

УДК 004.65, 004.67

Р. М. Басараб^{1,2}

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

МЕТОД КРОС-КАЛІБРУВАННЯ ДАНИХ КОСМІЧНОГО АПАРАТА «СІЧ-2»

Запропоновано модель радіометричної корекції даних КА «Січ-2». Проведено аналіз точності моделі для даних вихідних знімків КА «Січ-2» та «Ландсат-5ТМ». Визначено актуальні проблеми та запропоновано шляхи їхнього вирішення.

ВСТУП

Значення коефіцієнтів відбиття сонячного випромінювання поверхнею Землі та значення спектральної яскравості, отримані за допомогою космічних систем, є дуже важливим джерелом інформації для розв'язання тематичних задач обробки супутникових знімків [6, 9–12, 15]. Особливу цінність становить інформація, отримана від космічних апаратів високого просторового розрізнення з абсолютною радіометричною похибкою, що не перевершує кілька відсотків. Тому забезпечення калібрування сенсорів та даних є актуальною задачею для всіх космічних апаратів, зокрема українського апарата «Січ-2».

Для кожного космічного апарата в лабораторних умовах розробляються відповідні моделі (перетворення) для радіометричної корекції отриманих даних. Проте після запуску космічного апарата ці перетворення потребують уточнення внаслідок деградації сенсорів. Деградація сенсорів відбувається з кількох причин: зміна відгуку інструмента з моменту його виведення на орбіту, застаріння бортової апаратури [5] тощо. Отже, в залежності від особливостей сенсора він повинен постійно recalібуватися в умовах польоту. У деяких випадках цю процедуру необхідно проводити кілька разів за секунду, в інших — щотижня, щомісяця або й рідше [5].

З метою уточнення параметрів перетворення для радіометричної корекції супутникових зо-

бражень використовують інформацію, отриману сенсором з наземних калібрувальних полігонів. Спектральні характеристики об'єктів, розміщених на таких полігонах, є наперед відомими.

Інший підхід до радіометричної корекції даних полягає у крос-калібруванні даних одного супутника на основі відкаліброваних даних іншого. Один з подібних підходів описаний в роботі [4], де на основі перехресного порівняння даних сенсора AWiFS індійського КА IRS-P6 з даними супутників «Ландсат-5ТМ», «Ландсат-7ETM+» та MODIS побудовано відповідні моделі лінійної регресії. Дослідження [4] показують, що дані, отримані сенсором AWiFS, можуть бути крос-калібровані до сенсора «Ландсат-5ТМ» з точністю до 13 %, «Ландсат-7ETM+» — у межах 15 %, а MODIS — у межах 21 % без врахування спектральної невідповідності атмосфери.

В даній роботі пропонується метод крос-калібрування даних «Січ-2» за радіометрично скоригованими даними супутника «Ландсат-5ТМ».

РІЗНІ ПІДХОДИ ДО КАЛІБРУВАННЯ ТА РАДІОМЕТРИЧНОЇ КОРЕКЦІЇ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Оскільки зображення, отримані від супутників, подаються у вигляді так званих «сирих значень» спектральної яскравості (Digital Number), завдання радіометричного калібрування полягає у приведенні цих значень до фізичних одиниць: спектральної яскравості, або показчиків відбиття сонячної радіації поверхнею Землі. В

роботі [2] представлено моделі для калібрування даних, отриманих сенсорами Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) та Advanced Land Imager (ALI). Ці моделі враховують структуру сенсорів та специфіку їхньої роботи до запуску космічних апаратів на орбіту. Такі перетворення цифрових значень зображень створюють базу для стандартизації супутникових даних, що слугує основою для порівняння супутникової інформації, отриманої від різних сенсорів про деяку відзняту сцену за різні періоди часу.

Для обробки інформації супутникових датчиків кольорів океану SeaWiFS та MODIS розроблено систему орбітального калібрування даних [3]. Дана система калібрування включає в себе набір коефіцієнтів підсилення, які застосовуються до спостережуваної сонячної радіації, що фіксувалася у верхніх шарах атмосфери. У поєднанні з процесом атмосферної корекції це дає можливість відтворити очікувані показники відбиття сонячної радіації води та структуру поверхні океану. Такий підхід до орбітального калібрування даних є незалежним від інтенсивності джерела випромінювання та значно підвищує якість інформації щодо структури поверхні води. Але ця методика нерозривно пов'язана з алгоритмом атмосферної корекції та призначена виключно для приладів розглянутих сенсорів.

