УДК 528.8.04:551.4

© 2009

З. М. Шпортюк, О. М. Сибірцева, О. І. Сахацький

Порівняльний аналіз двох модифікацій методу атмосферної корекції з відніманням темного об'єкта даних сенсора EO-1 Hyperion для оцінювання позиції червоного краю

(Представлено членом-кореспондентом НАН України В. І. Лялько)

Запропоновано два методи атмосферної корекції супутникових даних сенсора EO-1 Hyperion з відніманням темного об'єкта — без урахування (DOS 1) та з урахуванням аерозольного навантаження атмосфери (DOS 3) — для оцінювання позиції червоного краю спектрів відбиття REP. Порівняльний аналіз їх впливу на позицію червоного краю здійснено при зіставленні результатів автоматизованої класифікації наземного покриву на основі REP-зображень тест-ділянки космознімка Hyperion від 14.09.2002 р. Встановлено, що використання атмосферно-коригованих даних показало збільшення контрастів у значеннях REP, покращення розділення різновидів наземного покриву і точності картування.

Моніторинг земного покриву та його змін на реальному та глобальному рівнях можливий завдяки використанню різночасових супутникових даних різних сенсорів. Сигнали електромагнітної радіації, що отримані супутниковими сенсорами в сонячному спектрі при проходженні через атмосферу від поверхні Землі до супутника, зазнають атмосферних впливів. Отже, оскільки немає чіткої відповіді у науковій літературі, виникає потреба з'ясувати: коли атмосферна корекція є необхідною до класифікації зображень і визначення змін, а також коли атмосферна корекція даних супутникових сенсорів є необхідною та який метод є найкращим для використання?

Для багатоканальних даних Landsat TM ці питання вже вивчались у публікаціях [1–3], а різноманітні модифікації методу віднімання темного об'єкта DOS (Dark Object Substraction) — у [1–5].

Зауважимо, що в зазначеній літературі відсутні дослідження впливу методів атмосферної корекції гіперспектральних даних сенсора Hyperion з відніманням темного об'єкта DOS на величину позиції червоного краю REP (Red Edge Position).

Мета даної роботи — верифікація впливу двох модифікацій методу DOS на величину REP за даними зйомки сенсора Hyperion конкретної території.

На підставі аналізу праць [1, 2, 6–8] можна зробити висновки, що атмосферна корекція необхідна перед класифікацією та визначенням змін у таких випадках: при аналізі даних з різних супутникових сенсорів [6, 7]; при використанні різночасових даних для визначення змін [1, 6] та для автоматизованої класифікації зображень [2, 8].

Узагальнений метод атмосферної корекції супутникових даних з відніманням темного об'єкта DOS. *Метод DOS 3* — найбільш узагальнений метод атмосферної корекції з використанням темного об'єкта для визначення коефіцієнта відбиття земної поверхні [8]; використовувався при обробці даних космозйомки таких сенсорів, як IKONOS,

SPOT й ETM + для порівняльного аналізу оцінювання цих даних для визначення листового площового індексу при аналізі стану лісів [6].

Основна умова застосування цього методу: наявність на знімку темних об'єктів — пікселів (далі при цифрі — пл), які повністю темні, а їх слабкий сигнал, отриманий супутниковим сенсором, спричинений розсіянням при проходженні через атмосферу.

Головна перевага DOS-моделі як процедури базується на самому зображенні і не вимагає польових вимірювань *in situ*, вона є відносно нескладною і відкритою для застосування за відсутності обширної інформації про атмосферні умови під час проведення зйомки.

Головний недолік — це складність вибору темного об'єкта [4, 5]. Метод DOS 3 враховує функції впливу атмосфери на шляху Сонце — Земля і Земля — сенсор [8, 9]. Згідно з цим методом, коефіцієнт відбиття земної поверхні для k-го піксела в i-му каналі сенсора визначається за формулою:

$$R_{ik} = \frac{\pi(L_{ik} - L_{i\,\min})}{E_{si}\cos\theta} e^{\tau_i[1/\cos\theta + 1/\cos\theta_1]}. \tag{1}$$

Тут $\tau_i = \tau(\lambda)$ — оптична товщина атмосфери на довжині хвилі λ; θ_1 — зенітний кут огляду; L_{ik} — значення щільності спектральної яскравості (Вт$\cdot$м$^{-2}\cdot$ср$^{-1}\cdot$мкм$^{-1}$) k-го піксела в i-му каналі; $L_{i\,\min}$ — мінімальне значення щільності спектральної яскравості в i-му каналі; E_{si} — сонячний потік (Вт $\cdot$ м$^{-2}\cdot$ мкм$^{-1}$) в i-му каналі; θ — зенітний кут Сонця.

