відходи на звалищах присипаються шаром ґрунту. Найбільший контраст звалища мають з водою та листяними лісовими масивами.

**Використання методів класифікації даних дистанційного зондування Землі для ідентифікації звалищ відходів.** Некерована класифікація. Досліджено можливість використання методу некерованої класифікації CLUSTER для ідентифікації звалища. Цей метод використовує методику відбору піків гістограми на кольоровому 8-бітному зображенні. Він дозволяє об'єднати три спектральні канали, в яких об'єкт дослідження має найвищий контраст із довколишніми об'єктами [6]. Було обрано перші три спектральні канали: блакитний, зелений та червоний, оскільки вони мають найменше перекриття звалища з іншими типами покриття.

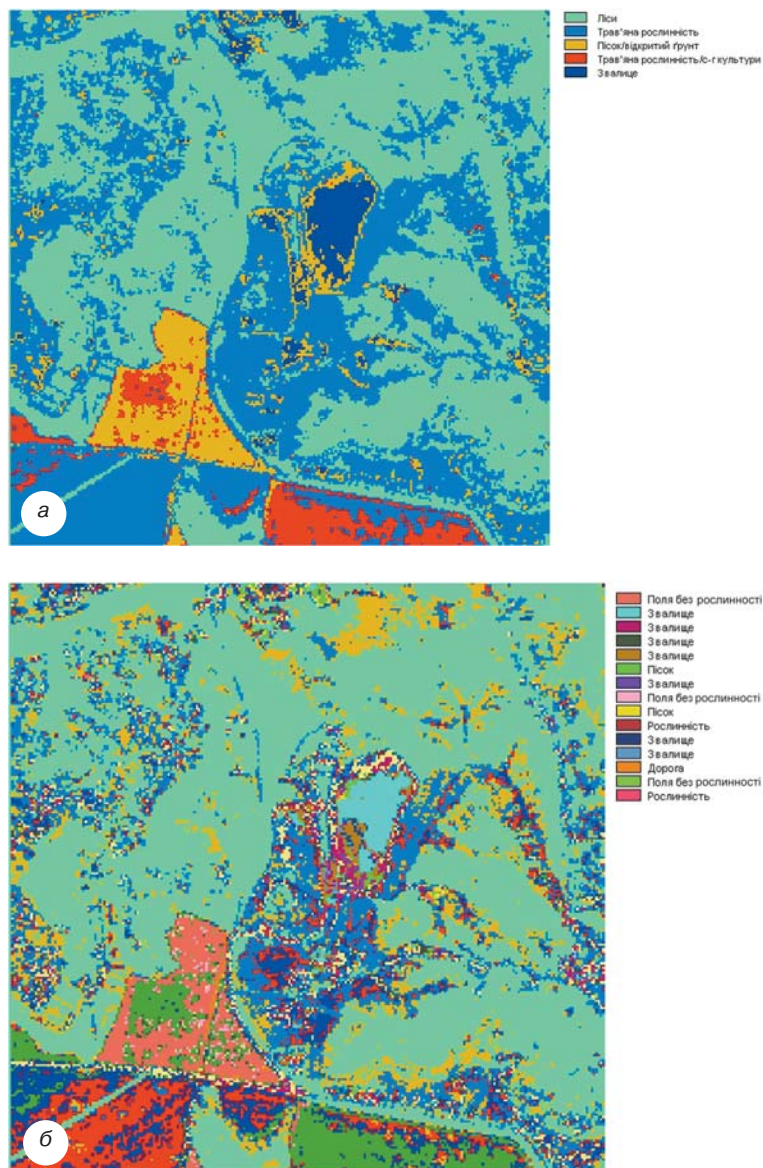
При використанні рівня генералізації BROAD (грубий) одержуємо растр з дуже широкими класами спектрів у досліджуваній області (мал. 3, а). Грубі кластери не передбачають виділення окремого класу звалищ. В один клас потрапили безпосередньо звалище та землі без рослинного покриву: ґрунт і пісок. Використовуючи цей метод, можна правильно ідентифікувати близько 40 % площі звалища, хоча при цьому частина звалища зображена спільним класом з рослинністю.

