



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 12 • № 2 • 2016 С. 125 – 136

УДК 528.855+835

Спектральні дослідження та відбір тестових об'єктів для території України, потенційно придатних для післястартового радіометричного калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів

Я.И. Зєлик*, С.В. Чорний, Л.В. Підгородецька

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

Здійснено спектральні дослідження та відбір тестових об'єктів для території України, потенційно придатних для післястартового радіометричного калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів на основі архівних супутникових даних та створено відповідний векторний геоінформаційний шар.

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОТБОР ТЕСТОВЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ, ПОТЕНЦИАЛЬНО ПРИГОДНЫХ ДЛЯ ПОСЛЕЛАУНЧ РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО КАЛИБРОВКИ СПУТНИКОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СЕНСОРОВ, Зельяк Я.И., Черный С.В., Подгородецкая Л.В. — Выполнены спектральные исследования и отбор тестовых объектов для территории Украины, потенциально пригодных для послеланчтовой радиометрической калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров на основе архивных спутниковых данных и создан соответствующий векторный геоинформационный слой.

SPECTRAL STUDIES AND SELECTION OF TEST SITES FOR THE TERRITORY OF UKRAINE, POTENTIALLY SUITABLE FOR POST LAUNCH RADIOMETRIC CALIBRATION OF THE SATELLITE ELECTRO-OPTIC SENSORS, by Zelyuk Ya.I., Chornyy S.V., Podgorodetska L.V. — Spectral studies and selection of the test sites for the territory of Ukraine, potentially suitable for radiometric calibration of satellite post launch electro-optic sensors was carried out. The studies are based on the archival satellite data. The corresponding vector geographic information layer was created.

Ключевые слова: послеланчтовая калибровка; спутниковый оптико-электронный сенсор; дистанционное зондирование; калибровочный полигон; спектральные исследования; векторный геоинформационный слой.

Key words: post launch calibration; satellite electro-optic sensor; remote sensing; calibration test site; spectral studies; vector geographic information layer.

1. АКТУАЛЬНІСТЬ ПІСЛЯСТАРТОВОГО РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ СУПУТНИКОВИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ СЕНСОРІВ В УКРАЇНІ ТА ДОРОБОК АВТОРІВ У РОЗВ'ЯЗАННІ ЦЬОЇ ПРОБЛЕМИ

У межах реалізації Загальнодержавних цільових науково-технічних космічних програм України у 2012–2014 рр. Інститут космічних досліджень (ІКД) НАН України та ДКА України виконав цикл науково-дослідних робіт з розроблення науково-методичного забезпечення та створення засобів калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів з використанням контрольно-калібрувального полігону на базі компактно розміщених тестових об'єктів на території НЦУВКЗ (АРК Крим), яка є зараз анексованою.

Необхідність виконання цих робіт зумовлена тим, що сьогодні у світі на сучасний ринок продукції космічного спостереження компаніями та операторами космічних систем надаються не просто високоякісні космічні знімки, а створені калібровані базові продукти обробки (БП) даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що базуються на даних обробки вищих рівнів у порівнянні з “сирими” даними космічних знімків. БП ДЗЗ повинні створюватися на основі існуючих у світовій практиці систем класифікації даних ДЗЗ, званих інакше рівнями обробки даних, запропонованих NASA при створенні системи Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) [1], і розширених і обґрунтованих у каталозі робочої групи з інформаційних систем і сервісів (Working Group on Information Systems and Services (WIGIS)) комітету із супутникових спостережень Землі (Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) [2]. Базові продукти є наборами даних, вираженими в абсолютних фізичних одиницях, точно прив'язаними у часі і просторі до спостережуваних об'єктів, та отримуються за допомогою регулярно каліброваних у польоті бортових супутникових оптико-електронних сенсорів ДЗЗ.

*Зєлик Ярема Ігорович; ✉ adapt09@gmail.com

До теперішнього часу в Україні післястартове калібрування бортових оптико-електронних сенсорів не здійснювалося. Зокрема, у космічній системі “Січ-2” калібрування знімальної системи не було передбачене конструктивно і технологічно. Тому на основі некаліброваних даних не могли бути створені базові продукти даних, з якими Україна змогла б виходити на міжнародний ринок продуктів даних та послуг ДЗЗ.

Метою науково-дослідних робіт, виконуваних ІКД НАН України та ДКА України стосовно післястартового калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів ДЗЗ, є забезпечення достовірності та підвищення точності даних дистанційного зондування Землі шляхом здійснення метрологічної підтримки, зокрема калібрування, супутникових оптико-електронних сенсорів на стадії польоту космічних систем на базі наземної інфраструктури контрольно-калібрувальних полігонів, розроблюваного науково-методичного забезпечення та програмно-апаратних комплексів.

Основні наукові і практичні результати, отримані дослідниками ІКД НАН України та ДКА України у напрямі післястартового калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів ДЗЗ, опубліковані у роботах [3–10]. Вони стосуються розроблення науково обґрунтованих методик: визначення просторового розрізнення на місцевості і спектральної чутливості супутникового оптико-електронного сенсора на стадії польоту, післястартового радіометричного калібрування сенсора за природними та штучними об’єктами загального призначення, його перехресного радіометричного калібрування за даними ДЗЗ існуючих космічних систем (без використання обладнаних полігонів), атмосферної корекції за даними всесвітньої мережі AERONET, польових та аналітичних (за архівними даними ДЗЗ) спектральних досліджень тестових об’єктів. Обґрунтовано інфраструктуру контрольно-калібрувальних полігонів, створено прототипи бази даних та геоінформаційної системи полігонів; розроблено модулі програмного забезпечення реалізації методик оцінювання та калібрування характеристик сенсора на стадії польоту.

Сьогодні у зв’язку з неможливістю використання компактно розміщених калібрувальних ділянок на території АРК Крим і необхідністю виконання різних типів післястартового калібрування (що неможливо здійснити на окремому полігоні) запропоновано створення територіально розподіленої мережі контрольно-калібрувальних полігонів на материковій Україні. Мережа має містити полігони для здійснення таких типів калібрування та оцінювання характеристик супутникових оптико-електронних сенсорів на стадії польоту космічних систем (КС): радіометричного калібрування; визначення спектральної чутливості та меж спектральних діапазонів каналів, оцінювання просторового розрізнення на місцевості.

