

УДК 528.835+855

М. О. Попов¹, С. А. Станкевич¹, Я. І. Зєлик², С. В. Шкляр¹, О. В. Семенів²

¹ Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України», Київ

² Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ

КАЛІБРУВАННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ СЕНСОРА БАГАТОСПЕКТРАЛЬНОЇ СУПУТНИКОВОЇ СИСТЕМИ «СІЧ-2» ЗА НАЗЕМНИМИ СПЕКТРОМЕТРИЧНИМИ ВИМІРЮВАННЯМИ: ПОПЕРЕДНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Викладено метод оцінювання спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» за результатами космічного знімання тестових об'єктів контрольно-калібрувального полігону. Запропоновано спеціальну параметризацію функцій спектральної чутливості сенсора багатоспектральної знімальної системи, яка дозволяє розв'язати систему рівнянь переносу оптичного випромінювання аналітично. Наведено попередні результати калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» за реальними знімками та наземними спектрометричними вимірюваннями.

ВСТУП

Супутникові методи вимірювань є найбільш ефективними для досліджень земних утворень у регіональному та глобальному масштабах. Потреби вирішення більшості тематичних задач дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) пред'являють усе більш жорсткі вимоги до точності супутникових вимірювань [1], тому оператори супутникових систем спостереження Землі постійно вдосконалюють методи їхнього калібрування.

Застосування багатоспектральних супутникових систем дозволяє одержувати додаткову інформацію про склад і властивості об'єктів земної поверхні. Проте спектральні супутникові вимірювання вимагають точних фізичних основ і надійної технічної бази, що досягається шляхом спектрального калібрування сенсорів. Задачею спектрального калібрування сенсора

є визначення функції спектральної чутливості фотоприймального пристрою у кожному спектральному діапазоні багатоспектральної знімальної системи.

ЗАДАЧА ТА МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ

Спектральна чутливість визначається експериментально в лабораторних умовах перед запуском багатоспектральної супутникової системи шляхом зіставлення вихідного сигналу фотоприймального пристрою при надходженні стандартних вхідних сигналів з відомими спектральними розподілами оптичного випромінювання [2]. Спектральна чутливість нормується відносно свого максимуму і позначається $S(\lambda)$.

В умовах практичного застосування супутникової системи ДЗЗ спектральні характеристики її сенсора можуть відрізнятися від лабораторно виміряних, тому вони мають періодично оцінюватися у польоті. Такі оцінки базуються, з одного боку, на теоретичних моделях поширення електромагнітного випромінювання, а з іншого — на

© М. О. ПОПОВ, С. А. СТАНКЕВИЧ, Я. І. ЗЄЛИК,
С. В. ШКЛЯР, О. В. СЕМЕНІВ, 2012

обробці одержуваних зображень спеціально визначених наземних тестових об'єктів.

Спектральна чутливість сенсора багатоспектральної системи використовується для обчислення спектральної енергетичної яскравості оптичного випромінювання L_j в робочому спектральному діапазоні [5]:

$$L_j = \int_0^{\infty} L(\lambda) S_j(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

де $L(\lambda)$ — спектральна густина енергетичної яскравості оптичного випромінювання на вході фотоприймального пристрою, Вт/(м²мкм·ср), j — номер спектрального діапазону.

Без знання спектральної чутливості сенсора неможливо здійснювати радіометричне калібрування та радіометричну корекцію зображень багатоспектральної супутникової системи.

В загальному випадку визначення спектральної чутливості сенсора оптико-електронної знімальної апаратури за результатами тестового знімання об'єкта навіть з точно відомою спектральною відбивною здатністю є математично некоректною задачею [4]. Справді, нехай знімальна система має нормовану спектральну чутливість $S_j(\lambda)$ у спектральному діапазоні j . Якщо на поверхні i -го об'єкта зйомки забезпечується спектральна густина енергетичної опроміненості $E_0(\lambda)$, то спектральна яскравість зареєстрованого оптичного сигналу (1) складе