У формулі (1) величини, позначені індексом i, залежать від довжини хвилі та мають різні значення для кожного спектрального каналу, зенітні кути Сонця θ і огляду θ_1 залежать від дати і часу знімання об'єкта.

Метод DOS 1 припускає відсутність атмосферного розсіяння, тобто $\tau(\lambda) \equiv 0$. З цієї формули (1) випливає, що метод DOS 1 є частковим випадком методу DOS 3, оскільки в цьому випадку передавальна функція

$$e^{\tau_i[1/\cos\theta + 1/\cos\theta_1]} = 1.$$

Такий варіант методу атмосферної корекції багатоспектральних даних розглянуто в праці [9], де було зазначено, що метод DOS 1 дає недокориговані значення коефіцієнта відбиття земної поверхні в порівнянні з методом моделювання радіаційного переносу.

Математичні моделі для обчислення оптичної товщини атмосфери. Найбільш критичним кроком в атмосферній корекції є визначення оптичної товщини атмосфери на час космічної зйомки сцени [10].

Оптична товщина атмосфери для розсіяння Релея у видимому та NIR діапазоні залежить від довжини хвилі. В праці [4] запропоновано для обчислення оптичної товщини степеневу функцію такого вигляду: $\tau(\lambda) = \lambda^{-\alpha}$.

Залежно від наявності газів в атмосфері можливі такі моделі для різних типів атмосферних умов на час проведення зйомки.

Математичні моделі $\tau(\lambda)$ оптичної товщини для різних типів атмосферних умов, за даними [4]:

дуже ясно — λ^{-4};
ясно — λ^{-2};
середньо, помірно — λ^{-1};
загазована атмосфера — $\lambda^{-0,7}$;
дуже загазована — $\lambda^{-0,5}$.

Нами також включено ще дві відомі моделі оптичної товщини для відносного розсіяння: Релея (Rayleigh) та Мі (Mie). Модель Релея, яку використовують для дуже ясної атмосфери, означає, що відносне розсіяння обернено пропорційне четвертому степеню довжини хвилі, тобто на коротших довжинах хвиль спектра розсіяння набагато більше, ніж на довших. Цей тип розсіяння спричинений молекулами газу, що набагато менші за розмірами, ніж довжини хвиль світла.

Розсіяння Мі спричинене частинками, які приблизно такого самого розміру, як і довжина хвилі, наприклад частинки диму або пилу. Модель Мі описує розсіяння, як функцію, обернено пропорційну довжині хвилі, і характеризує помірно ясні атмосферні умови. Показник степеня α можна обчислити за формулою Ангстрема [2], якщо відомі значення оптичної товщини для двох довжин хвиль λ_1 і λ_2. Тоді показник експоненти між довжинами хвиль λ_1 й λ_2 обчислюється за формулою [11, 12]:

$$\alpha \equiv \alpha(\lambda_1, \lambda_2) = \frac{\ln \tau(\lambda_1) - \ln \tau(\lambda_2)}{\ln \lambda_2 - \ln \lambda_1} \tag{2}$$

для всіх $\lambda \in [\lambda_1, \lambda_2]$.

Оптична товщина атмосфери для каналів з проміжку (λ_1, λ_2) визначається як

$$\tau(\lambda) = \tau(\lambda_2)\left(\frac{\lambda}{\lambda_2}\right)^{-\alpha} \tag{3}$$

або

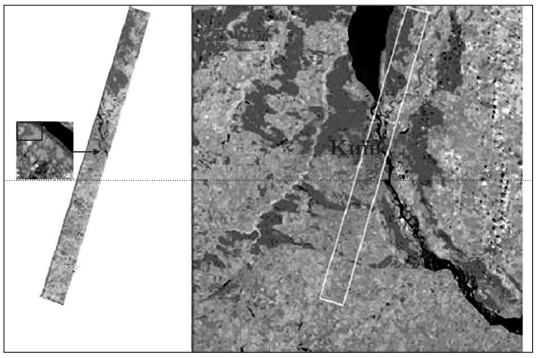
$$\tau(\lambda) = \tau(\lambda_1)\left(\frac{\lambda}{\lambda_1}\right)^{-\alpha}. \tag{4}$$

Зауважимо, що оптична товщина аерозолей на довжинах хвиль 440, 670, 870 нм забезпечена в мережі AERONET [13]. Ці дані можна використати для каналів Hyperion на довжинах хвиль 670 й 865 нм, проігнорувавши малу різницю в 5 нм.