Для калібрування інформації, представленої мультиспектральними сенсорами, чи сенсорами, які детектують видиме та ближнє інфрачервоне випромінювання, ефективним є підхід відбору зображень космічних апаратів, відзнятих одночасно, в надир, над однією і тією ж ділянкою поверхні Землі. В цьому полягає так званий SNO-метод (simultaneous nadir overpass), який було описано в роботі [22] і застосовано для крос-калібрування даних супутників NOAA-16/AVHRR, NOAA-17/AVHRR та AQUA/MODIS. Згідно з ним різниця калібрівки відповідних спектральних каналів, отриманих за допомогою пари сенсорів, визначається з отриманих зображень, відзнятих майже в один і той же час з аналогічним цільовим виглядом Землі. Однак важливо зазначити, що при такому підході необхідно провадити корекцію супутникових даних, що залежатиме від особливос-

тей сенсора та типу підстильної поверхні Землі. Для робастності отриманих моделей калібрування дослідження необхідно проводити для певного набору пар зображень, отриманих за допомогою відповідних сенсорів, оскільки на зображеннях можуть бути наявними різні типи поверхонь з різними спектральними характеристиками. Застосування даної методики для калібрування даних «Січ-2» було б доцільним, але є ряд проблем. По-перше, відносно малу кількість зображень «Січ-2» було відзнято в надир, по-друге, постає проблема у відшуканні еталонних зображень космічних апаратів з подібним сканувальним приладом та їхніх зображень, які були б одночасно з зображеннями «Січ-2» відзняті в надир.

Для даних «Ландсат-5ТМ» та «Ландсат-7ЕТМ+» розроблено метод спектральної та атмосферної корекції для оцінювання поверхні альbedo [20] (характеристика відбивальної (розсіювальної) здатності поверхні) з використанням методу атмосферного коригування (атмосферного коду) 6S [16]. Останній є фізично обґрунтованою моделлю, не оптимізованою для специфічних супутникових сцен, тестових об'єктів чи конкретних ландшафтів. Його розроблено для внесення атмосферної поправки до даних короткохвильового діапазону.

Інший можливий підхід до крос-калібрування наборів даних від двох (чи більше) супутників полягає в усередненні (нормалізації) інформації, отриманої протягом тривалого періоду часу, або з великих територій поверхні Землі. Найчастіше така методика застосовується до даних, які вже є територіально усередненими, наприклад для аналізу кліматичних тенденцій. При такому підході (як і для всіх інших методів крос-калібрування), необхідно враховувати особливості кожного з розглянутих інструментів. Зокрема, всі зміни в підстильній поверхні Землі, зміни кутів проведення зйомки, а також зміна кута падіння сонячного випромінювання в результаті можуть нести значний вплив на результат калібрування даних [13, 14, 21].

Часто виникає потреба у зіставленні і порівнянні даних супутників, які фізично не можуть проводити зйомку деякої ділянки поверхні Землі в один і той же час. Чи орбіти, по яких рухаються супутники, не мають сполучень, чи ці супутники взагалі не працювали протягом одного і того



Рис. 1. Схема процесу отримання та обробки даних «Січ-2» і еталонних даних «Ландсат-5ТМ»

ж періоду часу. В деяких випадках використовують так звані «двоїсто різницеви методи» [18], в яких дані кожного з розглядуваних супутників порівнюються з даними третього супутника, які в свою чергу використовуються як трансфер для подолання розриву.

Відомий ще один можливий метод калібрування супутникових даних, який не пов'язаний з бортовою системою космічного апарата. Так званий підхід до непрямого калібрування, що здійснює оцінку спектральної яскравості, отриманої датчиком супутника над конкретним наземним тестовим полігоном, з урахуванням наземних спектральних вимірювань [17, 19]. Дана методика має відносно високу точність (хоча і нижчу, ніж при лабораторних дослідженнях), але вима-

гає проведення польових наземних досліджень, котрі потребують значних матеріальних затрат і є надзвичайно трудомісткими.