На створюваній територіально розподіленій мережі контрольно-калібрувальних полігонів за розробленими методиками буде забезпечено на стадії польоту КС у кожному спектральному діапазоні статистично достовірне визначення калібрувального коефіцієнта підсилення та калібрувального коефіцієнта зміщення супутникового оптико-електронного сенсора, значення яких будуть наведені у файлі калібрувальних параметрів. За визначеними калібрувальними коефіцієнтами буде отримано статистично достовірний базовий продукт супутникових даних рівня обробки 1В (за класифікацією CEOS) — спектральну енергетичну яскравість на апертурі супутникового сенсора. Цей калібрований базовий продукт обробки супутникових даних та похідні від нього продукти можуть бути представлені на міжнародному ринку продуктів ДЗЗ.

На сьогодні потребують розроблення ще такі методики: наземних атмосферних вимірювань над тестовими об’єктами, синхронних з наземними спектрометричними вимірюваннями та супутниковою зйомкою; визначення коефіцієнта пропускання атмосфери над тестовими об’єктами за даними наземних атмосферних вимірювань; атмосферної корекції.

Необхідне створення програмно-апаратного комплексу для реалізації бази даних і геоінформаційної системи контрольно-калібрувальних полігонів та виконання методик післястартового калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів ДЗЗ.

Проведення вказаних науково-дослідних робіт необхідне, перш за все, при створенні в Україні наземних засобів контролю характеристик космічних систем “Січ-2-1”, “Січ-2М”, які будуть ефективно використовуватися у виконанні заходів з моніторингу навколишнього природного середовища у межах Загальнодержавних цільових науково-технічних космічних програм України.

2. ВИМОГИ ДО ТЕСТОВИХ ОБ’ЄКТІВ КОНТРОЛЬНО-КАЛІБРУВАЛЬНОГО ПОЛІГОНУ, ЯКІ ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ КОРЕКТНІ УМОВИ І ДОСТАТНЮ ТОЧНІСТЬ КАЛІБРУВАННЯ

При формулюванні вимог до тестових об’єктів (ТО) на території України для післястартового радіометричного калібрування оптико-електронних сенсорів слід враховувати досвід організації полігонів системи LANDNET Sites комітету CEOS, у якій кожен полігон — це окрема тестова ділянка (один тестовий об’єкт з лінійними розмірами від сотень метрів до кількох кілометрів), обладнана на постійній основі наземними вимірювальними пристроями [11]. Крім того, доцільно брати до уваги досвід використання комітетом CEOS як калібрувальних так званих природних псевдо-інваріантних ділянок великої площі, які мають високу спектральну відбивну здатність, гомогенну у певному діапазоні спектру та ха-

рактизуються низьким вмістом аерозолів над ними [12]. Останні можуть бути використані для оцінки довготермінової стабільності оптичних сенсорів і перехресного порівняння їх характеристик.

З врахуванням цього досвіду, а також на підставі результатів експериментальної перевірки розроблених в ІКД НАН України та ДКА України методик післястартового радіометричного калібрування та визначення просторового розрізнення на місцевості можна сформулювати такі вимоги до тестових об'єктів контрольно-калібрувальних полігонів:

1. Тестові об'єкти повинні мати істотну відбивну здатність з величиною спектрального коефіцієнта відбиття не менше 0,3 в усіх спектральних діапазонах.

2. Для відбивної здатності поверхні ТО можна з достатньою точністю застосувати модель відбиття випромінювання Ламберта [13, 14] (яскравість відбитого випромінювання від дифузної поверхні за моделлю відбиття випромінювання Ламберта є однаковою у всіх напрямках).

3. Спектральні характеристики відбивних поверхонь ТО повинні бути гомогенними у просторі та стабільними у часі.

4. Функція розподілу значень коефіцієнта відбиття тестового об'єкта за спектром має бути у межах усього спектрального діапазону достатньо рівномірною, без різких перепадів.

5. При реалізації методики визначення просторового розрізнення на місцевості методом оцінки функції розсіяння точки необхідно мати значний набір еталонних зображень тестових об'єктів з просторовим розрізненням $\sim 0,1$ м (наприклад, аерознімків високого розрізнення).

6. При статистичній оцінці точності методики визначення просторового розрізнення оптико-електронного сенсора на місцевості слід проводити не менш, ніж для 10 ТО.

7. Для обраного тестового об'єкта просторове розрізнення за еталонним знімком має бути приблизно у 3 рази вищим за задану похибку визначення просторового розрізнення за супутниковим знімком за допомогою каліброваного сенсора.

8. При реалізації методики радіометричного калібрування спектральних каналів тестовий об'єкт слід вибирати просторово гомогенним за спектральним коефіцієнтом відбиття поверхні, і за лінійними розмірами поверхні ТО має перевищувати поточне значення просторового розрізнення каліброваного супутникового сенсора щонайменше у 10 разів. (Зокрема, для просторового розрізнення на місцевості багатоспектральних оптико-електронних сенсорів КС "Січ-2" і "Січ-2-1", яке становить 7,8 м, достатній лінійний розмір ТО для радіометричного калібрування має перевищувати 78 м).

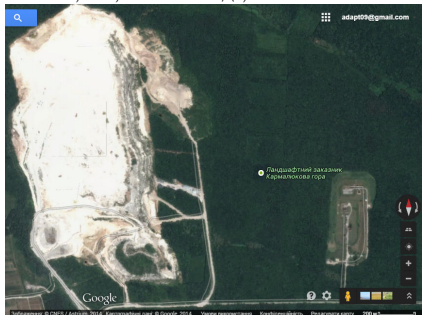
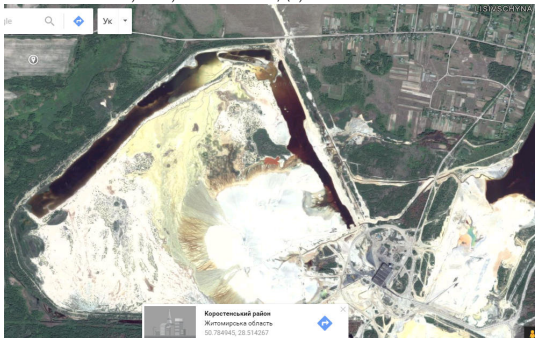


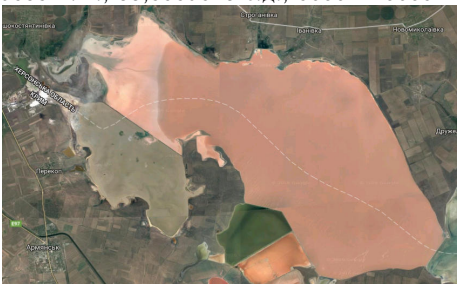
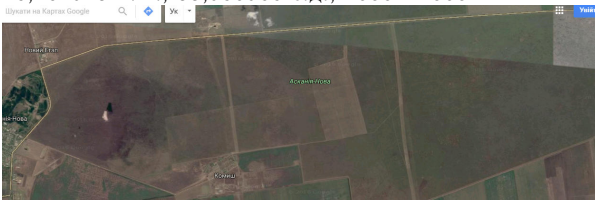


9. Кількість точок вимірювань спектральних характеристик відбиття на кожному вибраному вищевказаним чином тестовому об'єкті, синхронних з супутниковим зніманням, при післястартовому радіометричному калібруванні має бути 64–100.