Верифікація модифікованих алгоритмів обчислення REP з урахуванням атмосферної корекції методами DOS 1 і DOS 3, за гіперспектральними даними сенсора Hyperion на тест-ділянці. Дослідимо вплив модифікованих алгоритмів обчислення індексу червоного краю REP з урахуванням атмосферної корекції методами DOS за даними гіперспектральної зйомки Києва та області від 14.09.2002 р. (рис. 1). За найтемніший об'єкт сцени обрано водну поверхню р. Дніпро.

Зображення EO-1 Hyperion від 14 вересня 2002 р., що використане в цьому дослідженні, є EO1H1810252002244110PZ. Дані рівня обробки 1 конвертовані до формату ERDAS Imagine за допомогою програми ENVI. На рис. 1 наведено зображення Hyperion досліджуваної території Києва та області. Ширина сцени приблизно 7,5 км, довжина — 94 км. Ця територія розташована вздовж смуги, центральна лінія якої на півдні починається з точки, координати якої приблизно $30°21'35''$ сх. д. та $50°01'05''$ пн. ш., та закінчується на півночі в точці з координатами приблизно $30°43'00''$ сх. д. та $50°50'20''$ пн. ш.

У межах сцени для дослідження відбивних характеристик та вегетаційних індексів певних видів земного покриву виділено ділянку (див. рис. 1), що дало змогу виконати аналіз діапазонів змін вегетаційних індексів, за даними Hyperion, для основних різновидів рослинного покриву та земної поверхні.



а *б*

Рис. 1. Синтезоване зображення знімка EO-1 Hyperion (14.09.2002) у межах Київського регіону (синтез каналів № 20, № 30 та № 40) (*а*) та синтезоване зображення знімка Landsat ETM (14.09.2001) (синтез каналів № 2, № 4, № 5) (*б*).
Білий прямокутник на знімку Landsat ETM вказує на розташування знімка Hyperion. Чорним прямокутником виділено дослідну тест-ділянку детальних досліджень у межах загальної сцени

Побудова коригованих методами DOS REP-зображень, за даними сенсора Hyperion фрагмента розміром (23×18) пікселів зображення ділянки, наведеної на рис. 1, здійснено на підставі попіксельного обчислення REP за формулами, наведеними в табл. 1. Причому, обчислення проведено для трьох множин даних: для коефіцієнтів планетарного відбиття [6, 14], які обчислюються без атмосферної корекції, та для коефіцієнтів наземного відбиття (1) з атмосферною корекцією даних методами DOS 1 й DOS 3 відповідно.

У методі DOS 1 коефіцієнти відбиття земної поверхні для ділянки обчислювали за такими вихідними даними: $\tau(\lambda_i) \equiv 0$; $\theta = 48^\circ$; λ_i — довжина хвилі центра i-го каналу; $i \in \{32{,}35{,}39{,}43\}$. У методі DOS 3 обчислення коефіцієнтів відбиття в каналах здійснювалося за формулою (1) за такими вихідними даними: $\theta_1 = 0$; $\theta = 48^\circ$; $\tau_i = \tau(\lambda_i)$; $\lambda_i \in (660,\ 870)$ нм; $\tau(660) = 0{,}25$; $\tau(865) = 0{,}20$.

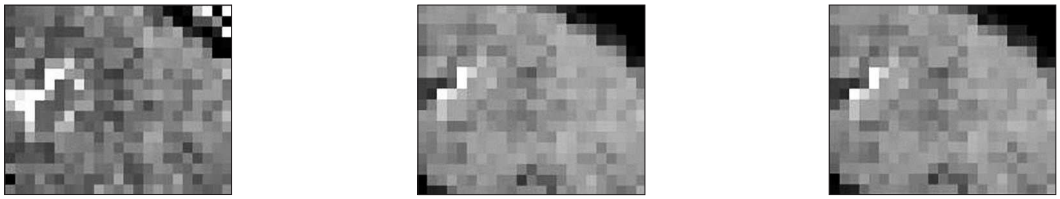
Відновлення функції оптичної товщини атмосфери. При обчисленні оптичної товщини атмосфери для даних Hyperion від 14.09.2002 р. вважалося, що знімання відбувалось в умовах середнього аерозольного навантаження атмосфери. Для таких атмосферних умов справедливий [4] закон розсіяння Мі, за яким оптична товщина атмосфери обернено пропорційна довжині хвилі:

$$\tau(\lambda) = k\lambda^{-1}. \tag{5}$$

Вихідні значення оптичної товщини обрано за даними робіт [8, 11] для значень $\lambda_1 = 660$ нм; $\lambda_2 = 865$ нм; $\tau(660) = 0{,}25$; $\tau(865) = 0{,}20$.

Таблиця 1. Канали сенсора Hyperion, які використовуються для обчислення індексу червоного краю REP

Номер каналу сенсора Hyperion	Центри каналів сенсора Hyperion, нм	Індекс червоного краю REP, нм
32	671,02	$REP = 701{,}55 + 40{,}7\dfrac{\overline{R} - R_{35}}{R_{39} - R_{35}}$
35	701,55	
39	742,25	$\overline{R} = \dfrac{R_{32} + R_{43}}{2}$
43	782,95	



а *б* *в*

Рис. 2. REP-зображення фрагмента з 414 пл тест-ділянки: *а* — за атмосферно-некоригованими даними; *б* — за атмосферно-коригованими даними методом DOS 1; *в* — за атмосферно-коригованими даними методом DOS 3

Тоді, використовуючи значення $\tau(660) = 0{,}25$, згідно з формулою (5), отримуємо закон зміни оптичної товщини для інтервалу 660 нм $< \lambda <$ 870 нм:

$$\tau(\lambda) = \frac{\tau(660) \cdot 660}{\lambda}. \tag{6}$$

Відзначимо, що значення показника степеня, обчислене за формулою Ангстрема (2), відрізняється від 1 і становить $\alpha \equiv \alpha(660,\ 865) = 0{,}82$. Враховуючи, що, згідно з формулою (6), $\tau(865) = 0{,}1908$, можна стверджувати, що абсолютна похибка між обчисленим за формулою і заданим значенням τ (865) незначна і дорівнює 0,0092. Для побудови REP-зображень фрагмента ділянки (див. рис. 1) обчислено попіксельно значення REP за коефіцієнтами планетарного відбиття та наземного відбиття з атмосферною корекцією даних методами DOS 1 і DOS 3 відповідно.

REP-зображення фрагмента ділянки, обчисленого попіксельно за значеннями коефіцієнтів планетарного відбиття та наземного відбиття з атмосферною корекцією даних методами DOS 1 й DOS 3 відповідно, наведено на рис. 2.

Зауважимо, що нам не відомо дійсних значень REP для тест-ділянки 414 пл, які можна отримати із спектрів наземного відбиття внаслідок польових досліджень, а нашою метою було ілюструвати відмінності між різними підходами до атмосферної корекції даних космозйомки, які проявляються при побудові REP-зображень, за даними сенсора Hyperion.

Нижче наведено гістограми розподілу значень REP (рис. 3) за атмосферно-некоригованими та коригованими даними для фрагмента тест-ділянки, зображеної на рис. 2.

Наведені гістограми дають уявлення про вплив атмосферної корекції на величину REP. Так, у випадку атмосферно-некоригованих даних величина REP змінюється в межах [717,3–745,8 нм], довжина інтервалу зміни $\Delta\text{REP} = 28{,}5$ нм, а середнє значення $\text{REP}_{\text{сер}} = 726{,}627$ нм. У випадку атмосферно-коригованих з використанням методу DOS 1 даних значення REP зсуваються вліво: REP $\in$ [696,42, 737,37 нм] довжина інтервалу збільшується: $\Delta\text{REP} = 40{,}95$ нм, $\text{REP}_{\text{сер}} = 722{,}369$ нм. У випадку атмосферно-коригованих методом DOS 3 даних REP $\in$ [695,69, 736,75 нм], $\Delta\text{REP} = 41{,}06$ нм, $\text{REP}_{\text{сер}} = 721{,}663$ нм.

Отже, атмосферна корекція зменшує величини REP, одночасно збільшуючи діапазон їх зміни, що покращує контрасти в значеннях REP і роздільність класів.