17 серпня 2011 р. Україна запустила власний КА ДЗЗ «Січ-2». Оскільки для супутника «Січ-2» не передбачений механізм калібрування сенсорів під час польоту, виникає потреба у створенні методів та алгоритмів калібрування супутникових даних, що дозволили б відповідним чином зводити вихідну геопросторову інформацію, надану БСП КА «Січ-2», до реальних значень відбитої сонячної радіації.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ЗАПРОПОНОВАНИЙ МЕТОД КАЛІБРУВАННЯ ДАНИХ «СІЧ-2»

Космічний апарат ДЗЗ «Січ-2» створено для спостереження за поверхнею Землі в оптичному та середньому інфрачервоному діапазонах. Його цифрові оптико-електронні знімки поверхні Землі включають інформацію з панхроматичного каналу (довжина хвилі $\lambda = 0.51...0.90$ мкм), каналів з червоної та зеленої областей спектру оптичного діапазону ($\lambda = 0.51...0.59$ мкм і $0.61...0.68$ мкм), а також каналу ближнього ІЧ-діапазону ($\lambda = 0.80...0.89$ мкм).

Оскільки для даних КА ДЗЗ «Січ-2» не передбачено процедури калібрування сенсорів під час польоту, а пряме застосування відомих методів калібрування даних, розроблених для інших сенсорів, неможливе у зв'язку з відсутністю моделі атмосферної корекції, доцільною є задача розробки методу радіометричної корекції даних на основі відкаліброваних даних інших сенсорів.

Саме цей підхід і пропонується застосувати для калібрування даних КА ДЗЗ «Січ-2» в нашій роботі. Як еталонні дані будемо використовувати відкалібровані дані супутника «Ландсат-5ТМ», оскільки задекларовані характеристики сенсора цього апарата є найбільш близькими до характеристик українського апарата «Січ-2».

Основна гіпотеза, покладена в основу запропонованого методу, така. Якщо ми маємо знімки з двох космічних сенсорів з близькими характеристиками для однієї території, отримані в один і той же момент часу, то можна побудувати регресійну модель залежності некаліброваних значень одного апарата від коефіцієнтів відбиття

земної поверхні, отриманих з відкаліброваного сенсора іншого апарата.

Метою дослідження є створення інформаційної технології калібрування даних КА ДЗЗ «Січ-2» на основі даних «Ландсат-5ТМ». Для досягнення цієї мети, перш за все, необхідно розробити регресійні моделі залежності значень даних в кожному з каналів КА ДЗЗ «Січ-2» від даних відповідних каналів «Ландсат-5ТМ» та проаналізувати адекватність таких моделей. Для крос-калібрування даних пропонується використовувати алгоритм, схему якого показано на рис. 1.

Отримавши необхідні еталонні дані «Ландсат-5ТМ» у вигляді набору цифрових значень (digital numbers) спектральної яскравості, проводимо процес атмосферної корекції. В результаті отримуємо дані «Ландсат-5ТМ», представлені у вигляді цифрових значень коефіцієнтів відбиття r сонячної радіації поверхнею Землі, що слугуватимуть нам еталоном для крос-калібрування даних «Січ-2». Дані «Січ-2» представлено у вигляді набору цифрових значень спектральної яскравості, отримані за допомогою багатозонального сканувального пристрою. Змінивши методом найближчого сусіда розміри пікселя на зображенні «Січ-2» з 7.5 до 30 м (для відповідності розмірам пікселя на еталонному зображенні), цифрову інформацію відповідних спектрів зображень зіставляємо з метою визначення залежності та отримання відповідних моделей лінійної регресії для кожного із трьох спектральних каналів. Далі відбувається оцінка отриманих моделей та безпосередньо процес крос-калібрування даних «Січ-2» до коефіцієнтів r , взятих із зображення «Ландсат-5ТМ».

РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ

За вхідні дані візьмемо зображення «Січ-2» від 9 вересня 2011 р. Вибір зображення визначається його хорошою якістю та наявністю знімка апарата «Ландсат-5ТМ» для цієї ж території, отриманого в триденному часовому околі (6 вересня 2011 р.). Розмір зображення становить 10979×20710 пкл. На зображенні відзнято Дніпропетровську область та прилеглі території. За еталонні дані взято знімок «Ландсат-5ТМ» від 6 вересня 2011 р., що територіально містить в собі зображен-

ня «Січ-2». Для задачі калібрування значень каналів супутникового зображення дуже важливим є дотримання найменшого можливого проміжку часу, що проходить між зйомкою еталонного та оброблюваного зображень, оскільки протягом тривалого періоду часу відбувається зміна структури і покриття відзнятої поверхні (збір врожаю з земельної ділянки, оранка тощо). Це відповідним чином змінить значення цифрової інформації і збільшить похибку калібрування даних.

