

<https://doi.org/10.15407/knit2022.03.017>  
УДК 528.8: 004.9

**К. Г. БІЛОУСОВ**<sup>1</sup>, Голов. конструктор, нач. проектно-конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів

**М. В. НЕЧИПОРУК**<sup>2</sup>, ректор, д-р техн. наук, проф.

**В. С. ХОРОШИЛОВ**<sup>1</sup>, пров. наук. співроб, д-р техн. наук, проф., «Заслужений діяч науки і техніки України»

**Д. М. СВИНАРЕНКО**<sup>3</sup>, проректор з науково-педагогічної роботи, канд. техн. наук, проф.

**Д. К. МОЗГОВИЙ**<sup>3</sup>, доцент, канд. техн. наук

E-mail: m-d-k@i.ua

**В. М. ПОПЕЛЬ**<sup>1</sup>, заст. нач. відділу

E-mail: info@yuzhnoye.com

<sup>1</sup>Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля»  
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

<sup>2</sup> Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»  
вул. Чкалова 17, Харків, Україна, 61000

<sup>3</sup> Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара  
Проспект Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49000

## МЕТОД АВТОМАТИЗОВАНОЇ КОРЕКЦІЇ ПРИЛАДОВИХ СПОТВОРЕНЬ НА БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКАХ «ЛАНДСАТ-7»

*Запропоновано альтернативний метод автоматизованої корекції приладових спотворень сканера ЕТМ+ на багатоспектральних супутникових знімках «Ландсат-7». Метод оснований на використанні фільтрації в області просторових частот із застосуванням швидкого перетворення Фур'є та спектральних масок. Параметри маски визначаються за відомим просторовим періодом завади або експериментально за результатами фільтрації. Для виконання фільтрації на області просторових частот, що підлягають видаленню, накладається фільтрувальна маска, що складається із пікселів з нульовими значеннями. У відфільтрованому зображенні будуть вилучені періодичні компоненти, просторовий період яких відповідає відфільтрованим на фур'є-образі просторовим частотам. Якість фільтрації визначається використовуваною маскою. У випадку використання багатоспектральних знімків маска фільтра, побудована за фур'є-образом одного зі спектральних каналів, використовується для фільтрації інших каналів. Результати візуального аналізу оброблених знімків показали досить якісну корекцію та усунення приладових спотворень сканера ЕТМ+ у порівнянні з іншими методами. Основні переваги запропонованого методу: можливість роботи без використання метаданих та масок приладових спотворень; робота з одноканальними і багатоспектральними знімками; можливість роботи з невеликими фрагментами сцени; мінімальна кількість ручних налаштувань для процедур обробки; можливість роботи без додаткових знімків за інші дати; висока стійкість використовуваних алгоритмів при використанні знімків з різних супутників; досить добра повторюваність результатів на супутникових знімках, зроблених у різні сезони та для різних територій. Експериментальне тестування запропонованого методу на великій кількості знімків також підтвердило добру повторюваність і високу стійкість використовуваних алгоритмів. Розроблену технологію можна також успішно використовувати для корекції приладових просторово-періодичних спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів.*

**Ключові слова:** супутник «Ландсат-7», сканер ЕТМ+, багатоспектральні знімки, приладові спотворення, швидке перетворення Фур'є, спектральні маски.

Цитування: Білоусов К. Г., Нечипорук М. В., Хорошилов В. С., Свиноренко Д. М., Мозговий Д. К., Попель В. М. Метод автоматизованої корекції приладових спотворень на багатоспектральних супутникових знімках «Ландсат-7». *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 3 (136). С. 17—28. <https://doi.org/10.15407/knit2022.03.017>

## ВСТУП

В останні роки супутникова зйомка стала найбільш масовим і доступним джерелом просторових даних у багатьох сферах людської діяльності завдяки своїм численним перевагам у порівнянні з наземними методами спостережень [4, 12, 19].