Згідно з побудованими гістограми REP-зображень, обчисленних за атмосферно-некоригованими і атмосферно-коригованими даними, можна зробити такі висновки: 1) існує значна різниця між некоригованими і коригованими значеннями REP, яка проявляється у величинах середніх значень $\text{REP}_{\text{сер}}$ і становить ≈ 4 нм; 2) у той самий час різниця між спрощеним методом атмосферної корекції DOS 1 і узагальненим DOS 3 для атмосфери з помірним аерозольним навантаженням незначна — відхилення в середніх значеннях < 1 нм.

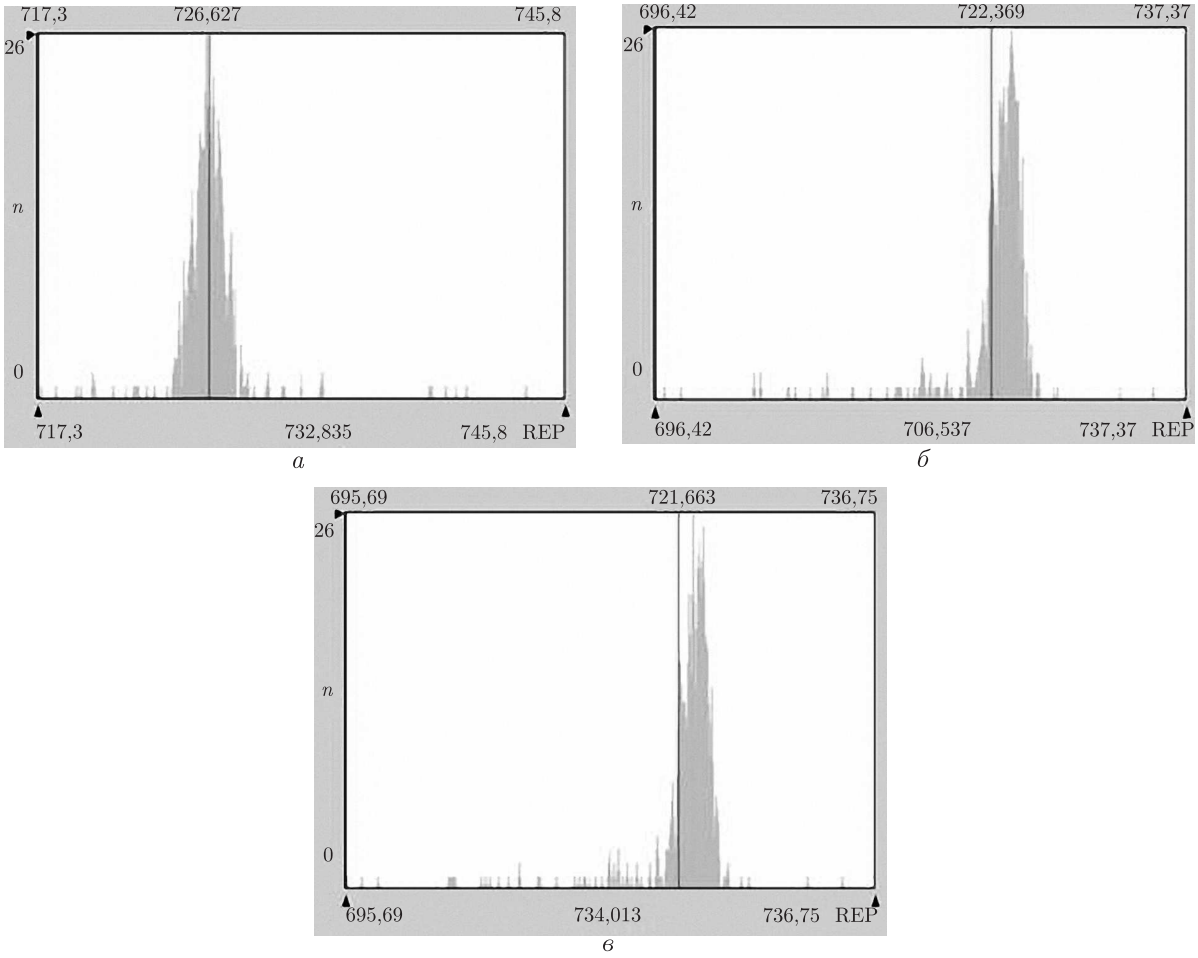
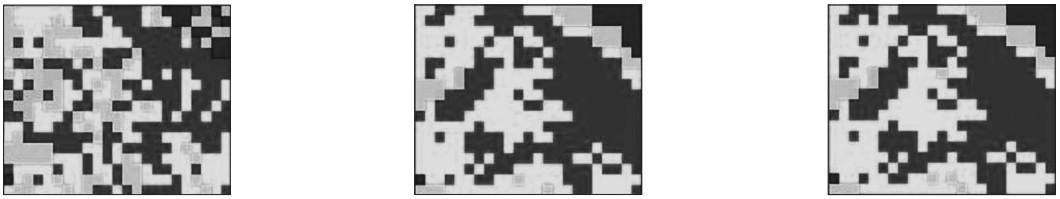