Рівень генералізації FINE (детальний) зі збереженням усіх кластерів створює зображення з 35-ма кластерами (мал. 3, б). При інтерпретації до класу звалищ можна віднести 8 кластерів. Вони опису-





ють місця накопичення відходів неоднозначно, оскільки є складовими й інших типів покриття. При використанні детального рівня генералізації із зазначенням кількості кластерів звалища можна ідентифікувати вже при збільшенні кількості кластерів до 10-ти і більше. Хоча детальний рівень генералізації модуля CLUSTER підвищує вірогідність визначення місцеположення звалищ, однак як клас звалищ можна ідентифікувати близько 60 % площі цільового об'єкта.



Мал. 3. Методи некерованої класифікації зображення:  
а – грубий рівень генералізації;  
б – детальний рівень генералізації

*Керована класифікація за даними космічної зйомки.* Перший етап класифікації полягає у визначенні та виділенні навчальних вибірок за мультиспектральним знімком. Основною вимогою до навчальних вибірок є репрезентативність відомостей – пікселі вибірки повинні відповідати одному класу на місцевості; такий клас повинен охоплю-

вати територію, що досить добре представлена пікселями на знімку із заданим просторовим розрізненням. У спектральному просторі репрезентативність вибірок визначають:

- одноmodalність гістограми розподілу яскравості, що характеризує близькість розподілу значень до нормального, тому що нормальний розподіл даних є вихідним посиленням алгоритму;
- мінімальність дисперсії, що характеризує однорідність відомостей вибірки;

• невеликі значення відхилень від середнього – вибірка має невелике природне варіювання;

• роздільність вибірок у спектральному просторі – інакше класи будуть змішуватись і їх неможливо буде вичленити.

Навчальні вибірки необхідні для подальшої «роботи» алгоритму за методом керованої класифікації. Для виділення еталонів і створення навчальних вибірок використовують різні способи:

- ідентифікацію набору сусідніх пікселів із близькими спектральними характеристиками;

- визначення області зображення – ідентифікацію пікселів у межах деякої області або об'єкта, необов'язково з аналогічними спектральними характеристиками;

- використання класу з тематичного растрового шару в ПС, який відповідає області знімка або отриманий у результаті неконтрольованої класифікації;

- використання векторної карти (шару), яку накладено на знімок.

Розрізняють параметричні й непараметричні навчальні вибірки. Параметрична вибірка ґрунтується на статистичних параметрах, наприклад, векторі середніх значень яскравості  $M_i$ , коефіцієнтах коваріаційної матриці  $K_i$ , обчислених за зональним значенням пікселів у полігоні навчальної вибірки або кластері. Таким чином, для створення параметричної вибірки якого-небудь класу програма розраховує статистичні дані за еталонними пікселями зображення. При цьому вважається, що розподіл даних є нормальним. Найчастіше такі навчальні вибірки одержують в інтерактивному режимі. Дешифрувальник розпізнає на екрані монітора еталонні об'єкти, які мають відношення до класів, що виділяються (звичайно обираються 3-4 об'єкти для кожного класу), і серед них обирається векторний полігон.

Програма створення навчальних вибірок за значеннями яскравості  $n_i$  пікселів, які потрапили в контур полігона, обчислює для кожного класу об'єктів  $M_i$  та  $K_i$ . Зрештою навчальні вибірки набувають форми еліпса, і кожний об'єкт тепер може бути представлений еліпсами рівної імовірності. Така процедура дозволяє забезпечити відповід-



ність вимірювань навчальних (еталонних) вибірок і тих, що перевіряються (класифікуються).

