

Роботу виконано за часткової фінансової підтримки Науково-технологічного центру в Україні, проект № 3138.

1. Ostrovsky L. A., Johnson P. A. Dynamic nonlinear elasticity in geomaterials // Riv. Nuovo Cim. – 2001. – **24**, No 7. – P. 1–46.
2. Gueyer R. A., Johnson P. A. Hysteresis, energy landscape and slow dynamics: a survey of the elastic properties of rocks // J. Mater. Process. and Manuf. Sci. – 2000. – **9**, No 7. – P. 14–26.
3. Darling T. W., TenCate J. A., Brown D. W. et al. Neutron diffraction study of the contribution of grain contacts to nonlinear stress-strain behavior // Geophys. Res. Lett. – 2004. – **31**, No 1. – P. 1–4.
4. Andersen H. C. Molecular dynamics simulation at constant pressure and/or temperature // J. Chem. Res. – 1980. – **72**, No 4. – P. 2384–2393.

Відділення геодинаміки вибуху Інституту
геофізики ім. С. І. Субботіна, Київ

Надійшло до редакції 12.06.2007

УДК 528.8:519.876

© 2008

В. Г. Якимчук, К. Ю. Суханов, З. В. Козлов, Л. П. Ліщенко

Дешифрування гіперспектральної космічної інформації на основі текстурних і спектральних характеристик досліджуваних об'єктів

(Представлено членом-кореспондентом НАН України О. Д. Федоровським)

The interpretation of hyperspectral space images based on the textural and spectral characteristics of studied objects is examined. It is suggested to perform the interpretation using a spectral shift function along the electromagnetic radiation wavelength as an integral indicator of the spectral characteristics of urbanlandscape elements.

Гіперспектральна космічна зйомка містить інформацію про випромінювання від поверхні Землі при довжинах хвиль, які фіксуються в окремих вузьких каналах (~ 10 нм) і охоплюють широкий спектральний діапазон. Для багатьох елементів природного ландшафту та інших об'єктів земної поверхні відомі їхні спектральні властивості, тобто розподіл їх випромінювання за електромагнітним спектром. Однак кожен природний або техногенний ландшафт містить комплекс елементів, які мають різні спектральні властивості і займають різні площі в межах ландшафту. Багатьма вченими вивчалася відбивна здатність покриву Землі з урахуванням впливу елементів, які утворюють ландшафтний комплекс, зокрема рельєф, ґрунт, рослинний покрив, водна поверхня, техногенні об'єкти, підземні води, геологічна будова тощо [1–5]. При ідентифікації різних ознак поверхні Землі виходять з того, що досліджувані типи покриття в дійсності спектрально роздільні, але існує багато об'єктів, які не завжди можна спектрально розділити та ідентифікувати.

Позитивний досвід використання текстурних характеристик у дистанційному зондуванні Землі дозволяє підвищити імовірність дешифрування космічних знімків (КЗ) [6, 7]. На сьогодні, однак, у зазначених статтях досліджено текстуру лише трьох класів ландшафтів

у кожному з широких каналів (500–590, 610–680, 780–890 нм) і не розглянуто спектральні характеристики елементів ландшафту й трансформацію текстури зображень при зміні довжини хвилі електромагнітного спектра знімка.

Спектральні характеристики поверхні Землі не є статичними — вони змінюються залежно від географічного положення і часу. Як основний і дуже важливий фактор для правильного аналізу та інтерпретації дистанційного зондування розглядаються спектральні характеристики різних досліджуваних елементів поверхні Землі, зокрема рослинність, ґрунт, вода тощо. Але, за даними гіперспектрального знімка, встановити спектральні властивості певного ландшафту досить складно через великий діапазон значень характеристик яскравості окремих елементів, тому дешифрування ландшафтів за яскравістю не завжди дає бажані результати. У цьому повідомленні автори досліджують зміни текстурних і спектральних властивостей поверхні Землі як функцію географічного положення у певні пори року.