3. ПОШУК ДІЛЯНОК НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ — ПОТЕНЦІЙНИХ КАНДИДАТІВ НА ТЕСТОВІ ОБ'ЄКТИ РОЗПОДІЛЕНОГО КОНТРОЛЬНО-КАЛІБРУВАЛЬНОГО ПОЛІГОНУ

За даними супутникових знімків та карт Google проведено пошук ділянок на території України, потенційно придатних для післястартового радіометричного калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів, зокрема у Хмельницькій, Чернівецькій, Житомирській, Дніпропетровській, Запорізькій, Херсонській областях. Загальним критерієм пошуку була наявність на місцевості за даними супутникових знімків та карт Google просторово однорідної ділянки щодо спектрального коефіцієнта відбиття з лінійними розмірами щонайменше (10×10) наземних інтервалів дискретизації оптико-електронного сенсора, що відповідає розмірам ділянки (10×10) пікселів на супутниковому знімку. Як було зазначено, для просторового розрізнення на місцевості багатоспектральних оптико-електронних сенсорів КС "Січ-2" і "Січ-2-1", яке становить 7,8 м, достатній лінійний розмір ТО для радіометричного калібрування має перевищувати 78 м.

Сформовано зведену таблицю 1, наведену у фрагментованому вигляді у [7], у якій відображено ділянки — потенційні кандидати та тестові об'єкти розподіленого контрольно-калібрувального полігону у вказаних областях України. Це кам'яні, титанові, кварцитові кар'єри, піщана пустеля, соляні озера, природні протяжні утворення, які через стабільність у часі і гомогенність у просторі спектральних коефіцієнтів відбиття можна віднести до псевдоінваріантних (за термінологією комітету CEOS) тестових ділянок.

Таблиця 1. Ділянки на території України — потенційні кандидати на тестові об'єкти розподіленого контрольно-калібрувального полігону

<p>1. Кар'єр ПАТ “Подільський цемент”, Хмельницька обл. 48,771523 п.ш., 26,644769 с.д., 640 × 1060 м</p> 	<p>2. Титановий кар'єр Лісівщина, Житомирська обл. 50,775048 п.ш., 28,526220 с.д., 570 × 1160 м</p> 
<p>3. Олешківські піски, Херсонська обл. 46,2299655 п.ш., 33,8689613 с.д., 2000 × 4000 м</p> 	<p>4. Озеро Соляне, Херсонська обл. 46,1256937 п.ш., 34,2173481 с.д., 1000 × 800 м</p> 
<p>5. Відстійник титанового заводу, Херсонська обл. 46,2299655 п.ш., 33,8689613 с.д., 6000 × 10000 м</p> 	<p>6. Заповідник Асканія-Нова, Херсонська обл. 46,464913 п.ш., 33,980986 с.д., 2000 × 2000 м</p> 
<p>7. Вільногірське гірниче родовище, Дніпропетровська обл. 48,502366 п.ш., 34,074887 с.д., 900 × 1000 м</p> 	<p>8. Тендрівська коса, Херсонська обл. 46,342288 п.ш., 31,522253 с.д., 200 × 2000 м</p> 

<p>9. Кривий Ріг 1. Кар'єр Південний, Дніпропетровська обл. 47,929121 п.ш., 33,373456 с.д., 900 × 1300 м</p> 	<p>10. Кривий Ріг 2. Кар'єр №2-біс, Дніпропетровська обл. 47,841467 п.ш., 33,310302 с.д., 1000 × 1000 м</p> 
<p>11. Кривий Ріг 3. Кар'єр №3-біс, Дніпропетровська обл. 47,840454 п.ш., 33,308757 с.д., 1500 × 1800 м</p> 	<p>12. Орджонікідзе. Кар'єр, Дніпропетровська обл. 47,686887 п.ш., 34,229101 с.д., 900 × 3500 м</p> 

4. ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІДБИТТЯ ТЕСТОВИХ ДІЛЯНОК НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ, ПРИДАТНИХ ДЛЯ ПІСЛЯСТАРТОВОГО РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ, ЗА АРХІВНИМИ СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Дослідження спектральних характеристик відбиття тестових ділянок на території України, потенційно придатних для післястартового радіометричного калібрування, здійснювались за архівними даними супутникових знімків KC Landsat 5TM та Landsat 7 ETM+, для яких виконано атмосферну корекцію. Це дані спектральної відбивної здатності поверхні Землі (Surface Reflectance Data) з архіву записів даних клімату (Climate Data Records, CDRs) Географічної служби США (U.S. Geological Survey, USGS) [15, 16]. В архіві даних Landsat CDRs інтерес становлять дані спектральної відбивної здатності поверхні Землі — продукту рівня 2 оброблення даних всіх місій Landsat (або, іншими словами, неперервної місії Landsat), отримані протягом понад 40 років, та похідні від спектральної відбивної здатності продукти, вищі від рівня оброблення 2, зокрема, різноманітні вегетаційні, водні та інші індекси, результати математичного моделювання на регулярній геопросторовій сітці, зокрема, глобальних змін клімату, тощо [17]. Дані спектральної відбивної здатності поверхні з архіву Landsat CDRs можуть для вибраної множини сцен бути замовлені користувачем через спеціальний браузер EarthExplorer на сайті [18] із заданням конкретних умов пошуку, серед яких, зокрема, — період знімання та координати характерних точок ділянки. Ділянка, зокрема, може бути задана як набір векторних даних (полігон) шляхом оконтурювання користувачем на підстильній поверхні у вікні браузера EarthExplorer. Оскільки дані Landsat 7 ETM+ *Вісник Астрономічної школи, 2016, том 12, №2*

мали значні втрати на зображеннях внаслідок нестабільної роботи апаратури, а на час проведення описаних у цій статті досліджень восени 2014 р. для KC Landsat 8 атмосферна корекція не виконувалася і його дані у архіві CDRs USGS були відсутні, то для досліджень авторами було використано лише дані KC Landsat 5 TM. Спектральні канали сенсорів KC Landsat 5TM добре узгоджуються з відповідними спектральними каналами сенсорів KC “Січ-2” та “Січ-2-1” (див. табл. 2).