Для дослідження береться зразковий полігон, що складається з однієї або кількох ділянок знімка з близькими між собою і відмінними від інших областей знімка спектральними властивостями. За складові ділянки такого полігона обирають цілі об'єкти або їх однорідні фрагменти. Вибірку виконують двома способами в залежності від повноти вихідної інформації. За наявності достатньої кількості опорної наземної інформації зразкові полігони обираються з числа відомих діючих звалищ та довколишніх типів покриття. При відсутності або недостатній кількості інформації полігони вибирають експертно з таким розрахунком, щоб відобразити у вибірці всі основні градації яскравості й кольору тону звалищ відходів, що дешифруються на знімку. Крім ділянок звалищ, до зразкових полігонів необхідно включати декілька зразків «фону» – інших типів покриттів.

Здебільшого величини спектральних ознак пікселів одного об'єкта неоднакові, вони варіюють у певних діапазонах. Діапазони спектральних ознак різних об'єктів можуть частково перекриватися, тому виконана за ними класифікація, звичайно, не може бути абсолютно достовірною. Для підвищення достовірності класифікації зазвичай підвищують точність вимірювань і збільшують кількість самих ознак. Технічно це найпростіше зробити для ознак яскравості, збільшуючи кількість каналів багатозональної спектральної апаратури.

При створенні файлів сигнатур, що містять статистичну інформацію про величину відбиття пікселів зразкових полігонів, для кожного класу ми використовували канали видимого та інфрачервоного діапазонів.

Оцінку якості сигнатур проводили з використанням двох каналів зображення. Наносилось положення пікселів відповідно до їх значень у двох каналах – червоному та інфрачервоному. Векторний файл формувався у вигляді прямокутника навколо середнього значення сигнатури кожного каналу, що дорівнює двом стандартним відхиленням цих значень.

Наступним етапом тематичної обробки є класифікація даних ДЗЗ за визначеними навчальними вибірками. Пікселі зображення сортують за класами, виділеними на основі цих вибірок, за допомогою вирішального правила класифікації. Кожен піксель незалежно аналізується, при цьому його вектор значень яскравості зіставляється з кожним еталоном із застосуванням різних алгоритмів.

Щоб розробити такі алгоритми, використовуються детермінований і статистичний підходи (іноді їх, як і вибірки, називають непараметричними і параметричними). Детермінований підхід застосовується, як правило, коли класи об'єктів не перетинаються в просторі ознак. У цьому випадку області рішення можуть бути виділені лінійними межами, які характеризуються лінійними дискримінантними функціями. Кожна така функція харак-

теризує свій клас об'єктів, що їх дешифрують, і будується, наприклад, так, що для пікселів свого класу, обумовленого еталоном, вона приймає позитивне значення, а для чужого – негативне. Як дискримінантну функцію нерідко використовують формулу евклідової відстані.

З множини алгоритмів керованої класифікації для визначення місця розташування звалищ було розглянуто можливість використання «жорстких класифікаторів».

Класифікація за методом мінімальної спектральної відстані полягає у визначенні відстані між вектором значень яскравості пікселя і вектором середніх значень кожного еталона (вибірки). Відстань може бути розрахована двома способами: як евклідова або як нормалізована відстані. Недоліком використання способу евклідової відстані є нехтування дисперсією спектральних характеристик пікселів у межах полігонів. При використанні способу нормалізованої відстані класифікатор обчислює стандартне відхилення значень відбиття навколо середнього, створюючи контури стандартних відхилень. Використання класифікатора за методом мінімальної спектральної відстані передає мал. 4, а. Для класифікатора характерне віднесення пікселя до певного класу, що має значні відхилення від середнього показника.

Класифікація за методом максимальної правдоподібності вважається однією з оптимальних, оскільки ґрунтується на імовірнісних принципах [5]. В основі цього методу лежить статистичний підхід до вирішення завдання й припущення, що поява на знімку об'єкта, який належить до  $i$ -го класу, є випадковою подією ( $\omega_i$ ). Нескінченність усіх випадкових подій – об'єктів на знімку – позначимо  $\Omega(\omega_1, \dots, \omega_n)$ . Вектор ознак  $X$  також вважається вектором випадкових значень.