Для еталонного зображення проведено атмосферну корекцію за допомогою алгоритму [8], розробленого NASA. Таким чином вдалося мінімізувати вплив атмосфери на цифрову інформацію знімка «Ландсат-5ТМ». Для даних «Січ-2» було проведено зміну роздільної здатності (зміна розмірів пікселя) з 8 до 30 м з використанням методу найближчого сусіда. Таким чином, розміри пікселів стали однаковими для вихідного зображення та еталону. Цифрова інформація продукту обробки супутникового зображення «Ландсат-5ТМ» (результату атмосферної корекції) змінюється в діапазоні від 0 до 10000. Цифрова інформація супутникового зображення «Січ-2» змінюється від 0 до 255.

Після попиксельного зіставлення цифрових значень f_i ($i = 1, \dots, n$, де n — кількість пікселів зображення) на основі обчислення корелятивних зв'язків були отримані відповідні лінійні моделі регресії.

На рис. 2 зображено попиксельну корелятивну залежність між значеннями f_{SGi} , отриманими в «зеленому» спектральному діапазоні сенсора «Січ-2», та значеннями f_{Gi} , отриманими в «зеленому» каналі сенсора «Ландсат-5ТМ». Лінією

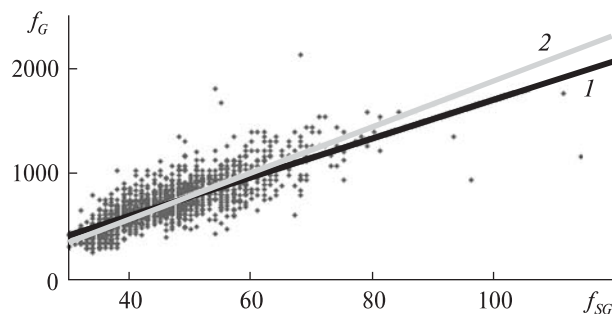


Рис. 2. Робастна модель лінійної регресії (лінія 2) для калібрування даних «зеленого» спектрального діапазону електромагнітного випромінювання, в порівнянні з моделлю звичайної лінійної регресії (лінія 1)

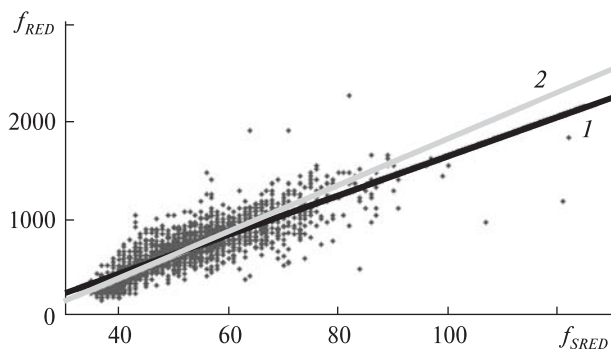


Рис. 3. Робастна модель лінійної регресії (лінія 2) для калібрування даних «червоного» спектрального діапазону електромагнітного випромінювання, в порівнянні з моделлю звичайної лінійної регресії (лінія 1)

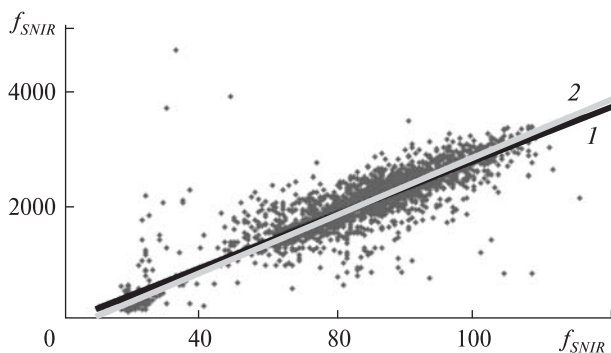


Рис. 4. Робастна модель лінійної регресії (лінія 2) для калібрування даних «ближнього інфрачервоного» спектрального діапазону електромагнітного випромінювання, в порівнянні з моделлю звичайної лінійної регресії (лінія 1)

1 зображено лінію регресії, що описується формулою

$$f_{Gi} = 18.4259 \cdot f_{SGi} - 141.3768.$$

Коефіцієнт детермінації моделі склав $R^2 = 0.6126$.