Таблиця 2. Відповідність спектральних характеристик каналів сенсорів KC Landsat 5 TM та “Січ-2”

Landsat 5 TM			Січ-2			
канал	діапазон, мкм	розрізнення, м	канал	скорочена назва	діапазон, мкм	розрізнення, м
B1	0,45–0,52	30				
B2	0,52–0,60	30	B1	G	0,50–0,59	8,20
B3	0,63–0,69	30	B2	R	0,61–0,68	8,20
B4	0,76–0,90	30	B3	I	0,79–0,89	8,20
B5	1,55–1,75	30		SWIR	1,55–1,7	41,40
B7	2,08–2,35	30				
B2+B3+B4		30	B4	PAN	0,50–0,90	8,20
B6	10,40–12,50	120 (30)				

Запропонована методика спектральних досліджень тестових об’єктів на основі архівних супутникових даних Landsat CDRs реалізується таким чином:

- 1) формування замовлення та отримання супутникових зображень з архіву Landsat CDRs у значеннях спектральної відбивної здатності (спектрального коефіцієнта відбиття) поверхні Землі з врахуванням атмосферної корекції на момент знімання для заданого району;
- 2) пошук та виділення на супутниковому зображенні відповідного тестового об’єкта;
- 3) розрахунок статистичних характеристик однорідності спектрального коефіцієнта відбиття тестового об’єкта (середнього значення, середнього квадратичного відхилення та густини розподілу ймовірності) у кожному з 6 спектральних каналів Landsat 5 TM.

Характеристики даних, що надаються з архіву Landsat CDRs наведені у табл. 3.

Таблиця 3. Характеристики архівних даних з архіву Landsat CDRs спектральних коефіцієнтів відбиття поверхні Землі

Назва даних	Канал	Тип даних	Зміст даних	Діапазон значень	Динамічний діапазон	Масштабний коефіцієнт
sr_band1	Band 1	INT16	коэф. відбиття	–2 000...16 000	0...10 000	0,0001
sr_band2	Band 2	INT16	коэф. відбиття	–2 000...16 000	0...10 000	0,0001
sr_band3	Band 3	INT16	коэф. відбиття	–2 000...16 000	0...10 000	0,0001
sr_band4	Band 4	INT16	коэф. відбиття	–2 000...16 000	0...10 000	0,0001
sr_band5	Band 5	INT16	коэф. відбиття	–2 000...16 000	0...10 000	0,0001
sr_band7	Band 7	INT16	коэф. відбиття	–2 000...16 000	0...10 000	0,0001

Отримані з архіву Landsat CDRs дані для визначення спектральних коефіцієнтів відбиття потребують додаткової обробки для їх зведення до діапазону [0, 1]. Тому для виконання масштабування, обчислення спектральних коефіцієнтів відбиття та статистичних розрахунків на основі архівних супутникових даних створено програмні модулі, які дозволяють виконати вибір ділянки для дослідження, розрахувати середні значення, середньоквадратичні відхилення спектрального коефіцієнта відбиття у каналах у межах обраної для дослідження ділянки, а також густини розподілу ймовірності значень коефіцієнта відбиття у кожному з 6 спектральних каналів (1–5,7) за даними статистичних досліджень, побудувати відповідні графіки та видати інформацію у файл. Для тестового об’єкта Титановий кар’єр Лісівщина (50,775048 п.ш., 28,526220 с.д. 570 × 1160 м), відображеного у табл. 1, результати розрахунку середніх значень та середньоквадратичних відхилень коефіцієнтів відбиття наведено у табл. 4.

Таблиця 4. Результати розрахунку спектрального коефіцієнта відбиття для тестового об’єкта 2 Титановий кар’єр Лісівщина (50,775048 п.ш., 28,526220 с.д. (570x1160) м)

Назва даних	Діапазон, мкм	Коеф. відбиття	С.к.в. коеф. відбиття
sr_band1	0,45...0,52	0,215586	0,002376
sr_band2	0,52...0,60	0,265618	0,004578
sr_band3	0,63...0,69	0,291518	0,005805
sr_band4	0,76...0,90	0,291518	0,005805
sr_band5	1,55...1,75	0,339402	0,005829
sr_band7	2,08...2,35	0,352877	0,006112

Кінцевою метою дослідження спектральних характеристик тестових об’єктів за архівними супутниковими даними є визначення переліку серед них придатних для післястартового радіометричного калібрування оптико-електронних сенсорів, які можуть забезпечити у кожному спектральному каналі сенсора,

який калібрують, максимальний діапазон спектрального коефіцієнта відбиття земної поверхні. У результаті пошуку даних об'єктів в архіві Landsat CDRs за умов безхмарності у літній період отримано та оброблено відповідні дані для таких тестових об'єктів, відображених у табл. 1: 2 Титановий кар'єр Лісівщина; 3 Олешківські піски; 8 Тендрівська коса; 9 Кривий Піг 1. Кар'єр Південний; 10 Кривий Піг 2. Кар'єр №2-біс.; 11 Кривий Піг 3. Кар'єр №3-біс.; 12 Орджонікідзе. Кар'єр., — та для порівняння з ними — тестового об'єкта з полігонів системи LANDNET Sites комітет CEOS — озера Туз Гулу (Tuz Golu) [11, 12, 19, 20]. Графіки спектральних коефіцієнтів відбиття у залежності від номера спектральних каналів сенсорів для вказаних об'єктів наведені на рис. 1. Номер каналу 6 відповідає спектральному діапазону B7 KC Landsat 5 TM.