У межах м. Києва було виділено такі групи урбанізованих ландшафтів, яким характерна різна комбінація їх елементів:

Нова високоповерхова забудова: райони Оболонь, Троєщина, пр. Науки, метро “Либідська”. Геометрично правильна конфігурація масивів; переміжні групи пікселів, що відповідають будинкам (30%), двором ділянкам, дорогам (40%), окремим деревам та їх групам. Великоплямиста текстура зображення.

Лісопаркова зона, природні ландшафти: трав’янисті поверхні парків, заплава р. Дніпро з можливим вкрапленням чагарників, рідколісся, слабо задерновані та відкриті ділянки з пісками. Слабо контрастна, великоплямиста структура зображення.

Незабудовані відкриті території: незначне рослинне покриття, відкриті ґрунти.

Центральна щільно забудована частина міста: дахи будинків (50%), прибудинкові території, асфальтовані частково дороги з деревною рослинністю на узбіччі (50%). У цьому класі переважає техногенна складова: асфальт, дахи будинків, дороги. Дрібноплямиста текстура зображення з незначними коливаннями яскравості між суміжними пікселями.

Лісові масиви: Голосієво, Демієвка, правобережні схили р. Дніпро, всередині міста — ботанічний сад, великі сквери з деревною рослинністю. Ділянки з відносно однорідною великоплямистою текстурою, є відмінності в кронах листяних і хвойних порід, із плямами, що відповідають галявинам та більш зволоженим ділянкам, долинам струмків (10–20%).

Водна поверхня: річки, затоки, озера, ставки — найбільш однорідні й контрастні з оточуючими масиви пікселів.

Для дослідження, за даними КЗ, зображень вказаних урбандшафтів було вибрано тестові ділянки певної площі, які охоплюють усі різновидності елементів ландшафтів, що входять у певний клас. Як приклад розглянемо КЗ, зроблений гіперспектральним сенсором Нурегіон з просторовим розрізненням 30 м, який встановлено на супутнику EO-1, дата зйомки — 01.09.2002, час — 8 : 38 (рис. 1).

Спектральні властивості ландшафтів по КЗ можна визначити шляхом осереднення яскравості за множиною пікселів цифрового зображення ландшафту для кожного значення довжини хвилі (λ) у діапазоні від 426,82 до 2365,2 нм. Для ландшафтів одержано спектральні характеристики яскравості: середні значення та середньоквадратичне відхилення.

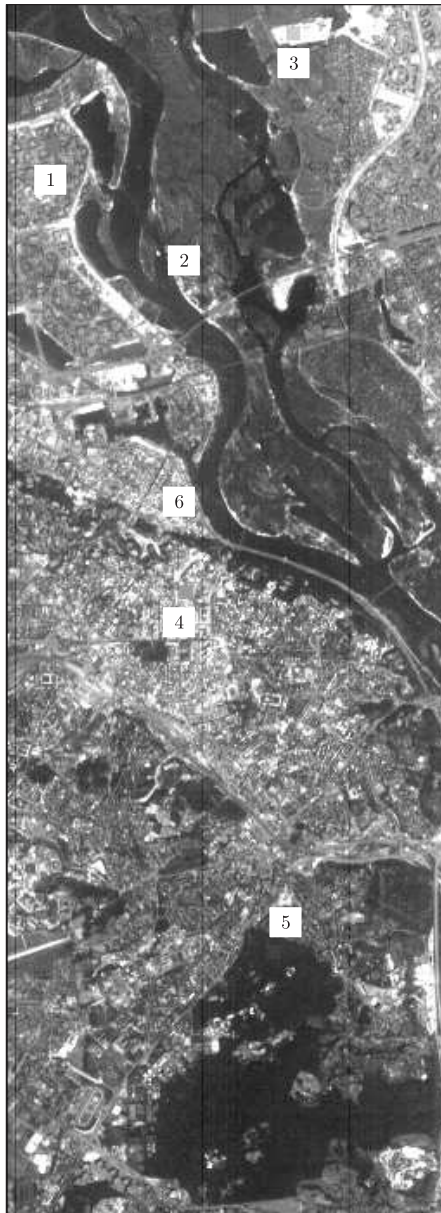


Рис. 1. Космічний знімок фрагмента території м. Києва та його околиць, який простягається смугою з північ-північного сходу на південь-південний захід:
1 — новий мікрорайон; 2 — парк з газонами; 3 — відкритий ґрунт без рослинності; 4 — центральний район;
5 — ліс; 6 — водна поверхня

Порівнянням спектральних характеристик різних ландшафтів шляхом обчислення їх різниці для всіх довжин хвиль з урахуванням сумарного середньоквадратичного відхилення доведено, що при значних середньоквадратичних відхиленнях недоцільно використовувати спектральні характеристики в задачах дешифрування ландшафтів.