Формули лінійної регресії для перетворення значень червоного та ближнього інфрачервоного спектральних діапазонів (лінії 1 на рис. 3 і 4) мають вигляд

$$f_{REDi} = 20.2226 \cdot f_{SREDi} - 385.5724 \quad (R^2 = 0.6850),$$

$$f_{NIRi} = 23.6851 \cdot f_{SNIRi} - 44.3041 \quad (R^2 = 0.8456),$$

де f_{SREDi} , f_{SNIRi} — цифрові значення пікселів червоного та ближнього інфрачервоного спектральних діапазонів «Січ-2», f_{REDi} , f_{NIRi} — відповідні цифрові значення пікселів сенсора «Ландсат-5ТМ».

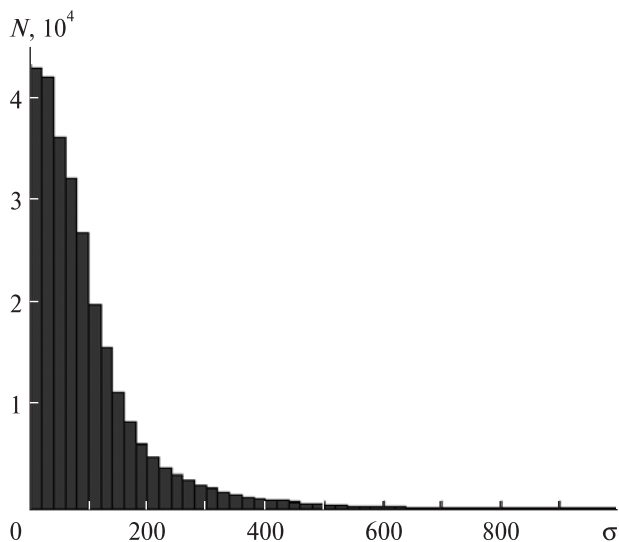


Рис. 5. Гістограми розподілу середніх квадратичних відхилень між цифровими значеннями базового та відкаліброваного зображень у червоному спектральному каналі

Оцінки точності калібрування, коефіцієнти детермінації звичайної та робастної лінійної регресії

Спектральний канал	Доля пікселів, %	σ	R^2	
			лінійна регресія	робастна лінійна регресія
Червоний	98.4167	0—450	0.6850	0.7856
Зелений	98.7533	0—400	0.6126	0.7271
Ближній ІЧ	98.9111	0—800	0.8456	0.9048

Найвища точність моделі калібрування виявилась для інфрачервоного діапазону. Це зумовлено тим, що ІЧ-випромінювання найменше піддається впливу атмосфери та атмосферних явищ.

На основі проведеного аналізу стало відомо, що більшість викидів на графіках відповідають пікселям хмар, та земельних ділянок, структура яких змінилася за період з 3 до 6 вересня 2011 р. Відносно малі значення коефіцієнтів детермінації для регресійних моделей обумовлені саме наявністю викидів в даних, які використовувалися для створення регресійних моделей.

Для зменшення впливу викидів даних при побудові моделі перетворення було використано модель *робастної* лінійної регресії [7] і отримано три рівняння лінійної робастної регресії для «зе-

леного», «червоного» та «ближнього інфрачервоного» каналів (лінії 2 на рис. 2—4):

$$f_{Gi}^{rob} = 21.7124 \cdot f_{SGi}^{rob} - 295.8985,$$

$$f_{REDi}^{rob} = 23.9312 \cdot f_{SREDi}^{rob} - 579.8963,$$

$$f_{NIRi}^{rob} = 25.3711 \cdot f_{SNIRi}^{rob} - 196.7462.$$

Отримані моделі калібрування були застосовані до зображення «Січ-2». Для того щоб обрахувати коефіцієнти детермінації робастних моделей лінійної регресії, спочатку було проведено аналіз отриманої за їхньою допомогою інформації. На рис. 5 приведено гістограму розподілу середніх квадратичних відхилень σ між базовим та відкаліброваним зображеннями у червоному каналі.

Середнє квадратичне відхилення σ між цифровими значеннями еталонних даних та даних «Січ-2», отриманих після коригування, містилося в відповідних діапазонах (див. таблицю) для наявних спектральних каналів. Для оцінки точності робастних моделей лінійної регресії було враховано в середньому тільки 98.5 % пікселів базового зображення «Ландсат-5ТМ» та відкаліброваного зображення «Січ-2». Решту 1.5 % даних становили так звані викиди (зміни стану земного покриття, зсунуті пікселі, засвічені пікселі тощо). Значення коефіцієнтів детермінації R^2 робастних моделей лінійної регресії також наведено у таблиці.