Рис. 3. Гістограми REP-зображень для фрагмента (23 × 18) пікселів тест-ділянки (див. рис. 2): *а* — за атмосферно-некоригованими даними (див. рис. 2, *а*); *б* — за атмосферно-коригованими даними методом DOS 1 (див. див. рис. 2, *б*); *в* — за атмосферно-коригованими даними методом DOS 3 (див. рис. 2, *в*). Горизонтальна вісь: довжина хвилі, нм. Вертикальна вісь — цілі числа

Вплив атмосферної корекції методами DOS 1 і DOS 3 на результати класифікації наземного покриву буде досліджено нижче при класифікації REP-зображень (див. рис. 2).

Результати автоматизованої класифікації REP-зображення тест-ділянки. Класифікацію наведених на рис. 2 REP-зображень фрагмента з 414 пл ділянки здійснено методом класифікації без навчання (Unsupervised Classification) за допомогою програмних продуктів ERDAS IMAGINE. Класифіковані REP-зображення фрагмента наведено на рис. 4.

За результатами класифікації проведено зіставлення значень REP для чотирьох основних класів земного покриву (див. рис. 4): 1 — деревостани паркової зони (темно-сірий колір); 2 — трав'яниста рослинність (сірий); 3 — техногенні споруди (світло-сірий); 4 — водна поверхня р. Дніпро (чорний). У табл. 2 для зіставлення наведено значення REP для чотирьох основних класів земного покриву, вибраних за наземними даними для фрагмента з 414 пл (див. рис. 1) зображення дослідної ділянки, на підставі даних, обчислених для побудови REP-зображень за атмосферно-некоригованими (див. рис. 2, *а*) і коригованими методом DOS 1 (див. рис. 2, *б*) та методом DOS 3 (див. рис. 2, *в*) даними.



а *б* *в*

Рис. 4. Класифіковані REP-зображення фрагмента з 414 пл тест-ділянки: *а* — за атмосферно-некоригованими даними; *б* — за атмосферно-коригованими даними методом DOS 1; *в* — за атмосферно-коригованими даними методом DOS 3

Таблиця 2. Значення REP для різних класів земного покриву на ділянці 414 пл за атмосферно-коригованими і некоригованими даними сенсора Hyperion

Клас земного покриву	REP, нм					
	Некориговані значення		Кориговані значення			
			методом DOS 1		методом DOS 3	
	min	max	min	max	min	max
1	726,70	728,50	723,50	727,40	722,70	726,80
2	725,50	726,50	720,40	723,40	720,00	722,70
3	731,00	745,80	732,10	737,40	731,40	736,70
4	717,30	723,00	696,40	711,50	695,69	710,70

Примітка. 1 — деревостани паркової зони; 2 — трав'яниста рослинність; 3 — техногенні споруди; 4 — водна поверхня.

На підставі зіставлення трьох типів REP-зображень для тест-ділянки, побудованих за атмосферно-некоригованими та атмосферно-коригованими методами DOS 1 й DOS 3 даними встановлено, що класифікація рослинного покриву за REP-зображеннями з атмосферною корекцією даних дає кращі результати, ніж без неї. Зокрема, покращується розділення класів рослинного покриву та водної поверхні.

Аналізуючи гістограми розподілу значень REP для фрагментів тест-ділянки визначено, що існує суттєва різниця між некоригованими і коригованими значеннями REP-даних, яка проявляється у величинах середніх значень $\mathrm{REP}_{\mathrm{сер}}$ і становить ≈ 4 нм; в той самий час різниця між спрощеним методом атмосферної корекції DOS 1 і узагальненим DOS 3 для атмосфери з помірним аерозольним навантаженням незначна — відхилення в середніх значеннях менше 1 нм.