До таких переваг належать:

- максимальна об'єктивність і вірогідність (супутникові знімки дозволяють повністю виключити помилки людей, а також навмисне перекручування або замовчування важливої інформації);
- широка оглядовість і висока інформативність (можливе спостереження будь-якої, навіть важкодоступної території на Землі з охопленням у тисячі кілометрів);

- максимальна актуальність і висока оперативність (можливість доставки даних користувачам без затримки — безпосередній прийом на абонентські станції);
- висока періодичність зйомки (до декількох знімків на добу);
- багатодисциплінарність (використання тих самих знімків при рішенні широкого спектру наукових і прикладних завдань в інтересах різних державних структур і приватних компаній);
- багатоспектральний характер спостережень (зйомка в декількох спектральних каналах у видимому та ІЧ-діапазонах);
- абсолютна безпека (відсутність ризиків для здоров'я і життя людей у порівнянні з наземними методами);
- висока економічна ефективність (істотно менші витрати порівняно з наземними методами);

Таблиця 1. Основні технічні характеристики супутника «Ландсат-7»

Показник	Значення
Дата / місце запуску супутника	15 квітня 1999 р. / авіабаза Ванденберг (США)
Розробник / оператори	Lockheed Martin / NASA, NOAA, USGS (США)
Маса спутника / термін експлуатації	2200 кг / 7 років
Тип / висота / нахил орбіти	Сонячно-синхронна / 705 км / 98.2°
Період орбіти / час проходження екватора	99 хв / 10:00 – 10:15 (низхід. вузол)
Діаметр апертури / фокусна відстань	40.6 см / 243.8 см
Смуга захвату / періодичність зйомки	185 км / 16 діб
Тип / об'єм бортового накопичувача	SSD / 378 Гбіт

Таблиця 2. Основні технічні характеристики оптико-механічного сканера ETM+

Канал	Спектральний діапазон	Довжина хвилі, мкм	Тип / кількість детекторів	Мінімальне відношення сигнал / шум	Просторове розрізнення, м
B1 (VNIR)	Видимий (синій)	0.45...0.52	SiPD / 16	32	30
B2 (VNIR)	Видимий (зелений)	0.53...0.61	SiPD / 16	35	30
B3 (VNIR)	Видимий (червоний)	0.63...0.69	SiPD / 16	26	30
B4 (VNIR)	Ближній інфрачервоний	0.78...0.90	SiPD / 16	32	30
B5 (SWIR)	Короткохвильовий інфрачервоний	1.55...1.75	InSb / 16	25	30
B6 (TIR)	Тепловий інфрачервоний	10.4...12.5	HgCdTe / 8	н.д.	60
B7 (SWIR)	Короткохвильовий інфрачервоний	2.09...2.35	InSb / 16	17	30
B8 (PAN)	Панхроматичний	0.52...0.90	SiPD / 32	15	15