З отриманої вище інформації випливає, що модель робастної лінійної регресії є більш адекватною, особливо для інфрачервоного каналу. Без врахування пікселів викидів при створенні моделі регресії показники якості останньої виявилися значно кращими.

Беручи до уваги отримані результати, можна стверджувати, що цифрова інформація відкаліброваного зображення «Січ-2» відповідає показникам відбитої поверхнею Землі сонячної радіації на рівні такої відповідності зображень «Ландсат-5ТМ».

ВИСНОВКИ

У роботі представлено модель для радіометричного калібрування супутникових даних, що базується на крос-калібруванні даних космічної системи ДЗЗ «Січ-2» та даних «Ландсат-5ТМ». Модель

апробовано на знімку «Січ-2» Дніпропетровської області від 9 вересня 2011 р. За еталонні дані взято продукт атмосферної корекції зображення «Ландсат-5ТМ» від 6 вересня 2011 р.

В рамках даного експерименту досліджено лінійну залежність між цифровою інформацією супутникових даних КА «Січ-2» та «Ландсат-5ТМ». На основі цієї залежності створено лінійні регресійні моделі для калібрування даних «Січ-2». Експериментально визначено, що адекватність створених моделей, виражена показником коефіцієнтів детермінації, для калібрування даних «Січ-2» становить 61, 69 та 85 % відповідно для «червоного», «зеленого» та «ближнього інфрачервоного» спектральних діапазонів електромагнітного випромінювання. Створена модель дозволяє переводити цифрову інформацію зображень «Січ-2» до показників відбитої поверхнею Землі сонячної радіації у відповідних спектрах. Для підвищення точності калібрування використано модель робастної лінійної регресії, що дало змогу уникнути значного впливу викидів, пов'язаних з невідповідністю зображень, і отримати значно кращі моделі для калібрування даних.

Для подальшого підвищення точності і адекватності представлених перетворень необхідні наступні кроки.

Проведення експерименту для більшої кількості зображень відповідних космічних апаратів. Це дозволило б отримати статистично кращий результат з урахуванням різних рельєфів відзнятих територій. Однак дана задача дещо ускладнюється можливістю знаходження еталонних даних для калібрування, відзнятих в найкоротші строки часу по відношенню до даних «Січ-2».

В майбутньому планується використання алгоритму покращення геоприв'язки даних «Січ-2», наведеного в роботі [1]. Це дозволить уникнути піксельного зсуву даних, що значно збільшує похибку моделі калібрування, а також уникнути ряду пов'язаних безпосередньо з геоприв'язкою проблем, які виникають при зіставленні цифрової інформації зображень.

Орторектифікація даних «Січ-2». Це дозволило б, враховуючи модель рельєфу підстильної поверхні, уникнути похибок геоприв'язки зображень, пов'язаних з особливостями рельєфу.

