

УДК 528.8.04: 551.4

В. І. Лялько, З. М. Шпортюк, О. І. Сахацький, О. М. Сибірцева, С. С. Дугін, В. В. Григоренко

Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України, Київ

ЗІСТАВЛЕННЯ СУПУТНИКОВИХ ТА НАЗЕМНИХ ГІПЕРСПЕКТРАЛЬНИХ ДАНИХ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ПОЗИЦІЇ ЧЕРВОНОГО КРАЮ СПЕКТРІВ ВІДБИТТЯ

Проведено зіставлення гіперспектральних даних супутникового сенсора EO-1 «Hyperion» і спектрометричних даних спектродіаметра ASD FieldSpec® 3F для оцінювання позиції червоного краю (REP) спектрів відбиття деяких типів земного покриття на тест-ділянці Маріїнського парку м. Києва. При дослідженнях використано знімок сенсора EO-1 «Hyperion» (14.09.2002 р.) та дані наземних вимірювань 15.04.2009 р. і 16.09.2009 р. Встановлено залежність величини REP від методу обчислення та від рівня обробки даних космознімання: чотириточковий метод лінійної інтерполяції атмосферно коригованих супутникових даних дає значення REP для трав'яного покриву, найближчі до обчислених за даними наземних вимірювань.

ВСТУП

Дистанційне зондування Землі за допомогою супутникових гіперспектральних сенсорів є потужним інструментом для тривалого моніторингу рослинного покриву. У зіставленні з традиційними багатоспектральними даними гіперспектральні дані пропонують нові спектральні характеристики, зокрема позицію червоного краю REP (Red Edge Position). За означенням [10] REP — це довжина хвилі в інтервалі $\lambda\lambda = 680...760$ нм, де швидкість зміни спектра відбиття досягає максимуму. За даними досліджень [5–9, 12] REP є індикатором стану рослинності та вегетаційного стресу, наслідком якого є зсуви REP. Вегетаційні стреси різної природи, які призводять до зменшення хлорофілу, проявляються у спектрах відбиття рослин зсувами до коротких довжин хвиль (так званий «голубий зсув»). Збільшення вмісту хлорофілу в рослинах на різних фенологічних стадіях їхнього розвитку від початку росту до цвітіння супроводжується зсувами REP у напрямку збільшення (так званий «червоний зсув»). Можливість ідентифікації різновидів рослинних спільнот за значенням REP та зміни REP внаслідок геохімічних стресів,

уражень рослин шкідниками, забруднення доквілля свідчать про потенційну можливість використання REP-зображень, побудованих за даними гіперспектрального космознімання [2, 4] для просторового аналізу стану рослинного покриву Землі на значних територіях.

Гіперспектральні зображення, які мають достатню просторову розрізненість, щоб описати діагностичні сигнатури, містять інформацію про відмінності між різновидами рослин і різними типами ґрунтів та мінералів. Однак досі не провадився довготривалий моніторинг змін рослинного покриву через відсутність багаточасових гіперспектральних даних та надійних методів отримання інформації про стресові зміни з аналізу даних ДЗ. Використання REP для класифікації земного покриву за даними аерознімання розглянуто у роботі [12], за даними космознімання — у роботах [1–3]. У роботі [12] проведено також зіставлення спектральних зсувів REP, отриманих з використанням гіперспектральних даних аерознімання та наземних вимірювань.

Дані, одержані супутниковими сенсорами, залежать як від типу сенсора, так і від часу знімання земної поверхні. Спектральні вегетаційні індекси, обчислені за цими даними для однієї і тієї ж ділянки поверхні, можуть залежати також від рівня обробки даних і можуть відрізнитися