Відмінність зображень фрагмента місцевості у різних спектральних каналах обумовлено властивостями випромінювання елементів ландшафту на різних довжинах хвиль. Саме наявність в урбандшафтах елементів з різними спектральними характеристиками та різ-

ної площі будемо використовувати для їх дешифрування на гіперспектральних знімках. У ландшафтах спостерігаються різні співвідношення ділянок і складу рослинності, а також різні елементи урбанізації. Розходження спектральних характеристик випромінювання від елементів урбандшафтів приводять до трансформації їхніх зображень у каналах гіперспектрального знімка, що підтверджується порівнянням зображень будь-якого фрагмента знімка в різних спектральних каналах.

Опишемо коефіцієнт кореляції (R) між масивами значень яскравості зображень, одержаних в каналах, як міру подібності зображень ландшафтів в n спектральних каналах з довжиною хвиль λ_j та λ_k ($j, k = 1, 2, \dots, n; j \neq k$)

$$R(\lambda_j, \lambda_k) = \frac{E[L_i(\lambda_j) \cdot L_i(\lambda_k)] - E[L_i(\lambda_j)] \cdot E[L_i(\lambda_k)]}{\{(E[L_i^2(\lambda_j)] - (E[L_i(\lambda_j)])^2) \cdot (E[L_i^2(\lambda_k)] - (E[L_i(\lambda_k)])^2)\}^{1/2}}, \quad (1)$$

де $L_i(\dots)$ — яскравість i -го пікселя зображення ландшафту; i — індекс пікселя ($i = 1, \dots, N$); E — знак математичного сподівання.

Таким чином, для n спектральних каналів одержимо $n(n-1)/2$ значень коефіцієнтів кореляції. Як показали результати досліджень гіперспектральних КЗ, подібність текстури зображень ландшафтів у спектральних каналах змінюється в широких межах: від повного збігу ($R(\lambda_j, \lambda_k) = 0,999$) до “нічого схожого” ($R(\lambda_j, \lambda_k) < 0,1$). Це пояснюється тим, що найкорельованішими є канали сусідніх і близьких довжин хвиль, а зі збільшенням зсуву за довжиною хвилі кореляція спадає.

У зв'язку з тим, що ландшафти відрізняються різноманітністю елементів, кожен з яких має свою спектральну характеристику, до їх класифікації може бути застосована функція коефіцієнта кореляції $\mathfrak{R}(\Delta\lambda_s)$, яку назовемо спектральною функцією (СФ):

$$\mathfrak{R}(\Delta\lambda_s) = f(R(\Delta\lambda_s)),$$

де $\Delta\lambda_s = \lambda_s - \lambda_0$, $s = 0, 1, 2, \dots$

Функція коефіцієнта кореляції характеризує міру узгодженості випромінювання від елементів ландшафту при зсуві за довжиною хвилі. Як правило, $\mathfrak{R}(\Delta\lambda_s)$ зменшується із збільшенням зсуву.

Використовуючи такий вираз для обчислення коефіцієнта кореляції:

$$R(\Delta\lambda_s) = \frac{E[L_i(\lambda_0) \cdot L_i(\lambda_0 + \Delta\lambda_s)] - E[L_i(\lambda_0)] \cdot E[L_i(\lambda_0 + \Delta\lambda_s)]}{\{(E[L_i^2(\lambda_0)] - (E[L_i(\lambda_0)])^2) \cdot (E[L_i^2(\lambda_0 + \Delta\lambda_s)] - (E[L_i(\lambda_0 + \Delta\lambda_s)])^2)\}^{1/2}}, \quad (2)$$

одержимо послідовність значень $R(\Delta\lambda_s)$, $s = 1, 2, \dots, S$. Спектральну функцію $f(R(\Delta\lambda_s))$ визначаємо математичним сподіванням:

$$\mathfrak{R}(\Delta\lambda_s) = E[R(\Delta\lambda_s)].$$

Аналіз результатів обчислення значень СФ показав, що її можна застосовувати як інструмент для класифікації описаних вище урбандшафтів (рис. 2, *a*).