1. Федоров О. П., Куссуль Н. М., Кравченко О. М. та ін. Інформаційна технологія географічної прив'язки даних космічної системи ДЗЗ «Січ-2» для території України // Космічна наука і технологія. — 2013. — **13**, № 1. — С. 3—12.
2. Bryan A. F., Bailey S. W., Werdell J. P., McClain C. R. Sensor-independent approach to the vicarious calibration of satellite ocean colour radiometry // Appl. Opt. — 2007. — **46**, N 22. — P. 5068—5082.
3. Cao C., Weng F., Goldberg M., et al. Intersatellite calibration of polar-orbiting radiometers using the SNO/SCO method // IEEE Int. Geosci. Remote Sens. Symp. — 2005. — **1**. — P. 109—112.
4. Chander G., Markham B. L., Helder D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sens. Environ. — 2009. — **113**, N 5. — P. 893—903.
5. Chander G., Xiong X., Angal A., et al. Cross-comparison of the IRS-P6 AWiFS sensor with the L5 TM, L7 ETM+, & Terra MODIS sensors // Proc. SPIE, Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIII, 74740Z. — September 22, 2009. — DOI:10.1117/12.830502
6. Gyanesh C., Hewison T. J., Fox N., et al. Overview of intercalibration of satellite instruments // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. — 2013. — **51**, N 3. — P. 1056—1080.
7. Huber P. J., Ronchetti E. M. Robust statistics, Second edition. — NY: John Wiley and Sons inc., 2009. — 380 p.
8. Masek J. G., Vermote E. F., Saleous N. E., et al. A Landsat surface reflectance dataset for North America, 1990—2000 // IEEE Geosci. and Remote Sens. Lett. Jan. — 2006. — **3**, N 1. — P. 68—72.
9. Kogan F., Kussul N., Adamenko T., et al. Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models // Int. J. Appl. Earth Observ. and Geoinform. — 2013. — **23**. — P. 192—203.
10. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., et al. Crop area estimation in Ukraine using satellite data within the MARS project 2012 // IEEE Int. Geosci. and Remote Sens. Symp. — 2012. (IGARSS). — P. 3756—3759.
11. Kussul N., Mandl D., Moe K., et al. Interoperable infrastructure for flood monitoring: sensorweb, grid and cloud // IEEE J. Selected Topics in Appl. Earth Observations and Remote Sens. — 2012. — **5**, N 6. — P. 1740—1745.
12. Kussul N., Shelestov A., Skakun S., et al. The wide area grid testbed for flood monitoring using Earth observation data // IEEE J. Selected Topics in Appl. Earth Observations and Remote Sens. — 2012. — **5**, N 6. — P. 1746—1751.
13. Mears C. A., Wentz F. J. Construction of the RSS V3.2 lowertropospheric temperature dataset from the MSU and AMSU microwave sounders // Oceanic Technol. — 2009. — **26**, N 8. — P. 1493—1509.
14. Semunegus H., Berg W., Bates J. J., et al. An extended and improved Special Sensor Microwave Imager (ssm/i) period of record // J. Appl. Meteorol. Climatol. — 2010. — **49**, N 3. — P. 424—436.
15. Shelestov A. Yu., Kravchenko A. N., Skakun S.V., et al. Geospatial information system for agricultural monitoring // Cybern. and Syst. Anal. — 2013. — **49**, N 1. — P. 124—132.
16. Shi L., Bates J. J. Three decades of intersatellite-calibrated high-resolution infrared radiation sounder upper tropospheric water vapour // J. Geophys. Res. — 2011. — **116**, N D4. — DOI: 10.1029/2010JD014847.
17. Thome K., Whittington E., Smith N., et al. Ground-reference techniques for the absolute radiometric calibration of MODIS // Proc. SPIE Conf. — 2000. — P. 51—59. — DOI:10.1117/12.494219.
18. Thome K. Sampling and uncertainty issues in trending reflectancebased vicarious calibration results // Proc. SPIE Conf. — 2005. — **5882**. — P. 397—407.
19. Schroeder T. A., Cohen W. B., Song C., et al. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon // Remote Sens. Environ. — 2006. — **103**. — P. 16—26.
20. Vermote E. F., Tanre D., Deuze J. L., et al. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview // IEEE Trans. Geosci. and Remote Sens. — 1997. — **35**, N 3. — P. 675—686.
21. Wang L., Goldberg M., Wu X., et al. Consistency assessment of atmospheric infrared sounder and infrared atmospheric sounding interferometer radiances: Double differences versus simultaneous nadir overpasses // J. Geophys. Res.: Atmospheres. — 2011. — **116**, N D11. — DOI: 10.1029/2010JD014988.
22. Zoran M., Stefan S. Atmospheric and spectral corrections for estimating surface albedo from satellite data // J. Optoelectron. and Adv. Mater. — 2006. — **8**, N 1. — P. 247—251.

Стаття надійшла до редакції 14.07.13

Р. М. Басараб

МЕТОД КРОССКАЛИБРОВКИ ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СІЧ-2»

Предложена модель радиометрической коррекции данных КА «Січ-2». Анализируется точность модели для данных исходных снимков КА «Січ-2» и «Ландсат-5-ТМ». Определены актуальные проблемы и предложены пути их решения.

R. M. Basarab

THE CROSS-CALIBRATION METHOD FOR “SICH-2” DATA

A model and software for the radiometric correction of the spacecraft “Sich-2” data are proposed. The accuracy of the model for initial image data of the “Sich-2” and “Landsat-5 TM” spacecrafts is analyzed. Some existing problems are identified and some ways for their overcoming are proposed.