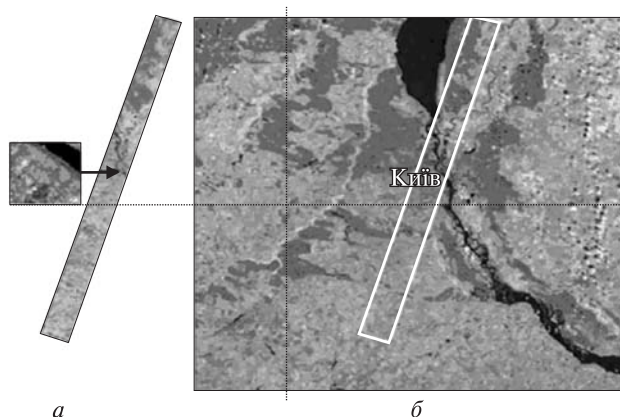


Рис. 1. Синтезоване зображення знімка EO-1 «Hyperion» (14 вересня 2002 р.) у межах Київського регіону (синтез каналів 20, 30 та 40) (а) та синтезоване зображення знімка «Landsat» ЕТМ (14 вересня 2001 р.) (синтез каналів 2, 4, 5) (б). Білий прямокутник на знімку «Landsat» ЕТМ вказує на розташування знімка «Hyperion». Фрагмент знімка EO-1 «Hyperion» вказує на ділянку детальних досліджень у межах загальної сцени

від індексів, обчислених за результатами наземних спектрометричних вимірювань. Тому порівняльному аналізу спектральних індексів для певного типу земного покриття, обчислених за різними джерелами даних, приділяється значна увага [1—4, 12—14]. Нам не відомі дослідження, які б стосувались зіставлення значень *REP* за гіперспектральними даними наземних вимірювань та даними космознімання сенсора EO-1 «Hyperion».

Мета нашої роботи — зіставити гіперспектральні дані супутникового сенсора EO-1 «Hyperion» і дані наземного вимірювання спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F при оцінюванні *REP*-спектрів відбиття деяких типів земного покриття на тест-ділянці Маріїнського парку м. Києва і перевірити правильність класифікації *REP*-зображень.

ДЖЕРЕЛА ДАНИХ

«Hyperion» — перший у світі гіперспектральний відеоспектрометр, встановлений на борту супутника EO-1, запущеного NASA 21 березня 2000 р. [11]. Він має 220 спектральних каналів в діапазоні від 400 до 2500 нм. Спектральна розрізненість його каналів в оптичному та близькочерво-

ному діапазоні становить 10 нм, а просторова розрізненість дорівнює 30 м для всіх каналів. Ширина стандартної сцени зйомки 7.7 км, довжина — 42 км. Альтитуда орбіти EO-1 — 705 км, така ж як і в «Landsat-7».

У дослідженні використано зображення EO1H1810252002244110PZ, отримане EO-1 «Hyperion» 14 вересня 2002 р. (рис. 1). Дані рівня 1 конвертовані до формату ERDAS Imagine за допомогою програми ENVI. Досліджувалась територія Києва та області. Ширина сцени приблизно 7.5 км, довжина — 94 км. Досліджувана територія розташована вздовж смуги, центральна лінія якої на півдні починається з точки, координати якої приблизно 30°21'35" с. д. та 50°01'05" пн. ш., і закінчується на півночі в точці з координатами приблизно 30°43'00" с. д. та 50°50'20" пн. ш.

У межах сцени для дослідження відбивних характеристик та вегетаційних індексів певних видів земного покриття виділено ділянку (рис. 1) для аналізу діапазонів змін вегетаційних індексів за даними «Hyperion» для основних різновидів рослинного покриття та земної поверхні.

Наземні вимірювання спектрів відбиття від вибраних мішеней земного покриття зроблено за допомогою спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F [див. сайт www.asdi.com]. Діапазон вимірювань приладу $\lambda\lambda = 350...2500$ нм. Спектральна розрізненість складала 3 нм в діапазоні $\lambda\lambda = 350...1000$ нм. Всі спектри були виміряні в надир. Дистанція між спектрорадіометром і мішенню становила приблизно 1 м. Вимірювання спектрів на набережній Дніпра проведені 15 квітня 2009 р. і 16 вересня 2009 р. За мішені земного покриття вибрано асфальтову дорогу і траву пирію на узбіччі набережної. Вимірювання спектрів трав'яного покриття та трибун на стадіоні «Динамо» м. Київ зроблені 16 вересня 2009 р. об 11 год за місцевим часом. Зразки спектрів відбиття наведено на рис. 2.

Зразки спектральних профілів за даними сенсора EO-1 «Hyperion» від 14 вересня 2002 р. на тест-ділянці зображення наведено на рис. 3.