Для вирішення завдання потрібно знати:  $P(\omega_i)$  – апріорну ймовірність появи об'єкта класу  $i$ ;  $P(X/\omega_i)$  – функцію умовної щільності розподілу ймовірностей вектора ознак  $X$  (якщо об'єкт належить до класу  $\omega_i$ ). Якщо ці характеристики відомі, то класифікацію доцільно здійснювати на основі вирішального правила Байеса.

Розглянемо цю теорію на прикладі двох об'єктів –  $A$  і  $B$ . Оскільки досліджувана ознака властива певній точці, ймовірність того, що в ній перебуває об'єкт  $A$ , – апріорна;  $P(A)$  – це частка площі об'єкта  $A$  від площі всього знімка. Після визначення ознак ця ймовірність змінюється, і відповідна апостеріорна ймовірність  $P(A/X)$  визначається за формулою Байеса.

Вирішальне правило можна сформулювати так: рішення буде на користь об'єкта  $L$  у тій області простору ознак, де

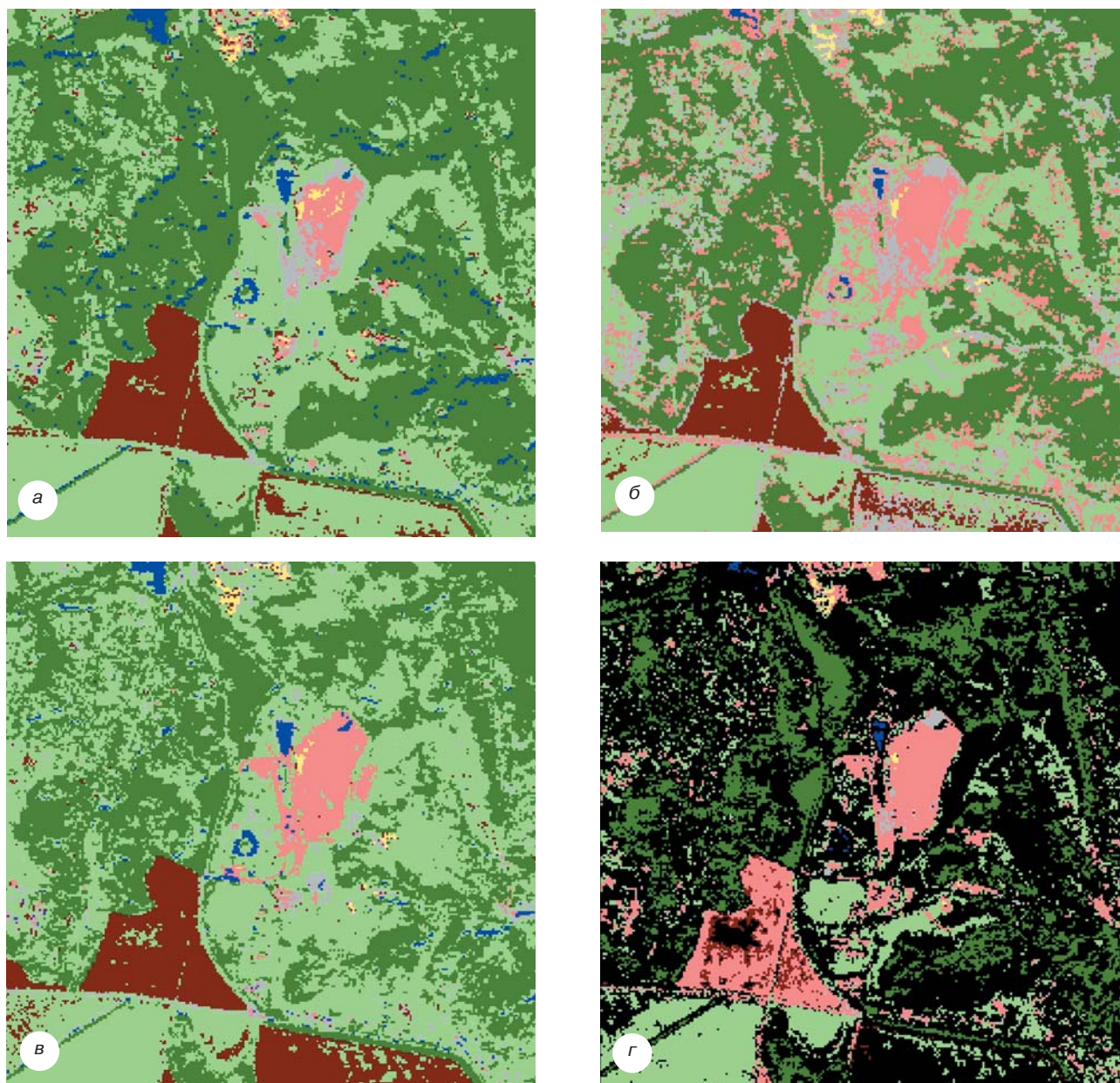
$$P(X/B) \cdot P(B) < P(X/A) \cdot P(A),$$