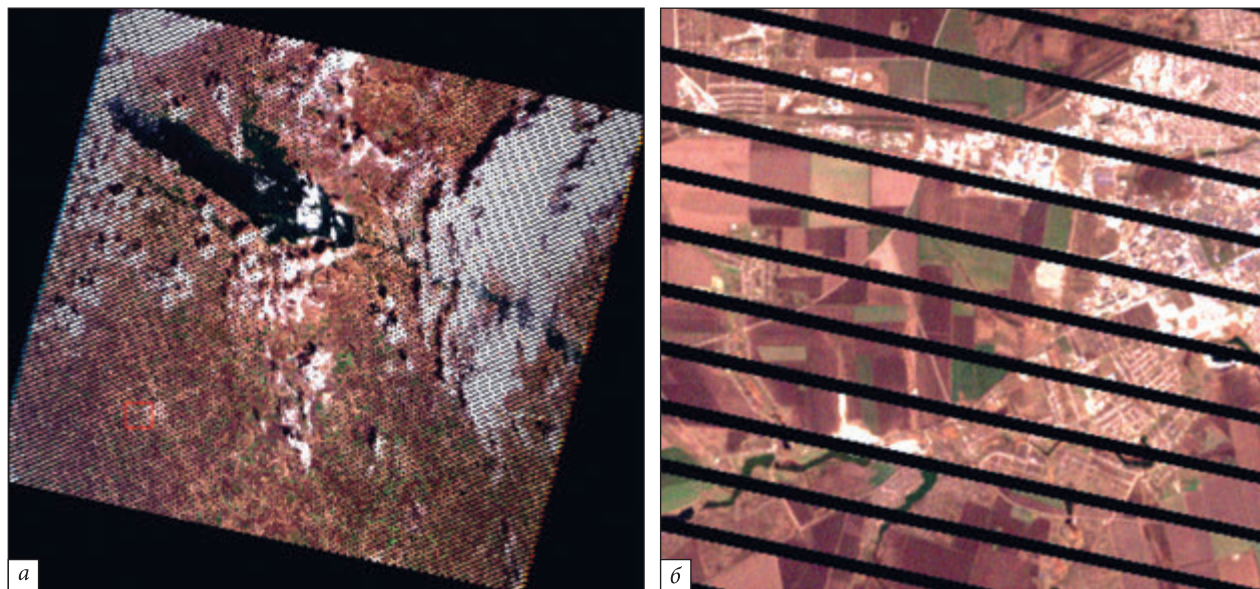


Рис. 1. Знімок із супутника «Ландсат-7» за 28 березня 2020 р. (а — повна сцена, б — збільшений фрагмент)

- максимальна доступність (простота одержання даних і відсутність юридичних або політичних бар'єрів);

- висока конфіденційність (таємність зйомки і мінімізація ризиків витоку інформації).

Додатковою істотною перевагою використання даних ДЗЗ є відкритий і безкоштовний доступ до багатоспектральних і радарних супутникових знімків середнього просторового розрізнення «Ландсат-7», «Ландсат-8», «Sentinel-1A/B», «Sentinel-2A/B» та ін. Це сприяло широкому використанню цих знімків для вирішення широкого кола науково-прикладних задач [1, 11, 14].

#### ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Для оцінки антропогенних і природних змін земного покриву досить часто використовуються архівні супутникові знімки, отримані за допомогою оптико-механічних сканерів [7, 13, 20]. Відмінною рисою таких знімків є різні приладові геометричні та радіометричні завади та спотворення. Одним з видів приладових спотворень є радіометричні завади із просторово-періодичною структурою. Ці спотворення можуть бути викликані різними факторами, серед яких можна виділити такі:

- технічні збої в системах формування, обробки і передачі даних (супутники «Ландсат-3», «Ландсат-5»);

- значний розкид значень чутливості та нелінійності фотоелементів давача (супутник «Океан-О»);

- різні значення коефіцієнтів підсилення і динамічного діапазону елементів підсилювального тракту (супутник «Січ-1»);

- несправності механічних елементів бортового багатоспектрального оптико-механічного сканера (супутник «Ландсат-7»).

З перерахованих вище супутників на теперішній час на орбіті функціонує тільки американський супутник ДЗЗ середнього просторового розрізнення «Ландсат-7» [23, 24, 30], запущений в 1999 р. (табл. 1). Бортовим знімальним приладом на цьому супутнику є багатоспектральний оптико-механічний сканер ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) (табл. 2).

31 травня 2003 р. на цьому супутнику відмовив коректор смуги охопту видошукача SLC (Scan Line Corrector) — один із ключових елементів основної системи формування зображення ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus). Внаслідок цієї поломки майже на всій площі знім-