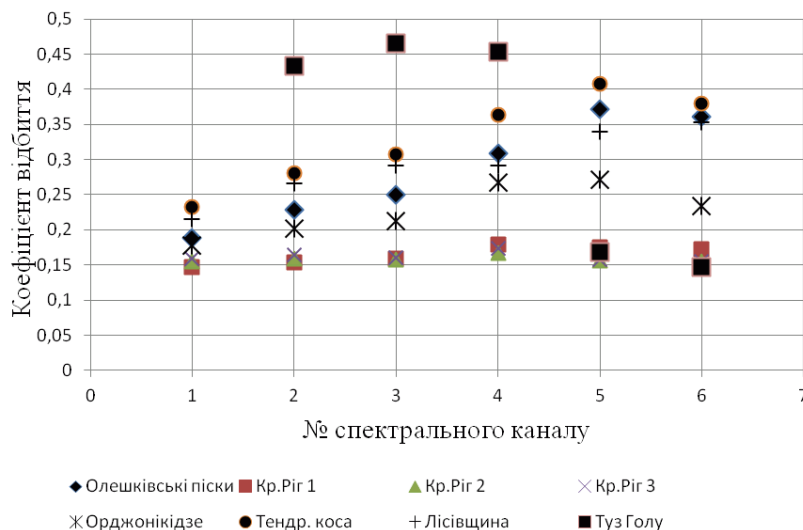


Рис. 1. Спектральні коефіцієнти відбиття для тестових об'єктів з найвищою відбивною здатністю з табл. 1 у залежності від номера спектрального каналу сенсорів

Порівняльний аналіз спектральних коефіцієнтів відбиття об'єктів на території України показує, що найбільшу відбивну здатність має об'єкт 8 Тендрівська коса, найменшу відбивну здатність мають об'єкти 9–11 (1–3 Кривий Піг). Спектральний коефіцієнт відбиття об'єкта Туз Гулу у каналах G, R, I KC "Січ-2" на 5% більші, ніж у 8 Тендерівська коса, проте у діапазоні SWIR (1,55...1,75 мкм) — удвічі менші.

Таким чином, для післястартового радіометричного калібрування можуть бути рекомендовані такі тестові об'єкти: найяскравіші — 8 Тендрівська коса та 3 Олешківські піски; середньої яскравості — 12 Орджонікідзе; низької яскравості — 10 Кривий Піг 2.

Отже, запропонована методика спектральних досліджень тестових об'єктів з використанням архівних даних Landsat CDRs дозволяє проводити спектральні дослідження та, принаймні, попередній відбір радіометричних тестових об'єктів на значних за розміром ділянках поверхні Землі без використання наземних вимірювань. Визначені у ході дослідження тестові об'єкти на території України мають максимальні значення спектральних коефіцієнтів відбиття у каналах оптико-електронного сенсора 0,28...0,4 та дозволяють проводити, таким чином, калібрування в обмеженому (0...40%) динамічному діапазоні спектральних коефіцієнтів відбиття у каналах оптико-електронних сенсорів KC "Січ-2", "Січ-2-1". Однак для природних тестових об'єктів це хороший результат, оскільки найяскравіший тестовий об'єкт CEOS — солоне озеро Туз Гулу — дозволяє здійснювати калібрування оптико-електронних сенсорів у спектральних діапазонах KC "Січ-2", "Січ-2-1" лише у межах 0...45%. На відібраних у ході спектральних досліджень за архівними супутниковими даними тестових об'єктів на території, придатних для післястартового радіометричного калібрування оптико-електронних сенсорів, можуть бути організовані точні наземні спектрометричні вимірювання подібним чином, як це було вказано в [3–5], результати яких можуть бути внесені до створеної геоінформаційної бази даних [5, 6].

5. СТВОРЕННЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО ШАРУ ПОТЕНЦІЙНИХ ТЕСТОВИХ ДІЛЯНОК РОЗПОДІЛЕНОГО КОНТРОЛЬНО-КАЛІБРУВАЛЬНОГО ПОЛІГОНУ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Процес векторизації обраних ділянок передбачає створення полігонального шейп-файлу засобами будь-якого доступного програмного геоінформаційного середовища, зокрема геоінформаційного середовища ArcGIS, для обробки геоінформаційних даних [21–23]. За основу беруться супутникові зображення території високого або середнього просторового розрізнення.

У даній роботі як основа для векторизованого подання у середовищі ArcGIS 9.0 [22, 23] потенційних тестових ділянок розподіленого підсупутникового полігону було використано знімки території України

оптико-електронними сенсорами КС Landsat 8 OLI та Січ-2. Залежно від типу ділянки обирається спосіб векторизації. Зокрема, у ручному режимі оцифровуються об'єкти правильної форми, як правило, антропогенного походження (відстійник титанового заводу, заповідник, тощо). Природні ж об'єкти потребують більш точного підходу. Зокрема, природні утворення з умовно гомогенним покриттям можна виокремити шляхом попередньої класифікації панхроматичного зображення та подальшої автоматичної векторизації отриманого результату класифікації (див. рис. 2).

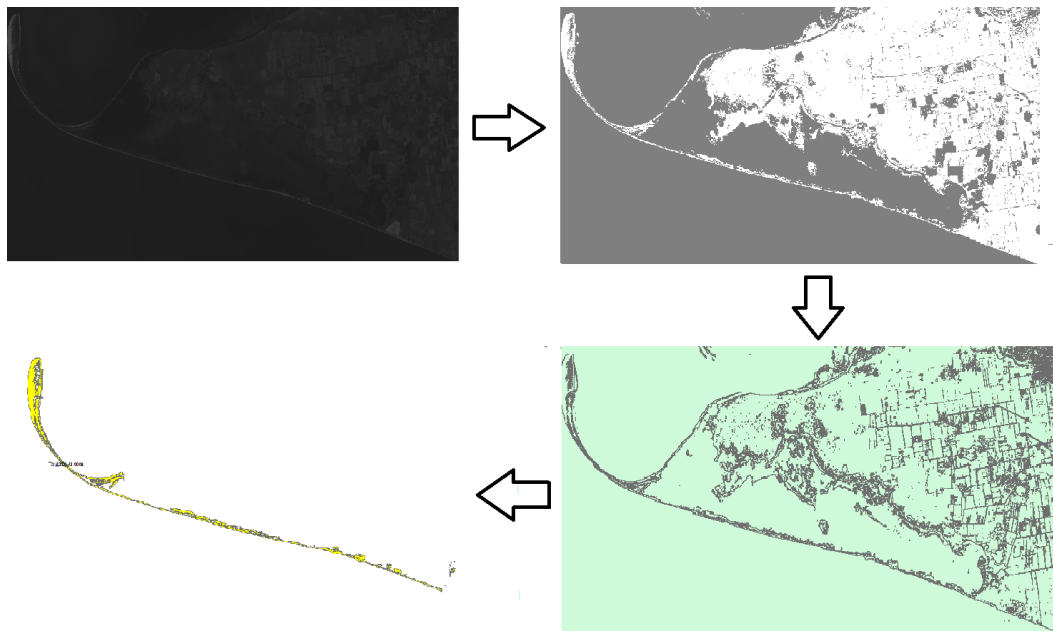


Рис. 2. Етапи створення полігонального об'єкта геоінформаційного шару потенційних тестових ділянок розподіленого контрольно-калібрувального полігону на основі панхроматичного зображення. Тестовий об'єкт — 8 Тендрівська коса, Херсонська область.