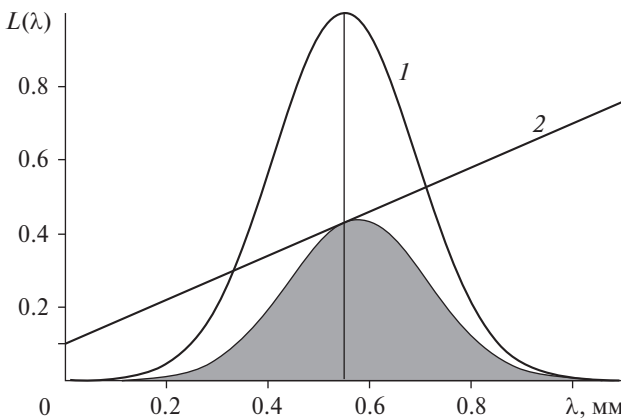


Рис. 1. До параметризації спектральних характеристик багатоспектральної знімальної системи: 1 — залежність (4), 2 — залежність (5)

$$L_{ij} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} E_0(\lambda) \rho_i(\lambda) \tau(\lambda) S_j(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

де $\rho_i(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт відбиття об'єкта зйомки, $\tau(\lambda)$ — спектральний коефіцієнт пропускання атмосфери. Оскільки реальна ширина робочих спектральних діапазонів сенсора багатоспектральної знімальної системи не дуже

велика, то спектральну енергетичну опроміненість

$$E_j = \frac{1}{\Delta\lambda_j} \int_{\lambda_j} E_0(\lambda) d\lambda$$
 та спектральне пропускання

$$\text{атмосфери } \tau_j = \frac{1}{\Delta\lambda_j} \int_{\lambda_j} \tau(\lambda) d\lambda$$
 у першому набли-

женні можна вважати постійними. Тоді

$$L_{ij} = \frac{\tau_j E_j}{\pi} \int_0^{\infty} \rho_i(\lambda) S_j(\lambda) d\lambda. \quad (3)$$

Для відомого $\rho_i(\lambda)$ із (3) неможливо відновити довільну функцію $S_j(\lambda)$ за виміряними значеннями L_{ij} . Для розв'язання цієї некоректної задачі пропонується застосовувати параметризацію функцій $S_j(\lambda)$ і $\rho_i(\lambda)$. При вдалому підборі їхнього вигляду рівняння (3) можна розв'язати аналітично. Зокрема, спектральну чутливість можна апроксимувати гауссіаною з параметрами k_j , λ_j та σ_j :

$$S_j(\lambda) = k_j \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_j)^2}{2\sigma_j^2} \right]. \quad (4)$$

Якщо підібрати об'єкти зйомки з лінійними спектральними характеристиками у всьому робочому спектральному діапазоні (рис. 1):

$$\rho_i(\lambda) = a_{ij}\lambda + b_{ij}, \quad (5)$$

де a_{ij} та b_{ij} — постійні коефіцієнти, то з урахуванням виразу

$$\begin{aligned} & \int_0^{\infty} \rho_i(\lambda) S_j(\lambda) d\lambda \approx \\ & \approx k_j \int_{-\infty}^{\infty} (a_{ij}\lambda + b_{ij}) \exp \left[-\frac{(\lambda - \lambda_j)^2}{2\sigma_j^2} \right] d\lambda = \\ & = \sqrt{2\pi} k_j \sigma_j (a_{ij}\lambda_j + b_{ij}) \end{aligned} \quad (6)$$

параметри гауссіани k_j , σ_j та λ_j можна знайти методом найменших квадратів. Мінімізуємо суму квадратів нев'язок:

$$\sum_{i=1}^n \left[\sqrt{2\pi} k_j \sigma_j (a_{ij}\lambda_j + b_{ij}) - \frac{\pi L_{ij}}{E_j \tau_j} \right]^2 \rightarrow \min. \quad (7)$$

Оцінка параметрів задовольняє системі рівнянь

$$\sum_{i=1}^n \left(\sqrt{2\pi} k_j \sigma_j \lambda_j a_{ij} + \sqrt{2\pi} k_j \sigma_j b_{ij} - \frac{\pi L_{ij}}{E_j \tau_j} \right) a_{ij} = 0, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^n \left(\sqrt{2\pi} k_j \sigma_j \lambda_j a_{ij} + \sqrt{2\pi} k_j \sigma_j b_{ij} - \frac{\pi L_{ij}}{E_j \tau_j} \right) b_{ij} = 0.$$

Система (8) має розв'язок

$$\begin{pmatrix} k_j \sigma_j \\ k_j \sigma_j \lambda_j \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n b_{ij}^2 & \sum_{i=1}^n a_{ij} b_{ij} \\ \sum_{i=1}^n a_{ij} b_{ij} & \sum_{i=1}^n a_{ij}^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n b_{ij} \frac{\pi L_{ij}}{E_j \tau_j} \\ \sum_{i=1}^n a_{ij} \frac{\pi L_{ij}}{E_j \tau_j} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Якщо коефіцієнт k_j невідомий, то параметр σ_j не ідентифікований, ідентифікований лише добуток $k_j \sigma_j$.