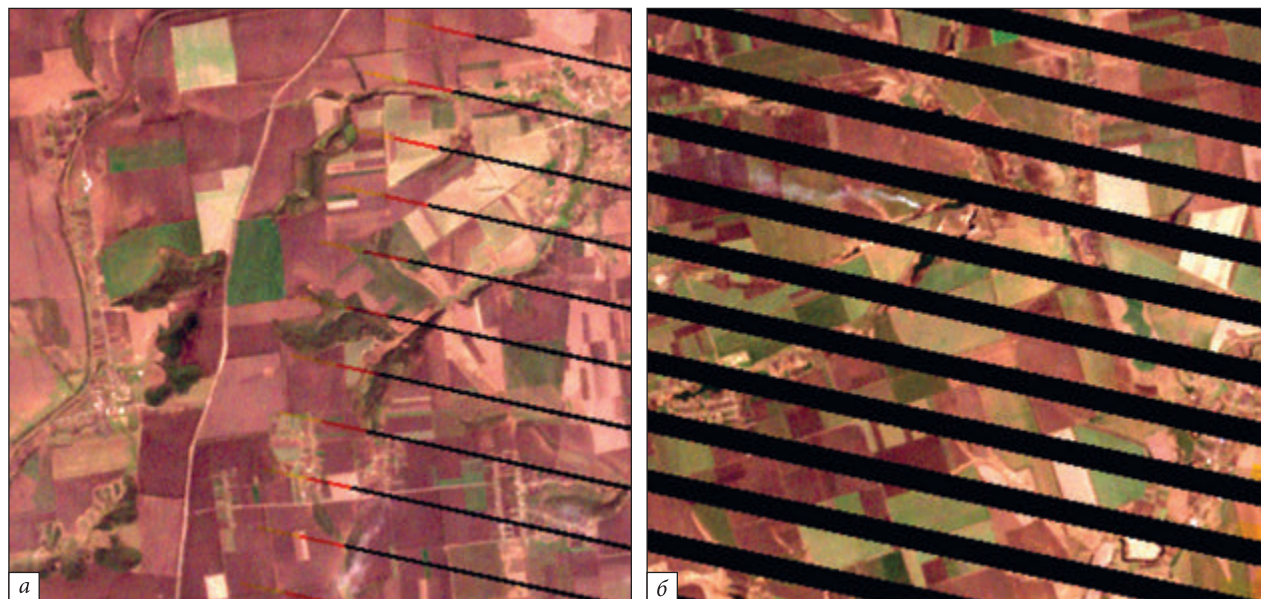


Рис. 2. Фрагменти знімка із супутника «Ландсат-7» за 20 березня 2020 р. (а — центр сцени, б — край сцени)

ка в усіх спектральних каналах, крім теплового, з'явилися характерні похилі чорні смуги, що розширюються до краю сцени (рис. 1). Неспотвореною залишається тільки вузька частина зображення у центрі сцени (рис. 2).

#### МОЖЛИВІ ШЛЯХИ РІШЕННЯ

Сучасні програмні пакети обробки супутникових знімків мають широкий набір інструментів для усунення різних видів спотворень та завад різного походження. Однак використання стандартних конволюційних і морфологічних фільтрів для усунення завад із просторово-періодичною структурою на геоприв'язаних зображеннях є малоефективним. Рангові, мажоритарні і медіанні фільтри не забезпечують достатнього усунення завад. Низькочастотні фільтри зменшують просторове розрізнення знімка, а напрямлені фільтри вносять значні нелінійні радіометричні спотворення.

Найбільш ефективні алгоритми усунення приладових завад працюють тільки з ненормалізованими зображеннями, які зберігають вихідну рядкову структуру (тобто не підданими ресемплінгу при геометричній корекції та географічній прив'язці). Однак багатоспектральні знімки се-

реднього просторового розрізнення зі супутника «Ландсат-7» поставляються користувачам тільки в нормалізованому виді (тобто підданими ресемплінгу).

Для корекції приладових спотворень на знімках зі супутника «Ландсат-7» було розроблено багато методів і алгоритмів [16–18, 22, 25, 26, 29, 31], які були програмно реалізовані на різних мовах програмування (C++, Python, IDL та ін.). Ці алгоритми були включені у популярні програми обробки супутникових знімків (ERDAS, ENVI та ін.), а також у ГІС-пакети (ArcGIS, QGIS та ін.). Однак всі ці алгоритми мали істотні недоліки:

- необхідність використання готових масок приладових спотворень;
- робота тільки із цілою сценою (великий час обробки);
- велика кількість ручних налаштувань для процедур обробки;
- використання додаткових знімків по цій же території за інші найближчі дати, що не завжди можливо через наявність на них хмарності або снігового покриву (рис. 3).

Крім того, заміна відсутніх ділянок однієї сцени непошкодженими ділянками з інших сцен