Після цього векторний шар редагується шляхом видалення непотрібних полігонів. Таким чином було векторизовано зображення тестового об'єкта Тендрівська коса (Херсонська область) — природного вузького протяжного об'єкта з переважно піщаним типом поверхні. Саме протяжність та нерівномірність форми унеможливила використання ручних інструментів векторизації. Для класифікації було використано панхроматичне зображення, отримане сенсором КС Landsat 8 OLI — 8 канал з просторовим розрізненням 15 м. До ділянки інтересу — виокремленої частини знімка з зображенням піщаної коси — було застосовано процедуру класифікації без навчання за алгоритмом ISODATA (Ітераційна самоорганізована методика аналізу даних — Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique) у середовищі ERDAS IMAGINE [24, 25] з розділенням на два класи. Це дозволило отримати растрове зображення досліджуваної території з поділом на два класи — “вода” та “земля”. Подальші дії після процедури векторизації отриманого растру дозволяють автоматично відкинути клас “води” та у ручному режимі видалити непотрібні полігональні об'єкти класу “земля” — частина зображення материкового суходолу. Аналогічним чином було оброблено знімки кам'яних кар'єрів західного та північного регіону на основі знімання оптико-електронним сенсором КС “Січ-2”. У цьому випадку як основу для векторизації було використано композитне зображення (Green/Red/Infrared, GRI) з просторовим розрізненням 8,4 м, яке, з огляду на високу яскравість виробок кам'яних кар'єрів, дозволяє з високою точністю локалізувати контури об'єкта. На прикладі знімка за допомогою сенсора КС Січ-2 тестового об'єкта — 1 кам'яного кар'єру ПАТ “Подільський цемент”. Етапи реалізації цієї процедури відображені на рис. 3.

Іншого підходу вимагає створення тестового полігонального об'єкта заповідних територій. У першу чергу виникає необхідність використання достовірної картографічної основи. Функціональні зони біосферного заповідника Асканія-Нова ім. Ф.Е. Фальц-Фейна відображені на рис. 4. Результат нанесення контурів заповідника, які виділяють відносно гомогенні у просторі за спектрами відбиття ділянки, за знімком КС Landsat 8 OLI відображені на рис. 5.

Векторизацію такого роду об'єктів доцільно здійснювати у ручному режимі, оскільки класифікація зображення з подальшою його векторизацією в автоматичному режимі не дасть очікуваного результату з огляду на те, що такі ділянки є різномірними та, окрім природних територій, містять антропогенні ландшафти — населені пункти, сільськогосподарські угіддя, тощо. Загалом, тестові ділянки розподіленого контрольно-калібрувального полігону, більша частина яких відображена у табл. 1, можна поділити за місцезнаходженням — північний, південний та західний регіони України (див. рис. 6–8).

Таким чином, було отримано геоінформаційний шар з 12 тестових об'єктів. Описаний метод вимагає

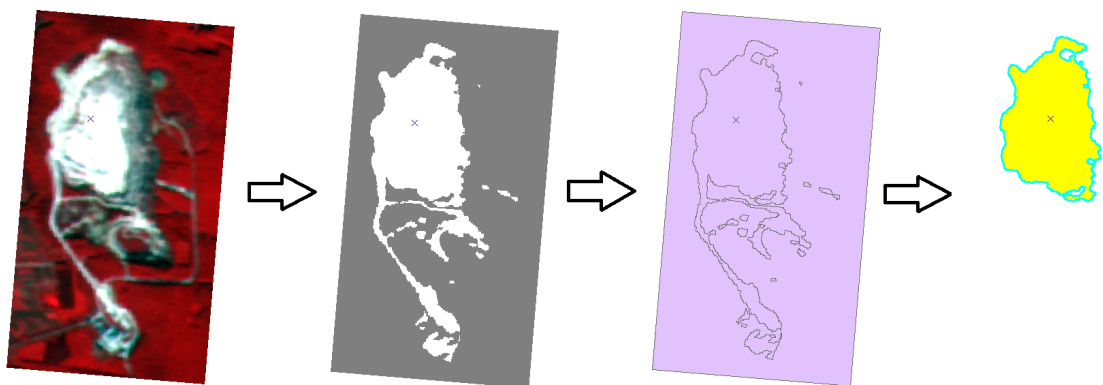


Рис. 3. Етапи створення полігонального об'єкта геоінформаційного шару потенційних тестових ділянок розподіленого підсупутникового полігону на основі композитного зображення (на прикладі знімка сенсором КС Січ-2 кам'яного кар'єру ПАТ "Подільський цемент")



Рис. 4. Функціональні зони біосферного заповідника Асканія-Нова ім. Ф.Е. Фальц-Фейна



Рис. 5. Нанесення контурів заповідника, які виділяють відносно гомогенні у просторі за спектрами відбиття ділянки, за знімком КС Landsat 8 OLI

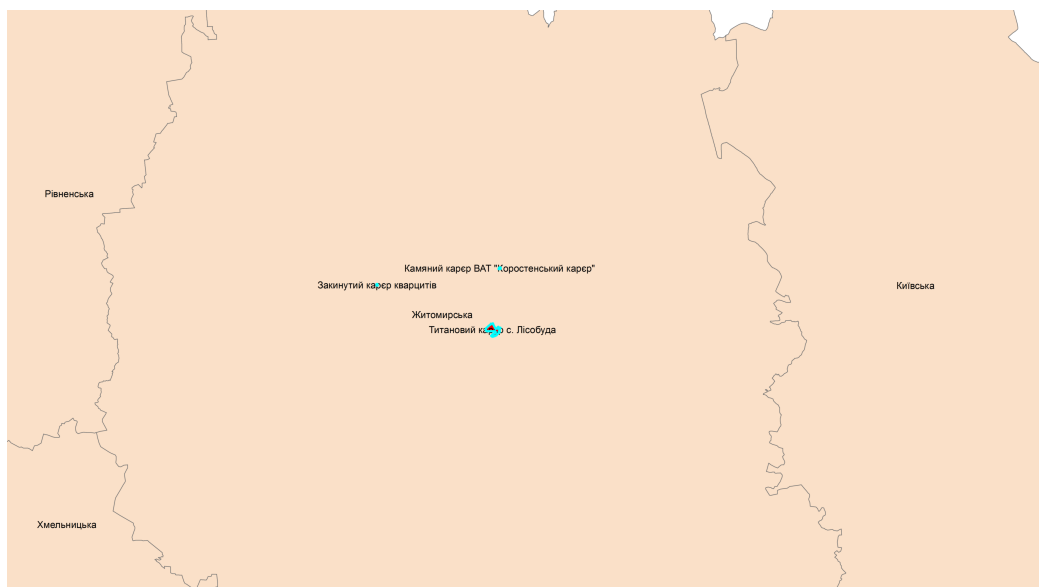


Рис. 6. Тестові ділянки розподіленого контрольно-калібрувального полігону північного регіону