Таким чином, проведеними дослідженнями встановлено, що атмосферна корекція необхідна і повинна бути першорядним кроком при обробленні гіперспектральних даних сенсора Hyperion для обчислення коефіцієнтів наземного відбиття при класифікації та визначенні змін рослинного покриву і водної поверхні при розв'язанні екологічних, гідрологічних, гідрогеологічних та інших тематичних задач.

1. *Song C., Woodcock C. E., Seto K. C. et al.* Classification and change detection using Landsat TM data. When and how to correct atmospheric effects? // Remote Sens. Environ. – 2001. – **75**. – P. 230–244.
2. *Pax-Lenney M., Woodcock C. E., Macomber S. A. et al.* Forest mapping with a generalized classifier and Landsat TM data // Ibid. – 2001. – **77**. – P. 241–250.
3. *Sobrino J. A., Jimenez-Mumoz J. C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from Landsat TM 5 // Ibid. – 2004. – **90**. – P. 434–440.
4. *Chavez P. S.* An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data // Ibid. – 1988. – **24**. – P. 459–479.

5. *Chavez P. S. Jr.* Image-based atmospheric corrections revisited and improved // Photogramm. Eng. and Remoter. Sens. – 1996. – **62**. – P. 1025–1036.
6. *Soudani K., Francois C., Le Maire G. et al.* Comparative analysis of IKONOS, SPOT, and ETM+ data for leaf area index estimation in temperate coniferous and deciduous forest stands // Remote Sens. Environ. – 2006. – **102**. – P. 161–175.
7. *Thenkabail P. S., Enclona E. A., Ashton M. S. et. al.* Hyperion, IKONOS, ALI, and ETM+ sensors in the study of African rainforests // Ibid. – 2004. – **90**. – P. 23–43.
8. *Pons X., Solé-Sugranes L.* A Simple Radiometric Correction Model to Improve Automatic Mapping of Vegetation from Multispectral Satellite Data // Ibid. – 1994. – **48**, No 2. – P. 191–203.
9. *Moran M. S., Jackson P. D., Slater P. N., Teillet P. M.* Evalution of Simplified Procedures for Retrieval of Land Surface Reflectance Factor from Satellite Sensor Output // Ibid. – 1992. – **41**. – P. 169–184.
10. *Radeloff V. C., Mladenoff D. J., Boyce M. S.* Detecting Jack Pine Budworm Defoliation Using Spectral Mixture Analysis: Separating Effects from Determinants // Ibid. – 1999. – **69**, No 2. – P. 156–169.
11. *Schroeder Th., Fischer J., Preusker R., Schale M., Regner P.* Retrieval of surface reflectance in the framework of the MERIS Global Land Surface albedo maps project. – 2005. – MERIS User Workshop, ESA ESRIN, Fraskati, Italy, 26–30.09.2005. – 6 p.
12. *Nobilean D., Antoine D.* Defection of blue – absorbing aerosols using near infrared and visible (ocean color) remote sensing observations // Remote Sens. Environ. – 2005. – **95**. – P. 368–387.
13. *Holben B. N., Tanre D., Smirnov A. V. et al.* An emerging ground – based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET // J. of Geophys. Res. – 2001. – **106**. – P. 12067. – 12097.
14. *Лялько В. І., Сахацький О. І., Шпортюк З. М., Сибірцева О. М.* Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними ЕО-1 "Hyperion" для класифікації земного покриву // Космічн. наука і технол. – 2008. – **14**, № 3. – С. 55–68.

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

Надійшло до редакції 23.04.2009

Z. M. Shportjuk, O. N. Sibirtseva, A. I. Sakhatsky

The comparative analysis of two modifications of the atmospheric correction of hyperspectral data from EO-1 Hyperion for the red edge position estimation

Two versions of the atmospheric correction of satellite data from Hyperion using the dark object substraction method — without using (DOS 1) and taking the aerosol optical depth into account (DOS 3) have been researched for the red edge position (REP) evaluation. The comparison of their influence on REP has been realized by the analysis of results of the unsupervised land cover classification of REP-images of a test-site from Hyperion data (14.09.2002). It is found that the atmospheric correction of satellite data shows increasing the contrasts of REP values and improving the separation of land cover mappings on the base of the satellite data classification.