Прикладами природних і штучних покриттів, спектри яких приблизно лінійні у межах окремих спектральних діапазонів багатоспектральної знімальної системи «Січ-2» в діапазоні 0.5–1.7 мкм, є відкритий ґрунт, пісок, асфальт, бетон, скло, суха рослинність, оброблене дерево, нефарбований алюміній, свіжий сніг, лід, чиста вода [9].



а

РЕЗУЛЬТАТИ КАЛІБРУВАННЯ

СПЕКТРАЛЬНОЇ ЧУТЛИВОСТІ СЕНСОРА «СІЧ-2»

Викладений метод перевірявся на реальних багатоспектральних супутникових знімках території підсупутникового калібрувального полігону Національного центру управління та випробування космічних засобів (НЦУВКЗ), с. Вітине, АР Крим, одержаних 8 листопада 2011 р. супутниковою системою «Січ-2» (рис. 2).



Рис. 2. Багатоспектральне супутникове зображення «Січ-2» Вітине – Молочне, АР Крим, 08.11.2011, просторова розрізненість 7.8 м, спектральні діапазони 2 (0.61–0.68 мкм), 3 (0.79–0.89 мкм), 1 (0.50–0.59 мкм)



б

Рис. 3. Схема розташування тестових об'єктів на території НЦУВКЗ: а — майданчик № 1, б — майданчик № 3



Рис. 4. Проведення спектрометричних вимірювань у чаші антени радіотелескопа РТ-70

Для калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної системи «Січ-2» використовувались дані наземних спектрометричних вимірювань об'єктів НЦУВКЗ, що проводились синхронно із супутниковою зйомкою. Як тестові обиралися природні та штучні об'єкти робочих майданчиків № 1 і № 3 НЦКВУЗ з великими відносно гомогенними поверхнями. На рис. 3 показано розташування тестових об'єктів на території НЦУВКЗ.

Для вимірювань спектральних характеристик відбиття вибраних об'єктів на території НЦУВКЗ (рис. 4) використовувався польовий цифровий

спектрометр ASP-100F з такими технічними характеристиками:

- спектральний діапазон $\lambda = 0.19\text{—}1.1$ мкм,
- спектральна розрізненість $\Delta\lambda = 0.05\text{—}1.35$ нм,
- розрядність кодування сигналу 12 біт.

Для якісного контролю реального положення точок вимірювань і подальшої їхньої геоприв'язки до знімків «Січ-2» використовувався приймач GPS.

Перелік тестових об'єктів, що залучалися до спектрального калібрування сенсорів супутникової системи «Січ-2», представлено у табл. 1.

Відновлення коефіцієнта спектрального відбиття $\rho_0(\lambda)$ тестових об'єктів за матеріалами космічного знімання потребує додаткового фізичного моделювання розповсюдження оптичного випромінювання [10]:

$$\rho_0(\lambda) = \frac{\pi L(\lambda)}{\tau(\lambda) \exp\left[\frac{\ln \tau(\lambda)}{\sin \theta}\right] E_0(\lambda) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)},$$

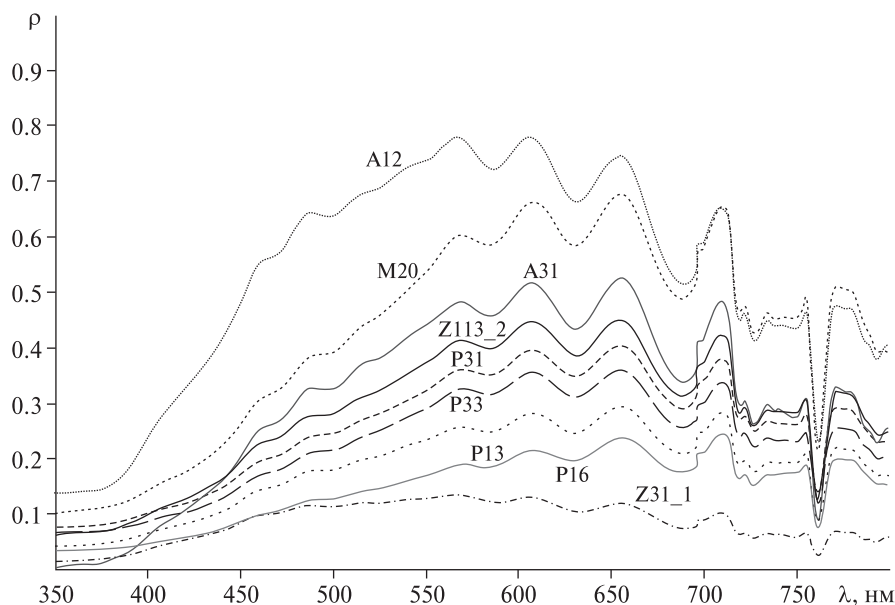
де φ — географічна широта, $\delta = 23.45^\circ \sin\left(2\pi \frac{284 + d}{365}\right)$ — кутове схилення Сонця в день зйомки, d — порядковий номер дня зйомки в році, t — місцевий час зйомки у годинах, θ — кутова висота Сонця над горизонтом під час зйомки, яка знаходиться з відомої формули [11]