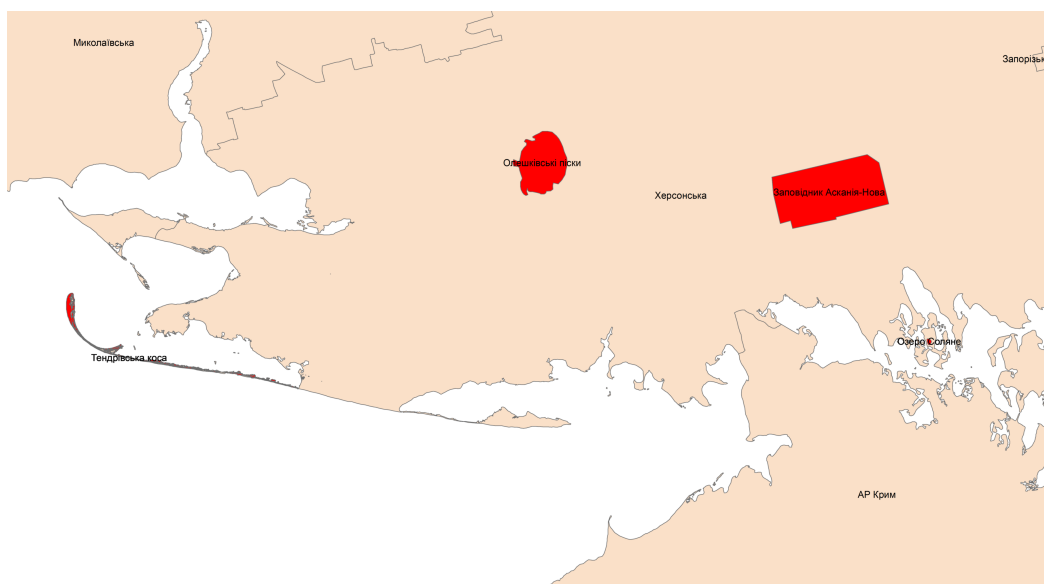


Рис. 7. Тестові ділянки розподіленого контрольно-калібрувального полігону південного регіону

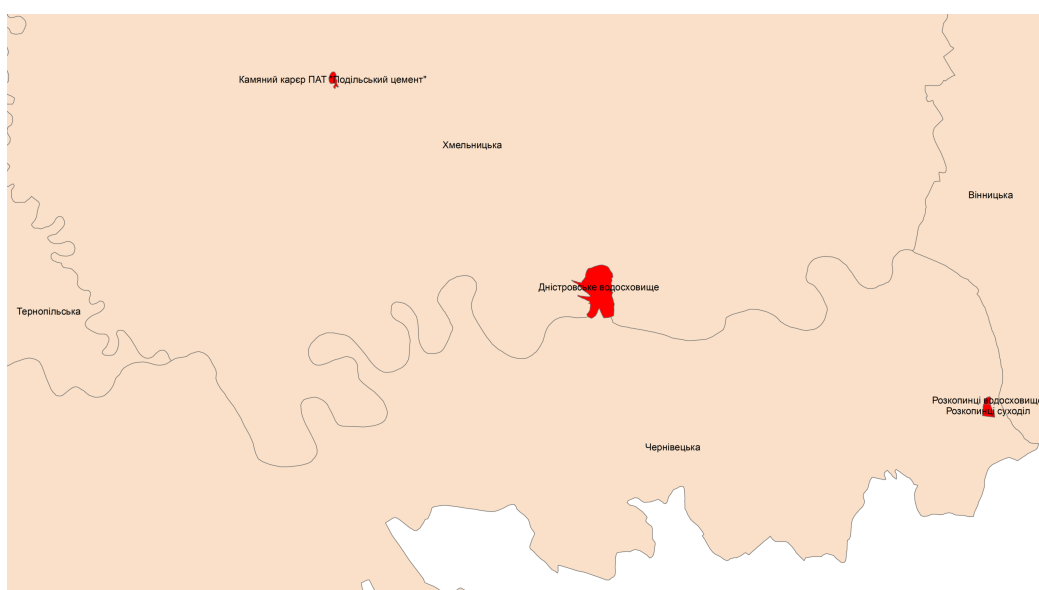


Рис. 8. Тестові ділянки розподіленого контрольно-калібрувального полігону західного регіону

диференційованого підходу до оброблення супутникових даних залежно від типу тестової ділянки та дозволяє значно скоротити час і підвищити точність локалізації потенційних тестових ділянок розподіленого контрольно-калібрувального полігону.

6. ВИСНОВКИ

1. Сформульовано вимоги до тестових об'єктів, достатні для забезпечення коректних умов і достатньої точності післястартового радіометричного калібрування оптико-електронних сенсорів ДЗЗ. Ключовими серед вимог є просторова гомогенність щодо відбиття ділянок з спектральним коефіцієнтом відбиття, більшим ніж 0,3, і те, що за лінійними розмірами тестові ділянки мають перевищувати поточне значення просторового розрізнення сенсора на місцевості щонайменше у 10 разів (лінійні розміри ділянок для калібрування оптико-електронних сенсорів КС "Січ-2-1" мають перевищувати 78 м).

2. На основі сформульованих вимог проведено пошук, виконано спектральні дослідження та здійснено відбір придатних для калібрування тестових об'єктів на території України, зокрема у Хмельницькій, Чернівецькій, Житомирській, Дніпропетровській, Запорізькій, Херсонській областях з використанням архівних даних супутникової зйомки КС "Січ-2" та даних архіву записів даних клімату Climate Data Records Географічної служби США (U.S. Geological Survey).