Зіставлення даних наземної спектрометрії для вибраних класів наземного покриття із даними космозйомки вказують на необхідність гармонізації даних космознімання, які зазнають значних

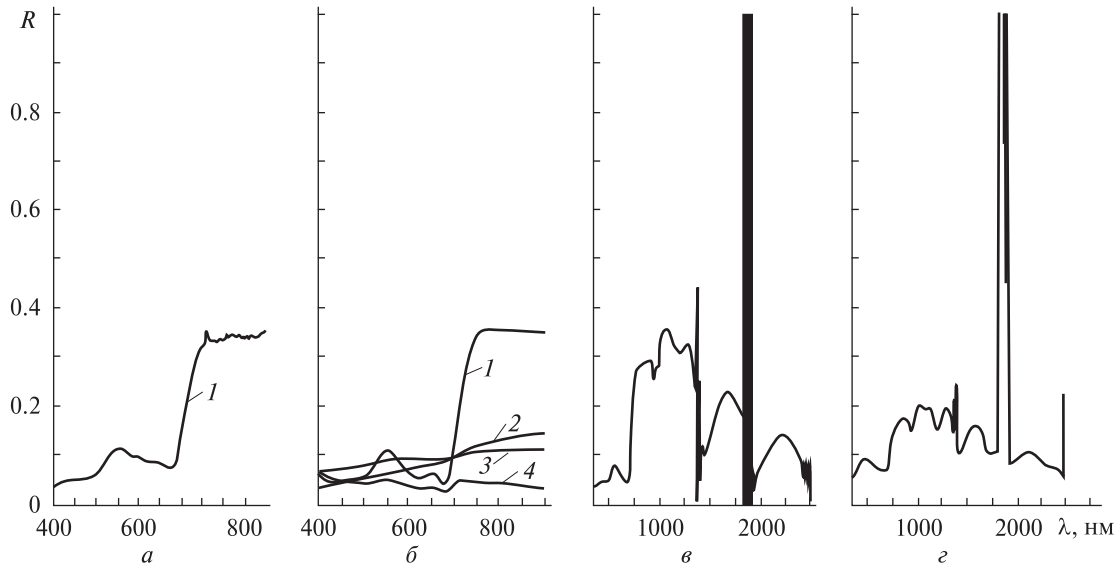


Рис. 2. Спектральні значення коефіцієнта відбиття R за результатами зйомки спектро радіометром ASD FieldSpec® 3F: *a* — на набережній Дніпра 15 квітня 2009 р., *б* — на набережній Дніпра 16 вересня 2009 р. (*1* — пирій, *2* — асфальтова дорога, *3* — гранітна набережна, *4* — вода), *в* — на стадіоні «Динамо» 16 вересня 2009 р. трав'яного покриття, *г* — трибуни