$$\sin \theta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos\left(\pi \frac{13 - t}{12}\right),$$

Таблиця 1. Характеристики тестових об'єктів зйомки багатоспектральної супутникової системи «Січ-2»

№	Код	Найменування	L_1 , (0.50—0.59 мкм), Вт/(м ² мкм·ср)	L_2 , (0.61—0.68 мкм), Вт/(м ² мкм·ср)	L_3 , (0.79—0.89 мкм), Вт/(м ² мкм·ср)
1	P16	Стадіон	5.33	8.17	6.08
2	P13	Плац	11.49	15.79	9.40
3	Z113_2	Дах клубу	7.26	10.19	6.66
4	A12	Антенний комплекс АДУ-1000	22.81	26.70	14.52
5	A31	Чаша радіотелескопа РТ-70	13.33	17.93	9.66
6	P33	Бетонний майданчик	8.97	12.67	7.55
7	P31	Асфальтовий майданчик	10.04	14.19	8.62
8	Z31_1	Дах апаратного корпусу	3.95	4.29	2.06
9	M20	Солончаковий берег озера	16.52	23.81	15.00

Рис. 5. Спектральні характеристики тестових об'єктів на території НЦУВКЗ (позначення згідно з табл. 1)



Спектр оптичного випромінювання об'єктів земної поверхні складається зі спектрів відбитого сонячного випромінювання та власного теплового випромінювання і описується законом Планка [3]:

$$E_0(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc\lambda_*}{k b \lambda}\right) - 1 \right)} \left(\frac{R_*}{D_*} \right)^2 + \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{k \lambda T_0}\right) - 1 \right)},$$

де $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ Вт · с² — стала Планка, $c = 3 \times 10^5$ км/с — швидкість світла у вакуумі, $k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — стала Больцмана, $\lambda_* = 0.47$ мкм — довжина хвилі максимуму сонячного випромінювання, $b = 2898$ мкм · К — стала Віна, $R_* = 6.96 \cdot 10^5$ км — радіус Сонця, $D_* = 1.5 \times 10^8$ км —

середня відстань від Сонця до Землі, T_0 , К — власна температура об'єкта земної поверхні.

Спектрометричні вимірювання для кожного об'єкта здійснювались не менше ніж у п'яти точках. У свою чергу, у кожній точці виконувалося не менше п'яти вимірювань. Одержані усереднені за точками вимірювань залежності спектрального відбиття тестових об'єктів від довжини хвилі показано на рис. 5.

Одержані спектральні характеристики (рис. 5) лінеаризовано за методом найменших квадратів у межах кожного спектрального діапазону багатоспектральної знімальної системи «Січ-2». На рис. 6 показано приклади лінеаризації відповідних фрагментів спектрів відбиття тестових об'єктів.

Далі з виразу (9) розраховувались параметри апроксимаційних гауссіан $\{\lambda_j, k_j, \sigma_j\}$ для кожного спектрального діапазону сенсора «Січ-2». За їхніми значеннями можна визначити межі спект-

Таблиця 2. Параметри апроксимаційних гауссіан спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2»

Спектральний діапазон	Номінальне $\Delta\lambda$, нм	τ	L_0 , Вт/(м ² мкм · ср)	λ_j , нм	$FWHM$, нм
1	500—590	0.897	36.463	425.80—646.28	48.18—204.56
2	610—680	0.932	42.544	666.49—754.15	58.93—64.52
3	790—890	0.955	34.221	661.17—1100.72	65.97—115.37