3. Розроблено метод, узагальнений у методиці спектральних досліджень за архівними супутниковими даними та відбору тестових об'єктів, придатних для післястартового радіометричного калібрування, заснований на аналізі спектрального коефіцієнта відбиття поверхні об'єкта у всіх спектральних діапазонах супутникового сенсора. Приданими для здійснення з їх використанням післястартового радіометричного калібрування є протяжні ділянки, які за лінійним розміром перевищують наземний інтервал дискретизації оптико-електронного сенсора більш, ніж у 10 разів з високими значеннями спектрального коефіцієнта відбиття у діапазоні 0,28...0,4 у всіх спектральних каналах сенсора. Розроблено програмні модулі для розрахунку статистичних характеристик однорідності спектрального коефіцієнта відбиття тестового об'єкта (середнього значення, середнього квадратичного відхилення та густини розподілу ймовірності). До найбільш придатних для здійснення післястартового радіометричного калібрування можна віднести такі ділянки для території України: найяскравіші — Тендрівська коса та Олешківські піски; середньої яскравості — Орджонікідзе, кар'єр; низької яскравості — Кривий Ріг 2, кар'єр №2-біс.

4. Розроблена методика дозволяє проводити спектральні дослідження та попередній відбір тестових об'єктів, придатних для післястартового радіометричного калібрування, для великих територій, зокрема, для всієї території України, з використанням архівних супутникових даних без проведення наземних вимірювань. Це дозволяє швидко провести попередні спектральні дослідження та ефективно відібрати значну кількість придатних тестових ділянок, що у подальшому, при організації на цих ділянках наземних точних спектрометричних досліджень, дасть змогу підвищити достовірність та точність післястартового радіометричного калібрування.

5. Створено геоінформаційний шар потенційних тестових ділянок розподіленого контрольно-калібрувального полігону на території України у формі полігонального шейп-файлу засобами геоінформаційної системи. Як основу для векторизованого подання тестових ділянок використано знімки території України сенсорами космічних систем Landsat 8 OLI та "Січ-2". У ручному режимі оцифровані об'єкти правильної форми, як правило, антропогенного походження (відстійник-накопичувач хімічних відходів, заповідник, тощо). Природні ж об'єкти з умовно гомогенним покриттям виокремлені шляхом попередньої класифікації панхроматичного зображення та подальшої автоматичної векторизації отриманого результату класифікації. Описаний диференційований підхід до векторного подання тестових ділянок у геоінформаційній системі у залежності від типу землекористування тестової ділянки дозволяє значно скоротити час і підвищити точність локалізації потенційних тестових ділянок розподіленого контрольно-калібрувального полігону.

1. Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) (<http://earthdata.nasa.gov/data/standards-and-references/processing-levels>)
2. Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) (<http://www.ceos.org>)
3. Zyelyk Ya.I., Yatsenko V.A., Nabivach V.E., Semeniv O.V., Pidgorodetska L.V. Creation of a Calibration Test Site of Subsatellite Support // Journal of Automation and Information Sciences. — 2013. — **45**, Iss. 12. — P.48–65.
4. Zyelyk Ya.I. Information-technological support of post launch calibration of optoelectronic monitoring sensors of "Sich" space system // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. — 2013. — **5**, № 9(65). — P.27–38.
5. Зельик Я.И. Создание средств и разработка методик послестартовой калибровки оптических средств космического наблюдения космической системы "Сич" // Вісник Астрономічної школи. — 2013. — **9**, № 2. — С.93–101.
6. Зельик Я.И., Семенів О.В. Створення геоінформаційної бази даних підсупутникового калібрувального полігону // Вісник Астрономічної школи. — 2014. — **10**, № 2. — С.115–122.
7. Зельик Я.И., Семенів О.В. Геоінформаційна база даних розподіленого контрольно-калібрувального полігону // Вісник Астрономічної школи. — 2015. — **11**, № 2. — С.114–121.

8. *Popov M.O., Stankevich S.A., Zyelyk Ya.I., Sklyar S.V., Semeniv O.V.* Spectral response in-flight estimation of Sich-2 multispectral satellite system // Український журнал дистанційного зондування Землі. — 2014. — № 1. — С.16–17.
9. *Зелик Я.І., Чорний С.В., Коваленко О.О.* Програмне забезпечення для радіометричного калібрування багатоспектральних оптичних систем дистанційного зондування Землі за перехресним методом // XIV Українська конференція з космічних досліджень. Ужгород, 8–12 вересня 2014 р. Тези доповідей конференції. — Київ: ІКД НАН України та ДКА України, 2014. — С.140.
10. *Попов М.О., Станкевич С.А., Зелик Я.І., Шкляр С.В., Семенів О.В.* Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи “Січ-2” за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати // Космічна наука та технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С.59–65.
11. LANDNET Sites (CEOS Reference Sites) [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <http://calvalportal.ceos.org/ceos-landnet-sites>.
12. Test Site Catalog [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://calval.cr.usgs.gov/rst-resources/sites_catalog/ceos-reference-sites.
13. Закон Ламберта [Електронний ресурс]. — Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0
14. *Petland A.* Linear shape from shading // Intl. Comput. Vision. — 1990. — **4**. — P.153–162.
15. Landsat Surface Reflectance Climate Data Records [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20133117>.
16. Landsat Surface Reflectance Climate Data Records [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://pubs.usgs.gov/fs/2013/3117/pdf/fs2013-3117.pdf>.
17. Landsat Surface Reflectance Higher-Level Data Products [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://landsat.usgs.gov/landsat-surface-reflectance-high-level-data-products>.
18. EarthExplorer [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://earthexplorer.usgs.gov>.
19. *Gurol S., Ozen H., Leloglu U. M., Tunali E.* Tuz Golu: New absolute radiometric calibration test site // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. — 2008. — **37**, part B1. — P.35–40.
20. Questionnaire for information regarding the CEOS WGCV IVOS subgroup Cal/Val test sites for land imager radiometric gain. QA4EO-WGCV-IVO-CSP-008. Tuz Golu. Ver. 2.0, CEOS, 2009. — 37 p.
21. *Зацерковний В.І., Бурачек В.Г., Железняк О.О., Терещенко А.О.* Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. — Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2014. — 492 с.
22. ArcGIS 9.0. Начало работы. Руководство пользователя ESRI, New York. — 2004. — 272 с.
23. ArcGIS 9.0. ArcMap. Руководство пользователя ESRI, New York. — 2004. — 558 с.
24. ERDAS Field Guide, Technical Documentation ERDAS INC. — Norcross, GA. — 2009. — 824 p.
25. *Підгородецька Л.В., Зелик Я.І.* Детектування посівів озимих культур за супутниковими даними на основі ґрунтово-адаптивного перпендикулярного вегетаційного індексу // Вісник Астрономічної школи. — 2015. — **11**, № 1. — С.91–98.

Надійшла до редакції 1.10.2016

Прийнята до друку 9.11.2016