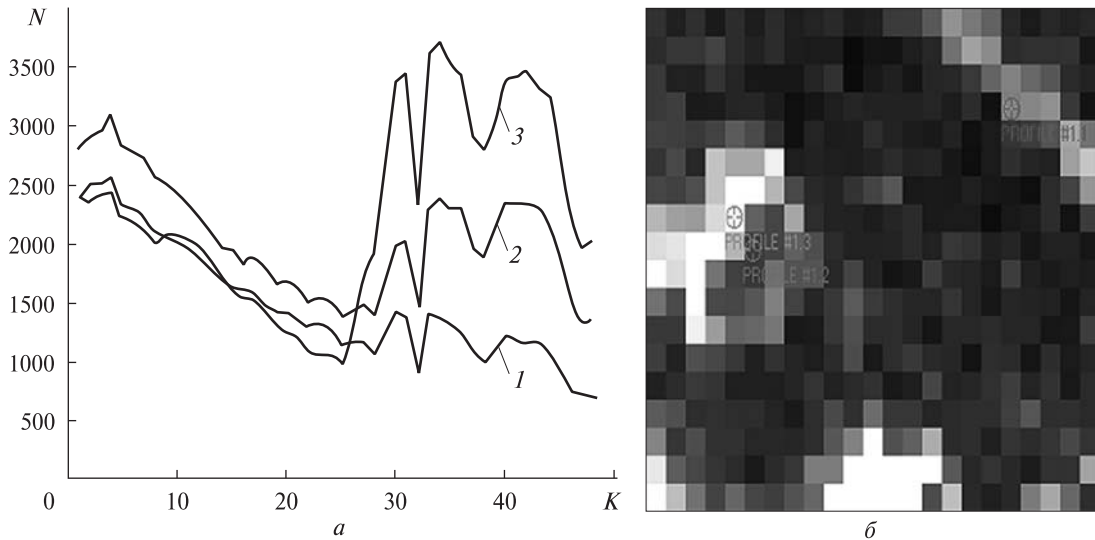


Рис. 3. Зразки спектральних профілів трьох класів покриття (*a*) для фрагмента зображення тест-ділянки Маріїнського парку у синтезованих кольорах (*б*): *1* — асфальтова дорога (набережна Дніпра), *2* — трибуна стадіону «Динамо», *3* — трав'яний покриття стадіону «Динамо». Вертикальна вісь: покази N сенсора «Нурегіон», цілі числа. Горизонтальна вісь: номер K каналу

атмосферних впливів, із даними наземної зйомки, що вимагає додаткової обробки. При цьому можливі різні рівні обробки: з атмосферою корекцією даних і без корекції. Впливи рівнів об-

робки даних космоснімання на величину REP і залежність REP , як для даних наземної зйомки, так і для даних космоснімання, від методів обчислення, розглядається нижче.

МЕТОДИ

До останнього часу методиці визначення REP за даними космознімання не приділялося достатньої уваги через відсутність на супутниках відповідних спектрометрів з достатньою кількістю каналів в зоні червоного краю. Наведемо формули обчислення REP з використанням даних сенсора EO-1 «Hyperion» та з використанням даних спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F, які відрізняються між собою внаслідок неоднакового розташування спектральних каналів в області червоного краю.

Обчислення REP для даних гіперспектрального супутникового сенсора EO-1 «Hyperion». Вперше значення позиції червоного краю REP за даними EO-1 «Hyperion» отримано в роботі [11]. Згідно з методом чотириточкової лінійної інтерполяції вона обчислюється за формулами

$$REP = 701.55 + 40.7 \frac{\bar{R} - R_{35}}{R_{39} - R_{35}} = 701.55 + 40.7 \frac{\bar{R} - R(701.55)}{R(742.25) - R(701.55)}, \quad (1)$$

$$\bar{R} = \frac{R_{32} + R_{43}}{2} = \frac{R(671.02) + R(782.95)}{2},$$

де $R(\lambda)$ — значення коефіцієнта відбиття на довжині хвилі λ , R_i — значення коефіцієнта відбиття в i -му каналі, $i = 32, 35, 39, 43$. Зауважимо, що обчислені різними способами значення REP можуть не збігатися, а метод (1) є оптимальним щодо часу обчислень серед інших методів [11].

Метод чотириточкової лінійної інтерполяції для даних спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F. В табл. 1 наведено значення довжин хвиль, близь-

Таблиця 1. Порівняльна таблиця значень довжин хвиль сенсора EO-1 «Hyperion» та спектрорадіометра ASD FieldSpec®3F для обчислення REP методом чотириточкової лінійної інтерполяції

Сенсор EO-1 «Hyperion»		Спектрорадіометр ASD FieldSpec®3F
номер каналу	λ , нм	λ , нм
32	671.02	671
35	701.55	701
39	742.25	742
43	782.95	783

ких до значень центрів каналів «Hyperion», які використовуються для обчислення REP за формулою (1).

Згідно з методом чотириточкової лінійної інтерполяції REP за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3F визначається за формулами

$$REP = 701 + 41 \frac{\bar{R} - R(701)}{R(742) - R(701)}, \quad (2)$$

$$\bar{R} = \frac{R(671) + R(783)}{2}.$$

Метод поліноміальної апроксимації спектрів відбиття. Метод полягає в апроксимації спектрів відбиття поліномами n -го степеня у вигляді

$$R(\lambda) = C_0 + \sum_{i=1}^n C_i T_i(\lambda), \quad (3)$$

де $T_i(\lambda)$, $i = 1, 2, 3, \dots, n$ — поліноми Чебишева (або степеневі) i -го степеня 1-го роду [9], а коефіцієнти C_i визначаються методом найменших квадратів, $R(\lambda)$ — коефіцієнт відбиття на довжині хвилі λ . Першу і другу похідну функції $R(\lambda)$ визначаємо диференціюванням за змінною λ . За означенням, REP — те значення довжини хвилі $\lambda \in [670, 780]$ нм, на якому перша похідна $R'(REP)$ досягає максимуму, а друга похідна $R''(REP)$ дорівнює нулеві і змінює знак при переході через точку $\lambda = REP$ з плюса на мінус.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБЧИСЛЕНЬ

Наведеними вище методами були обчислені за даними тестових спектрів відбиття земного покриву, одержаних за допомогою спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3F 15 квітня 2009 р., коефіцієнти C_i апроксимаційних поліномів Чебишева для значень $n = 4, 5, 9$ і відповідні значення позиції червоного краю REP . Результати обчислень наведено в табл. 2—4. Для обробки даних брали значення коефіцієнтів відбиття R з проміжку 600...900 нм із кроком 10 нм, який відповідає спектральній розрізненності сенсора «Hyperion».

Для демонстрації різниці спектрів відбиття в зоні червоного краю, спричиненої різним вмістом хлорофілу в листі рослин, на рис. 4 наведено спектральні коефіцієнти відбиття листя зеленого кущика трави пирію (I) і кущика трави із

частково засохлими листками (2), зняті спектро-радіометром ASD FieldSpec® 3F на набережній Дніпра.

Із табл. 2 видно, що величина *REP* суттєво залежить від степеня апроксимаційного полінома, однак збільшення степеня з $n = 5$ до $n = 9$ не покращує точності визначення *REP*, оскільки значення коефіцієнтів, починаючи із C_5 , близькі до нуля. Із табл. 2 також видно, що отримані значення *REP* для $n = 5$ близькі до значень, обчислених за формулою чотириточкової лінійної інтерполяції (2) ($\Delta\lambda = 0.8...3$).

Оскільки метод чотириточкової лінійної інтерполяції потребує значно меншої кількості обчислень, він може мати суттєву перевагу при обчисленні позиції червоного краю за даними гіперспектральної космозйомки, і особливо при попиксельному обчисленні позиції червоного краю для побудови *REP*-зображень за даними сенсора EO-1 «Hyperion».

Наведеними вище методами обчислено значення *REP* для трьох спектрів відбиття вибраних представників наземного покриття тест-ділянки, одержаних в результаті наземної зйомки спектро-радіометром ASD FieldSpec® 3F 15 квітня 2009 р. (рис. 2). Результати обчислень наведено

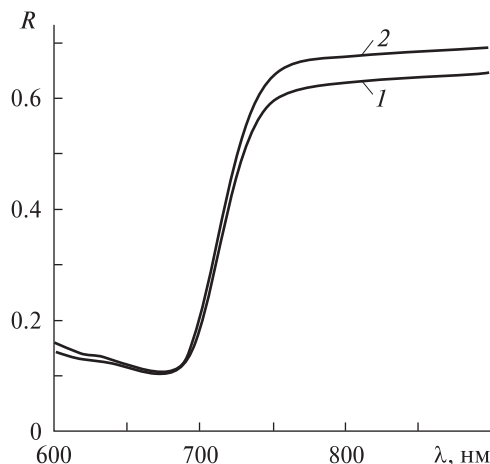


Рис. 4. Спектральні коефіцієнти *R* відбиття трав'яного покриття на набережній Дніпра за даними наземної зйомки від 15 квітня 2009 р.: 1 — зелений пирій, 2 — пирій із частково засохлим листям

в табл. 3. Зіставлення значень *REP* свідчить про те, що для трав'яного покриття значення *REP*, обчислені методом поліноміальної апроксимації при $n = 5$, найближчі до значень, одержаних методом чотириточкової лінійної інтерполяції. Для не рослинного покриття значення *REP*, одержані поліноміальним методом, більші, ніж значення,

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів C_i полінома Чебишева 1-го роду, що апроксимує спектри відбиття пирію на набережній Дніпра (метод (3)), а також відповідні значення *REP*, одержані методом поліноміальної апроксимації і чотириточкової лінійної інтерполяції (метод (2))