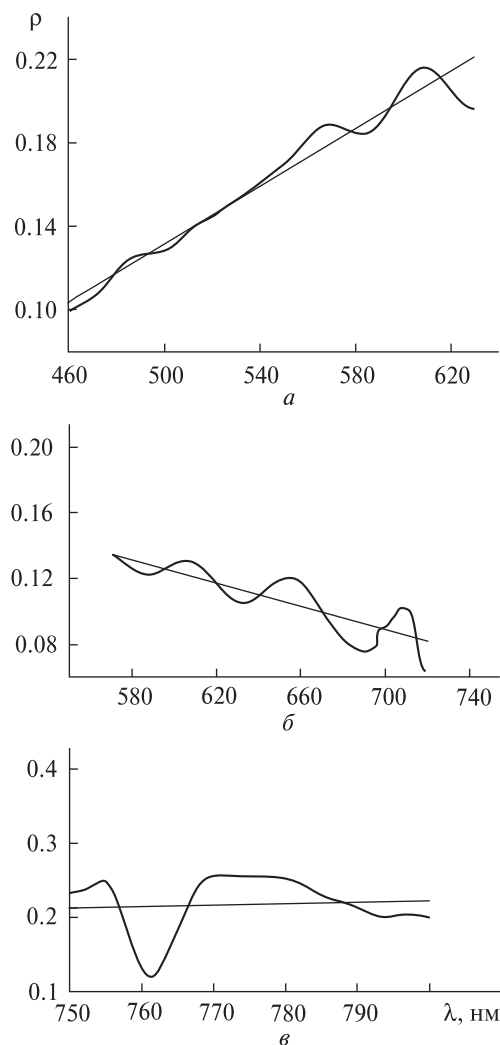


Рис. 6. Лінеаризовані спектральні характеристики тестових об'єктів багатоспектральної знімальної системи «Січ-2»: *a* — стадіон, спектральний діапазон 1 (0.50—0.59 мкм), *б* — дах апаратного корпусу, спектральний діапазон 2 (0.61—0.68 мкм), *в* — бетонний майданчик, спектральний діапазон 3 (0.79—0.89 мкм)

рального діапазону реєстрації по заданому рівню $p \in [0, 1]$ як

$$\Delta\lambda_j(p) = \lambda_j \pm \sigma_j \sqrt{-2 \ln p}.$$

Зазвичай використовується величина $FWHM$ — ширина спектрального діапазону на рівні $p = 0.5$.

Попередні результати оцінювання спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» свідчать про недостатню стабільність вимірювань. Так, значення

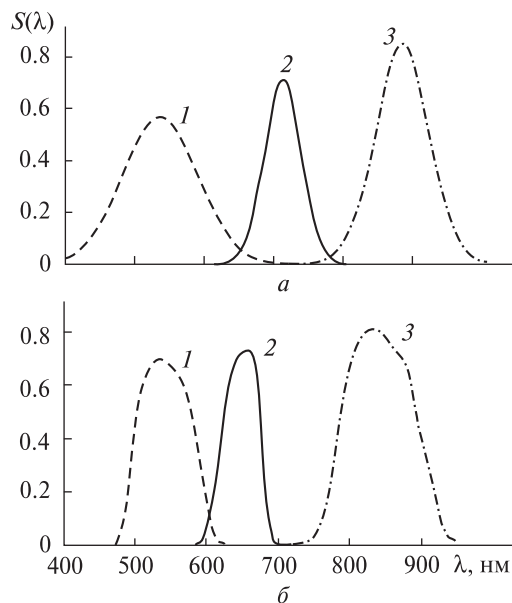


Рис. 7. Апроксимовані (*a*) та лабораторні (*б*) спектральні чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2»

центральної довжини хвилі інколи виходять за межі номінальних спектральних діапазонів сенсора, а величини параметрів суттєво залежать від складу тестових об'єктів, використаного для їхньої оцінки. Це може пояснюватися похибками наземних спектрометричних вимірювань, відхиленнями фактичних параметрів атмосфери над об'єктами зйомки від розрахункових та нелінійністю передавальних характеристик сенсора. Водночас статистично усереднені параметри апроксимаційних гауссіан досить добре узгоджуються з очікуваними: виявлено систематичне зміщення центральної довжини хвилі на 5—10 % у короткохвильову область спектру та систематичне звуження ширини спектрального діапазону на 10—40 %. Визначені за зображеннями тестових об'єктів на космічному знімку рис. 2 параметри спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» зведено до табл. 2.