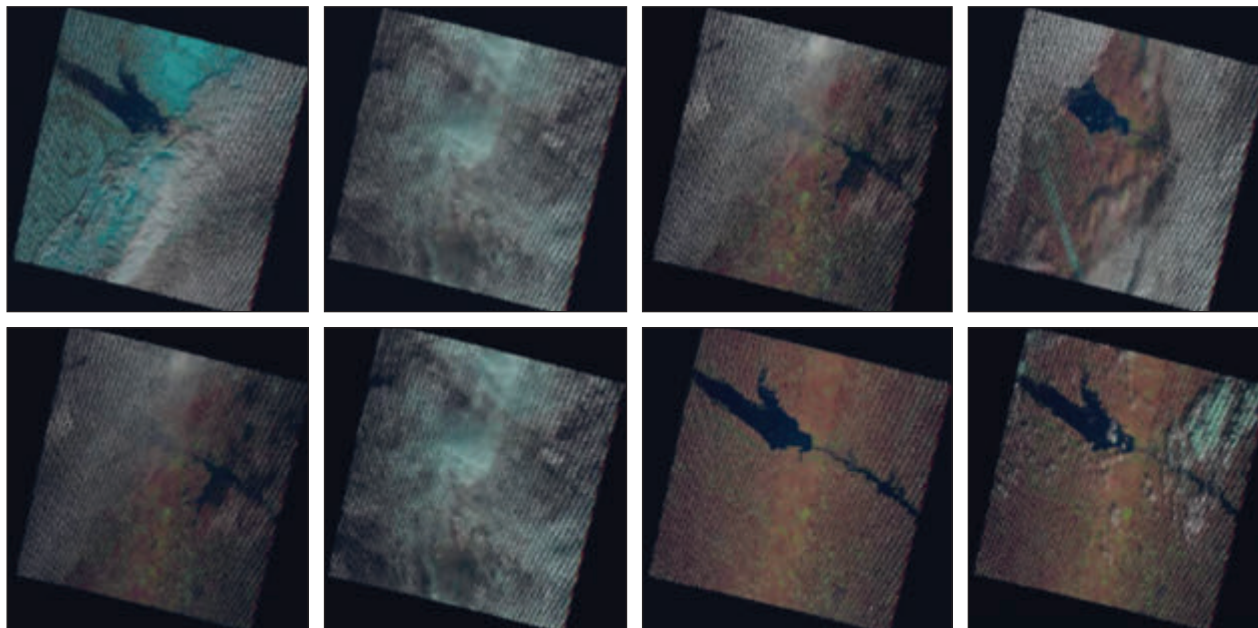


Рис. 3. Знімки із супутника «Ландсат-7», отримані у період грудень 2019 р. — березень 2020 р. (тільки одна сцена без хмарності й снігового покриву)

неприпустима для наземних об'єктів, які мають високу динаміку змін у часі (рослинність, водойми, сніговий і льодовий покрив та ін.).

Перераховані вище недоліки наявних методів не дозволяють або істотно обмежують їхнє використання у сучасних веб-сервісах онлайн-обробки супутникових знімків.

### ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основним завданням проведених досліджень є розробка та експериментальне тестування методів і алгоритмів усунення завад із просторово-періодичною структурою на супутникових знімках.

Основні вимоги до розроблюваних методів і алгоритмів:

- можливість роботи без використання метаданих та масок приладових спотворень;
- робота з одноканальними та багатоспектральними знімками;
- можливість роботи з невеликими фрагментами сцени, що особливо актуально для онлайн-сервісів обробки та візуалізації даних ДЗЗ;
- мінімальна кількість ручних налаштувань для процедур обробки;

- можливість роботи без додаткових знімків за інші дати;
- висока стійкість алгоритмів при використанні знімків з різних супутників;
- добра повторюваність на супутникових знімках, зроблених у різні сезони і для різних територій;
- можливість використання розроблених методів для корекції приладових просторово-періодичних спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів.

### ЗАПРОПОНОВАНІ МЕТОДИ

Для здійснення ефективної фільтрації просторово-періодичних приладових завад оптико-механічного сканера ETM+ в області просторових частот використано дискретне двовимірне перетворення Фур'є [9]:

1) виконується перехід від просторового подання  $f(x, y)$  до просторово-частотного  $F(u, v)$  шляхом прямого двовимірного дискретного перетворення Фур'є:

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [f(x, y) \exp(-i 2\pi u x / M - i 2\pi v y / N)],$$



де  $M$  і  $N$  — кількість пікселів вихідного зображення по горизонталі та вертикалі відповідно,  $i$  — уявна одиниця,  $u, v$  — змінні просторових частот;

2) виконується фільтрація (видалення періодичної завади) у частотній області шляхом множення вихідного спектра  $F(u, v)$  на передатну функцію фільтра  $H(u, v)_{\text{фільтр}}$  (маску з нульовими значеннями в області просторових частот перешкоди  $u_{\text{зав}}$ ,  $v_{\text{зав}}$  і одиничними в іншій області просторових частот):

$$F(u, v)_{\text{фільтр}} = F(u, v) * H(u, v)_{\text{фільтр}};$$

3) виконується зворотне двовимірне дискретне перетворення Фур'є для повернення від просторово-частотного подання  $F(u, v)_{\text{фільтр}}$  до просторового  $f(x, y)_{\text{фільтр}}$ :

$$f(x, y) = (MN)^{-1} \times \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} [F(u, v) \exp(i2\pi ux / M + i2\pi vy / N)],$$

де  $x = \{1 \dots M\}$ ;  $y = \{1 \dots N\}$  — піксельні координати елементів вихідного цифрового зображення по горизонталі та вертикалі відповідно.