Метод, степінь полінома	C_i	<i>REP</i> , нм	σ
<i>Пирій з частково засохлим листям</i>			
Метод (3) $n = 4$	$C_0 = 0.4616, C_1 = 0.2730, C_2 = -0.0115, C_3 = -0.0410, C_4 = 0.0167$	705	0.0908
$n = 5$	$C_0 = 0.4616, C_1 = 0.3010, C_2 = -0.0115, C_3 = -0.0351, C_4 = 0.0167, C_5 = 0.0033$	717	0.0858
$n = 9$	$C_0 = 0.4424, C_1 = 0.2952, C_2 = -0.0252, C_3 = -0.0359, C_4 = 0.0138, C_5 = 0.0035, C_6 = -0.0038, C_7 = 0.0003, C_8 = 0.0006, C_9 = -0.0001$	714	0.0271
Метод (2)	—	719.08	—
<i>Зелений пирій</i>			
Метод (3) $n = 4$	$C_0 = 0.4309, C_1 = 0.2562, C_2 = -0.0104, C_3 = -0.0376, C_4 = 0.0152$	705	0.0941
$n = 5$	$C_0 = 0.4309, C_1 = 0.2830, C_2 = -0.0104, C_3 = -0.0319, C_4 = 0.0152, C_5 = 0.0032$	720	0.0890
$n = 9$	$C_0 = 0.4135, C_1 = 0.2771, C_2 = -0.0229, C_3 = -0.0328, C_4 = 0.0125, C_5 = 0.0033, C_6 = -0.0036, C_7 = 0.0003, C_8 = 0.0006, C_9 = -0.0001$	714	0.0329
Метод (2)	—	719.91	—

Таблиця 3. Значення REP для спектрів відбиття представників трьох класів наземного покриття, обчислених різними методами за даними наземної зйомки 16 вересня 2009 р.

Тип покриття	REP, нм		ΔREP , нм
	Метод (3)	Метод (2)	
Асфальтова дорога (набережна Дніпра)	756 (n = 4)	739.12	15.88
	753 (n = 5)		12.88
	744 (n = 9)		3.88
Трибуна стадіону «Динамо»	735 (n = 4)	732.98	2.02
	744 (n = 5)		11.02
	735 (n = 9)		2.02
Трав'яний покрив стадіону «Динамо»	711 (n = 4)	722.05	11.05
	726 (n = 5)		3.95
	713 (n = 9)		9.05

Таблиця 4. Значення REP за даними сенсора EO-1 «Hyperion» (14 вересня 2002 р.) та спектродіаметра ASD FieldSpec®3F (16 вересня 2009 р.) для спектрів вибраних класів наземного покриття на тест-ділянці

Тип покриття	REP, нм		
	ASD FieldSpec® 3F	EO-1 «Hyperion»	
		атмосферно некориговані дані	атмосферно кориговані дані
Трибуна стадіону «Динамо»	732.98	731—745.8	732.1—737.4
Трав'яний покрив стадіону «Динамо»	722.05	725.5—726.5	720.1—723.4

обчислені методом чотириточкової лінійної інтерполяції, причому різниця між ними перевищує 10 нм для спектрів відбиття як набережної Дніпра, так і трибун стадіону «Динамо».

Для зіставлення гіперспектральних даних наземної зйомки та космозйомки значення REP, обчислені методом чотириточкової лінійної інтерполяції, для спектрів відбиття трибун і трав'яного покриття стадіону (16 вересня 2009 р.) та діапазони значень REP, визначені при автоматизованій класифікації REP-зображень фрагмента тест-ділянки (рис. 3), побудованих за значеннями атмосферно некоригованих та коригованих даних [3] сенсора EO-1 «Hyperion» (14 вересня 2002 р.), наведено в табл. 4.

Видно, що класифікація трав'яного покриття за атмосферно коригованими даними точніша, ніж за некоригованими даними сенсора EO-1 «Hyperion». Підтвердженням цього факту є те,

що останні не узгоджуються з даними наземної зйомки [3].

Для техногенних споруд (трибуни стадіону) з наземними вимірюваннями узгоджуються як атмосферно кориговані, так і некориговані дані сенсора EO-1 «Hyperion».

ВИСНОВКИ

Встановлено, що величина REP для спектрів відбиття наземного покриття суттєво залежить від методу обчислень. Так, у методі поліноміальної апроксимації спектральних коефіцієнтів відбиття пірию за даними наземної зйомки величина REP суттєво залежить від степеня апроксимаційного полінома. Зіставлення значень REP спектрів пірию, обчислених методом чотириточкової лінійної інтерполяції та поліноміальної апроксимації при використанні поліномів 5-го степеня показало оптимальність методу чотириточкової лінійної інтерполяції щодо часу обчислень та кількості вхідних даних, що має суттєве значення при попіксельному обчисленні значень REP для побудови REP-зображень за даними космознімання.