що еквівалентно

$$P(X/A)/P(X/B) > P(B)/P(A).$$

До об'єкта  $A$  будуть віднесені всі точки з вимі-





Умовні позначення:

	Вода		Ґрунтовий покрив
	Забудова		Пісок
	Поля з рослинним покривом		Звалище відходів
	Листяні насадження		

Мал. 4. Класифікація зображень:

а – за методом мінімальної спектральної відстані; б – за методом максимальної подібності;  
в – за методом аналізу лінійних дискримінант; г – за методом паралелепіпедів

рюваними ознаками  $X$ , для яких ця нерівність підходить. Уведена заздалегідь так звана функція втрат дозволяє встановити ціну кожної дії після ухвалення рішення. На практиці апіорні ймовірності й втрати трапляються рідко, тому вони вважаються рівними і вирішальне правило перейде в умову  $P(X/A)/P(X/B) > 1$  або  $P(X/A) > P(X/B)$ . Тобто класифікатор відносить кожне вимірювання до того об'єкта, для якого правдоподібність одержання цього вимірювання максимальна. Тому ме-

тод дістав назву "максимальної правдоподібності".

Загалом для класифікації цим методом необхідно знати статистичні характеристики дешифрувальних ознак усіх об'єктів. Цю інформацію часто здобувають у ході аналізу яскравостей у межах еталонних об'єктів на знімку – побудови навчальних вибірок. Функції  $P(X/\omega_i)$ , які вважаються навчальними, виникають на основі цієї інформації, а тому їх приймають за апіорі відомі.

Процес побудови  $P(X/\omega_i)$  називається навчан-



ням класифікатора. При цьому використовують параметричний і непараметричний підходи до визначення статистичних характеристик. У першому випадку відомо вид розподілу щільності ймовірності, що, як правило, вважається нормальним. У другому випадку будують гістограми яскравості об'єкта, вважаючи при цьому, що гістограмою є дискретно задана  $P(X/\omega_i)$ .

Умова максимуму правдоподібності у спрощеному вигляді подається як

$$\ln|K_i| + (X - M_i)^T K_i^{-1} (X - M_i) \leq \ln|K_k| + (X - M_k)^T K_k^{-1} (X - M_k).$$

Якщо ця умова виконується, то перевіряється вектор стосовно того, що  $X$  відноситься до класу  $i$ .

Метод максимальної правдоподібності відносять до найбільш точних методів за умови, що вихідні вибірки мають нормальний розподіл (мал. 4, б).

Результат аналізу лінійних дискримінант забезпечив одержання тематичного зображення, яке за якістю наближалось до растру, отриманого за методом максимальної подібності (мал. 4, в).

Класифікація методом паралелепіпедів полягає у створенні паралелепіпедів з використанням мінімальних і максимальних значень відбиття або стандартних значень відхилення всередині еталонних полігонів. Результат використання класифікатора за методом мінімальної спектральної відстані зображено на мал. 4, г. Для цього класифікатора характерне віднесення пікселя спочатку до одного класу, а потім до іншого у разі перекриття значень класів.