Згідно з даними КЗ, зробленого гіперспектральним сенсором Nuregion, для одержаних СФ описаних вище ландшафтів було виконано апроксимацію функціями

$$\text{експоненціальною (Exp)} \quad \mathfrak{R}(\Delta\lambda_s) = c_1 e^{b_1 \Delta\lambda_s}$$

та

$$\text{лінійною (Lin)} \quad \mathfrak{R}(\Delta\lambda_s) = c_2 \Delta\lambda_s + b_2, \text{ де } c_1, c_2 \text{ й } b_1, b_2 \text{ — константи.}$$

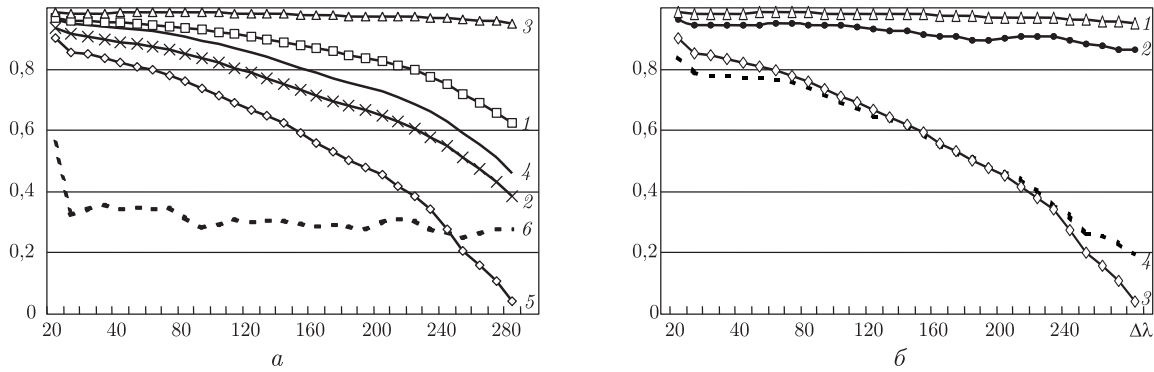


Рис. 2. Графіки спектральних функцій зсуву довжини хвиль $\Delta\lambda$.

a: 3 — відкритий ґрунт без рослинності; 1 — новий мікрорайон; 4 — центральний район; 2 — парк з газонами; 5 — ліс; *б:* 1 — відкритий ґрунт без рослинності; 2 — ділянка піску; 3 — ліс; 4 — окремі дерева та їх групи

Оцінку точності апроксимації за допомогою експоненціальних і лінійних функцій зроблено, згідно з середньоквадратичним відхиленням апроксимуючих функцій від реальних значень СФ. За результатами оцінки точності, наведеними в табл. 1, впливає, що лінійна апроксимація більше відповідає СФ для всіх ландшафтів. Обчислені коефіцієнти лінійної функції демонструє табл. 2.

Класифікувати невідомий ландшафт на КЗ можна, якщо визначити його СФ і віднести до відповідного ландшафту, для якого відстань S_Σ між СФ еталону $\mathfrak{R}_E(\Delta\lambda_s)$ та аналізованим ландшафтом $\mathfrak{R}_X(\Delta\lambda_s)$ буде найменшою:

$$S_\Sigma = \sum_{s=1}^S [\mathfrak{R}_E^2(\Delta\lambda_s) - \mathfrak{R}_X^2(\Delta\lambda_s)]. \quad (3)$$

Класифікувати можна також за значеннями коефіцієнтів лінійної апроксимації. Запропонований метод перевірено на ландшафтах, які є територіями з окремими деревами та їх