Використання атмосферно коригованих даних сенсора EO-1 «Hyperion» дає точніші значення REP для трав'яного покриття, ніж у випадку некоригованих даних.

1. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Класифікація земного покриття Карпат з використанням наземного хлорофільного індекса та позиції червоного краю за даними відеоспектрометра MERIS // Космічна наука і технологія. — 2006. — 12, № 5/6. — С. 10—14.
2. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Використання індексів червоного краю та водних індексів за гіперспектральними даними EO-1 «Hyperion» для класифікації земного покриття // Космічна наука і технологія. — 2008. — 14, № 3. — С. 55—68.
3. Лялько В. І., Шпортюк З. М., Сахацький О. І., Сибірцева О. М. Коригування впливу атмосфери на гіперспектральні дані сенсора EO-1 «Hyperion» при обчисленні позиції червоного краю // Космічна наука і технологія. — 2009. — 15, № 3. — С. 32—41.
4. Сахацький О. І., Сибірцева О. М., Шпортюк З. М. Формування зображень на основі розрахунків вегетаційних індексів червоного краю за даними ENVISAT MERIS // Шестая Украинская конференция по

- космическим исследованием: Сб. тез. — Евпатория, НЦУИКС, 3—10 сентября 2006. — Евпатория, 2006. — С. 124.
5. *Baret F., Jacquemoud S., Guyot G., Leprieux C.* Modeled analysis of the biophysical nature of spectral shifts and comparison with information content of broad bands // *Remote Sens. Environ.* — 1992. — **41**, N 2/3. — P. 133—142.
 6. *Buschmann C.* Fernerkundung von Pflanzen // *Naturwissenschaften.* — 1993. — **80**. — S. 439—453.
 7. *Buschmann C., Nagel E.* Reflexionsspektren von Blättern und Nadeln als Basis für die physiologische Beurteilung von Baumschaden. PEF-Report Nr. 90. Karlsruhe: Kernforschungszentrum, 1992. — 165 s.
 8. *Buschmann C., Nagel E.* In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for the remote sensing of vegetation // *Int. J. Remote Sens.* — 1993. — **14**. — P. 711—722.
 9. *Collins W., Chang S.-H., Raines G., et al.* Airborne biogeophysical mapping of hidden mineral deposits // *Economic Geol.* — 1983. — **4**, N 78. — P. 737—749.
 10. *Horler D.N.H., Dockray M., Barber J.* The red edge of plant leaf reflectance // *Int. J. Remote Sens.* — 1983. — **4**. — P. 273—288.
 11. *Pu R., Gong P., Biging G., Larrieu M. R.* Extraction of red edge optical parameters from Hyperion data for estimation of forest leaf area index // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* — 2003. — **41**, N 4. — P. 916—921.
 12. *Rock B. N., Hoshizaki T., Miller J. R.* Comparison of the in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline // *Remote Sens. Environ.* — 1988. — **24**. — P. 109—127.
 13. *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.
 14. *Zarco-Tejada P. J., Miller J. R.* Land cover mapping of BOREAS using red edge spectral parameters from CASI imagery // *J. Geophys. Res.* — 1999. — **104D**, N 22. — P. 27921—27933.

Надійшла до редакції 26.01.10

*V. I. Lyalko, Z. M. Shportjuk, A. I. Sakhatsky,
O. N. Sibirtseva, S. S. Dugin, V. V. Grigorenko*

COMPARISON OF SATELLITE AND GROUND-BASED HYPERSPECTRAL DATA FOR THE RED EDGE POSITION ESTIMATION

We compared hyperspectral data from EO-1 Hyperion and spectrometric data from the spectrometer ASD FieldSpec 3F to evaluate the Red Edge Position of reflectance spectra for different land cover types within the test area of the Mariinskyi park in Kyiv. The satellite EO-1 Hyperion image made on 14 September 2002 and ground-based ASD FieldSpec 3F measurements performed on 15 April 2009 and 16 September 2009 were used. A relationship between the *REP* value and calculation method and image processing level is deduced. The four-point linear interpolation method for *REP* calculation from the atmospheric-corrected satellite data gives the results which are closest to the data calculated with the use of ground-based measurements of grass canopy.