Після порівняння результатів керованої класифікації ми виявили, що метод лінійних дискримінант забезпечив найвищу вірогідність одержаних результатів. Ця вірогідність характеризується як відсоток пікселів, правильно віднесених до класу, заданого як еталон. За умови використання методу Фішера (лінійних дискримінант), близько 80 % пікселів можна вважати правильно віднесеними до класу та ідентифікованими як пікселі звалища.

Запропонована технологія оброблення даних ДЗЗ передбачає участь експертів у вирішенні задач оцінювання розташування звалищ комунальних відходів для досягнення мінімальної похибки у масштабі населеного пункту, сільської ради або району. Тобто при даному підході не обов'язковий автоматизований алгоритм оброблення інформації, який актуальний для масштабу території декількох регіонів.

**Висновки та перспективи досліджень.** Результати досліджень свідчать, що за умови використання некерованої класифікації вірогідність віднесення пікселів до класу звалищ варіювала у межах від 40 до 60 %, а метод Фішера (аналіз лінійних дискримінант) забезпечив вірогідність класифікації, яка становила близько 80 %.

Для підвищення достовірності дешифрування необхідно використовувати додаткові просторові

характеристики об'єкта (форму, розмір, текстуру та структуру поверхні), а також непрямі ознаки дешифрування – асоціації (розташування доріг поряд зі звалищами).

У ході дослідження з'ясовано, що космічні знімки ALOS/AVNIR-2 можуть використовуватись і для охорони земель, зокрема для виявлення таких наслідків антропогенного впливу на довкілля, як утворення звалищ відходів.

Перспектива подальших досліджень у даному напрямку полягає у вивченні та порівнянні різних класифікаторів (жорстких і м'яких) з метою використання даних ДЗЗ для виявлення несанкціонованих звалищ відходів.

### Література

1. Абрамов И.Б., Луцук А.В. Изменение гидродинамических и гидрохимических условий под воздействием полигонов твердых бытовых отходов на территориях распространения золово-делювиальных лессовидных отложений // *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*. – 2006. – № 6. – С. 31-40.
2. Бровкина О.В. Автоматическая идентификация свалок по разномасштабным аэрокосмическим данным // *Исследования Земли из космоса*. – 2007. – № 6. – С. 22-28.
3. *Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи*: Підручник / С.С. Кохан, А. Б. Востоков. – К.: Вища шк. – 2009. – 511 с.
4. Кохан С.С. Сучасні підходи до класифікації космічних знімків // *Географічні інформаційні системи в аграрних університетах (GISAU): Матер. 2 Міжнар. наук.-практ. конфер., Херсон, 21-22 трав. 2007 р.* – С. 57-65.
5. Кохан С.С. Класифікація даних дистанційного зондування Землі з космосу: сучасні тенденції // *Наук. вісн. НАУ*. – 2006. – Вип. 104. – С. 102-112.
6. Кохан С.С., Поліщук І.П. Методи дистанційного зондування Землі в управлінні територіями. – К.: НАУ. – 2006. – 88 с.
7. *Науково-практичний коментар Земельного кодексу України* / За заг. ред. В.В. Медведчука. – К.: Юрінком Інтер, 2004. – 656 с.

### Інтернет-джерела

8. Готинян В.С., Арістов М.В., Томченко О.В., Миколенко Л.І. Геодинамічне районування території Київської області з використанням космічних знімків (для аналізу розміщення полігонів захоронення відходів). – К.: ДНБЦ „Природа”. – <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=719>.
9. Греков Л.Д., Красовський Г.Я., Клименко В.І. Оцінки впливу на довкілля Васильківського місця видалення відходів засобами ДЗЗ/ГІС-технологій. – К.: ІПНБ РНБОУ. – <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=707>.

Надійшла 02.09.09