Таблиця 1

Клас ландшафту	Експонента та лінійна апроксимації		
	Exp	Lin	(Exp-Lin) / (Exp + Lin)
Новий мікрорайон	0,0117	0,0098	0,0856
Центральний район	0,0198	0,0140	0,1692
Ліс	0,0354	0,0093	0,5827
Парк з газонами	0,0136	0,0077	0,2778
Водна поверхня	0,0024	0,0021	0,0682
Відкритий ґрунт без рослинності	0,00016	0,00014	0,0419

Таблиця 2

Клас ландшафту	c_2	b_2
Новий мікрорайон	-0,00108	1,0112
Центральний район	-0,0016	1,0181
Ліс	-0,0028	0,9643
Парк з газонами	-0,0018	0,9774
Водна поверхня	-0,0004	0,3725
Відкритий ґрунт без рослинності	-0,0001	0,9908

групами і ділянками піску. Результати класифікації представлені на рис. 2, б, де показано урбандшафти, до яких були віднесені аналізовані ландшафти. Лісопосадки виявилися найбільш близькими до ландшафту ліс, пісок — до відкритого ґрунту.

Спектральні кореляційні характеристики доцільно використовувати як векторну суму відстаней спектральних функцій S_{Σ} (3) і текстурних характеристик S_T [8]:

$$S = \sqrt{S_{\Sigma}^2 + S_T^2}.$$

Таким чином, на підставі отриманих результатів можна стверджувати, що спектральні функції зі збільшенням зсуву за довжиною хвилі каналу гіперспектрального знімка взагалі спадають. Нахил СФ для різних ландшафтів різний, це добре видно за значеннями коефіцієнта c_2 лінійної апроксимації. При порівнянні представлених на рис. 2, а урбандшафтів видно, що значення c_2 зростає зі збільшенням частки рослинності на знімку й зменшенням ділянок без рослинності (ґрунт, дороги, дахи й тощо). Так, у центральних районах нема широких доріг і великих ділянок без рослинності щодо нових мікрорайонів. У парках з газонами відзначено більше рослинності, а в лісі практично вся територія вкрита деревами, що позначається на куті нахилу відповідних графіків СФ. Відкритий ґрунт без рослинності по всьому діапазону зсуву довжини хвилі свідчить про високу кореляцію, а водна поверхня — про малу корельованість з незначними коливаннями.

Подальшим логічним продовженням розглянутого аналізу текстурних і спектральних характеристик поверхні Землі (як функції географічного положення) будуть дослідження ландшафтів із застосуванням спектральних функцій в різні періоди вегетації рослин та у різних умовах довкілля.

1. *Лялько В. И., Федоровский А. Д., Костюченко Ю. В. и др.* Ландшафтно-системный подход при дешифрировании аэрокосмических изображений земной поверхности // Доп. НАН України. – 1999. – № 4. – С. 135–138.
2. *Кронберг П.* Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в географии. – Москва: Мир, 1988. – 349 с.
3. *Кочубей С. Н., Кобец Р. И., Шадчина Т. М.* Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. – Киев: Наук. думка, 1990. – 136 с.
4. *Мовчан Л. И., Каневский В. А., Семигаевский В. Д. и др.* Фитоиндикация в дистанционных исследованиях. – Киев: Наук. думка, 1993. – 305 с.
5. *Hunt G. R., Salisbury J. W.* Visible and Near-Infrared Spectra of Minerals and Rocks // *Modern Geology.* – 1970. – 1. – P. 283–300.
6. *Федоровський О. Д., Якимчук В. Г., Рябоконтенко С. О.* Дешифрування багатозональних космічних знімків ландшафтних комплексів на основі марковських властивостей зображень // *Геоінформатика.* – 2002. – № 1. – С. 63–69.
7. *Федоровський О. Д., Суханов К. Ю., Якимчук В. Г.* Просторово-частотний аналіз при дешифруванні космічних знімків водних ландшафтів // *Космічна наука і технологія.* – 1999. – 5, № 4. – С. 44–45.

*Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук НАН України, Київ*

Надійшло до редакції 19.06.2007