Одержані результати ілюструються рис. 7, *a*. Для порівняння на рис. 7, *б* наведено лабораторні спектральні характеристики робочих діапазонів багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» [7].

ВИСНОВКИ

Аналіз результатів апроксимації свідчить про важливість ретельного підбору тестових об'єктів для спектрального калібрування сенсорів багатоспектральних знімальних систем, що підтверджується також даними [8]. При відборі тестових об'єктів слід керуватися не тільки стабільністю їхніх спектральних характеристик, але й ще їхнього несхожистю. Так, залучення тестових об'єктів з подібними розподілами спектрального відбиття надає гірші результати апроксимації, ніж залучення тестових об'єктів зі спектральними характеристиками, що суттєво відрізняються. Запропонована модель параметризації не є єдино можливою. Наприклад, можна розглянуті варіанти апроксимації функцій спектральної чутливості $S_i(\lambda)$ прямокутним сегментом або трапецією. Сучасні чисельні методи дозволяють розв'язувати системи інтегральних рівнянь виду (2) навіть у тому разі, якщо інтеграли не можна обчислити аналітично.

Повномасштабне калібрування має проводитися на основі більш точних та репрезентативних спектрометричних вимірювань на тестових об'єктах контрольно-калібрувального полігону та передбачати статистичну оцінку точності за результатами обробки значної кількості космічних знімків.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на створення бібліотек спектральних характеристик тестових об'єктів за даними прецизійного наземного спектрометрування та розробку автоматизованої методики спектрального калібрування багатоспектральних супутникових систем ДЗЗ [6].

1. *Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування* / За ред. В. І. Лялька, М. О. Попова. — Київ: Наук. думка, 2006. — 360 с.
2. *Ваваев В. А., Василейский А. С., Жуков Б. С. и др. Наземная калибровка камер КМСС для КА «Метеор-М» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* — 2009. — 6, № 1. — С. 251—258.
3. *Крикунев Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники.* — М.: Сов. радио, 1978. — 400 с.

4. *Станкевич С. А. Выявления дополнительных распознавательных признаков объектов за результатами багатозонального дистанційного спостереження в інфрачервоному спектральному діапазоні // Тр. академії.* — 1999. — Вип. 23. — С. 92—99.
5. *Станкевич С. А. Информативность оптических диапазонов дистанционного наблюдения Земли из космоса: практические алгоритмы // Космична наука і технологія.* — 2008. — 14, № 2. — С. 22—27.
6. *Станкевич С. А., Титаренко О. В., Шкляр С. В. Эффективна обробка даних польового спектрометрування в природоресурсних задачах // Доп. НАН України.* — 2010. — № 12. — С. 110—115.
7. *Тягун В. М., Лихоліт М. І., Колобродов В. Г. Оптичні системи космічних багатоспектральних сканерів // Наук. вісті НТУУ «КПІ».* — 2006. — № 6. — С. 125—132.
8. *Biggar S. F., Slater P. N., Gellman D. I. Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4—1.1 μm range // Remote Sens. Environ.* — 1994. — 48, N 2. — P. 245—252.
9. *Clark R. N., Swayze G. A., Wise R., et al. USGS digital spectral library splib06a / USGS Digital Data Series 231,* 2007. — 1254 p.
10. *Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing.* — San Diego: Academic Press, 2007. — 560 p.
11. *Staenz K., Secker J., Gao B.-C., et al. Radiative transfer codes applied to hyperspectral data for the retrieval of surface reflectance // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens.* — 2002. — 57, N 3. — P. 194—203.

Надійшла до редакції 23.04.12

*M. A. Popov, S. A. Stankevich, Ya. I. Zelyk,
S. V. Shklyar, O. V. Semenov*

SENSOR SPECTRAL RESPONSE CALIBRATION OF THE «SICH-2» MULTISPECTRAL SATELLITE SYSTEM FROM GROUND-BASED SPECTROMETRY MEASUREMENTS: PRELIMINARY RESULTS

We present a method for the sensor spectral response calibration of the «Sich-2» multispectral satellite system on the basis of satellite imaging for ground calibration test sites. A special parameterization of spectral response functions of the multispectral sensor is proposed. The parameterization allows one to solve analytically a system of equations for optical radiation transfer. We discuss our preliminary results for the sensor spectral response calibration of the «Sich-2» multispectral satellite system which are obtained from actual imagery and ground spectrometry measurements.