Параметри маски  $H(u, v)_{\text{фільтр}}$  визначаються за відомим просторовим періодом завади або експериментально за результатами фільтрації [28].

Для прискорення розрахунків використовується алгоритм швидкого дискретного перетворення Фур'є, який при  $N$  відліках зменшує кількість пар операцій множення/ділення з  $2N^2$  до  $N \log_2 N$ . Перед його використанням піксельний розмір зображення приводиться до квадрата з піксельним розміром  $2^n \times 2^n$  шляхом виділення частини зображення або доповнення пікселями з нульовими значеннями. Змінні просторових частот  $u, v$  приймають як позитивні, так і негативні значення, які розташовуються на образі Фур'є симетрично відносно початку координат, що вимагає відповідної симетрії при накладенні маски [10]. За потреби паралельно з фільтрацією просторово-періодичних завад можна виконати низькочастотну або високочастотну фільтрацію шляхом додавання відповідних масок.

У відфільтрованому зображенні будуть вилучені періодичні компоненти, просторовий період яких відповідає відфільтрованим на Фур'є-образі просторовим частотам. Якість фільтрації визначається використовуваною маскою [8].

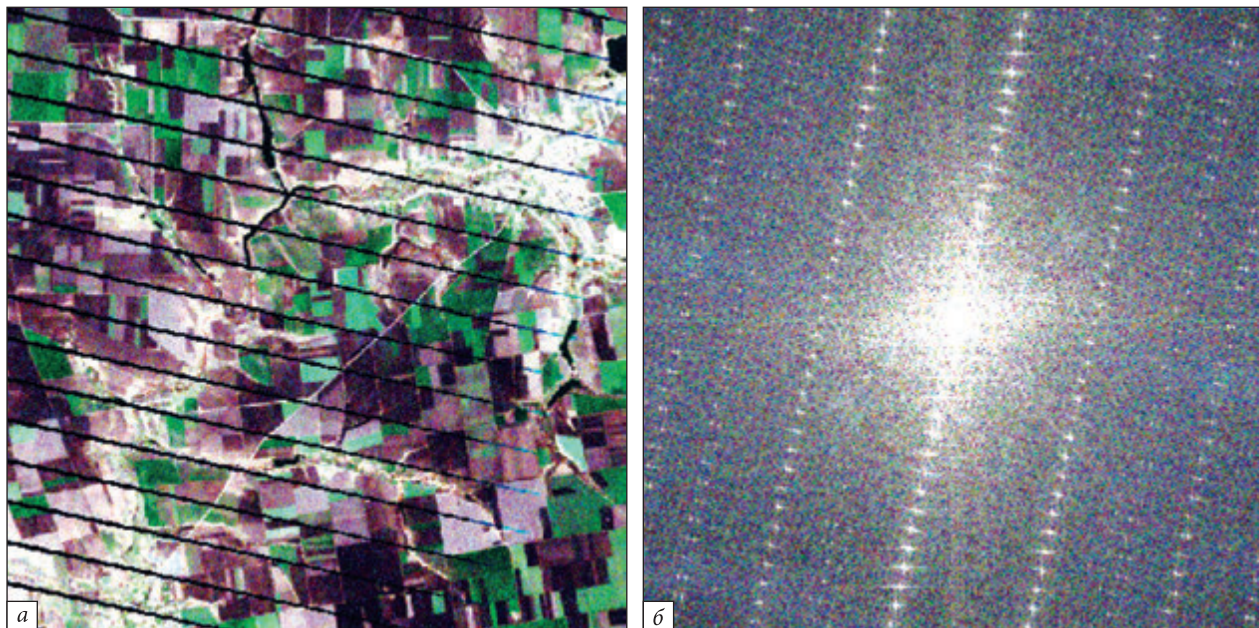


Рис. 4. Фрагмент знімка із супутника «Ландсат-7» за 12 березня 2020 р. розміром  $512 \times 512$  пкл (а) і його фур'є-образ (б)

У випадку використання багатоспектральних знімків маска фільтра, побудована за фур'є-образом одного зі спектральних каналів, використовується для фільтрації інших каналів.

#### ВХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як вхідні дані використовувались фрагменти безхмарних ділянок, вирізаних з багатоспектральних знімків різних територій земної поверхні, отриманих зі супутника «Ландсат-7» за період з 2003 по 2020 рр. Для досліджень було використано спектральні канали видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів, а також панхроматичний канал. Ділянки обиралися поряд з непошкодженими частинами сцени.

#### ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

На рис. 1 наведено результати обробки знімка із супутника «Ландсат-7» за 28 березня 2020 р. Оскільки знімок мав ділянки, покриті хмарністю, то для тестування було обрано кілька фрагментів розміром  $512 \times 512$  пкл з різних місць сцени. Одну з обраних ділянок показано на рис. 5 (ліворуч).

Отриманий у результаті двовимірного прямого перетворення фур'є-образ  $F(u, v)$  для відображення в режимі 256 градацій сірого піддається нормалізації (амплітудному масштабуванню) [6].

Нормалізований образ  $F(u, v)_{\text{норм}}$  (рис. 4, б) відображає щільність розподілу просторових частот в оброблюваному масиві.

Результати фільтрації при використанні різних масок наведено на рис. 5. Як видно, при фільтрації з використанням швидкого двовимірного дискретного перетворення Фур'є усунення завад також зв'язано зі зниженням просторового розрізнення та радіометричними спотвореннями, але в істотно меншому ступені, ніж при використанні конволюційних фільтрів [27].

Кращу фільтрацію завад при мінімальних артефактах забезпечила клиноподібна маска (рис. 5, в). Для корекції радіометричних спотворень, внесених безпосередньо дискретним перетворенням Фур'є, виконується операція вирівнювання гістограми з використанням вихідного знімка як еталону [5].

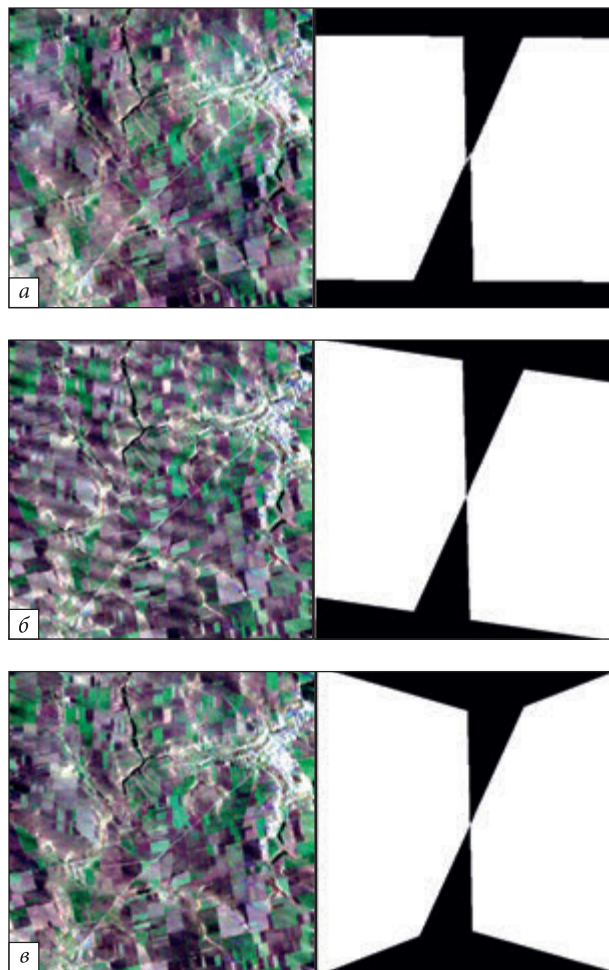


Рис. 5. Результати фільтрації обраного фрагмента знімка (ліворуч) і використані для фільтрації маски (праворуч)

Результати обробки багатоспектральних знімків зі супутника «Ландсат-7» для інших територій і дат зйомки також підтвердили досить високу ефективність запропонованого методу фільтрації порівняно із традиційними.

Основне обмеження при застосуванні запропонованого методу таке ж, як і для інших методів фільтрації завад, які використовують методи інтерполяції. Воно полягає в суттєвому зростанні похибки інтерполяції при збільшенні інтервалу пропуску даних. Тому запропонований метод є найбільш ефективним для фільтрації завад на ділянках, які розташовані поблизу центральної частини сцени і які мають незначні пошкодження.



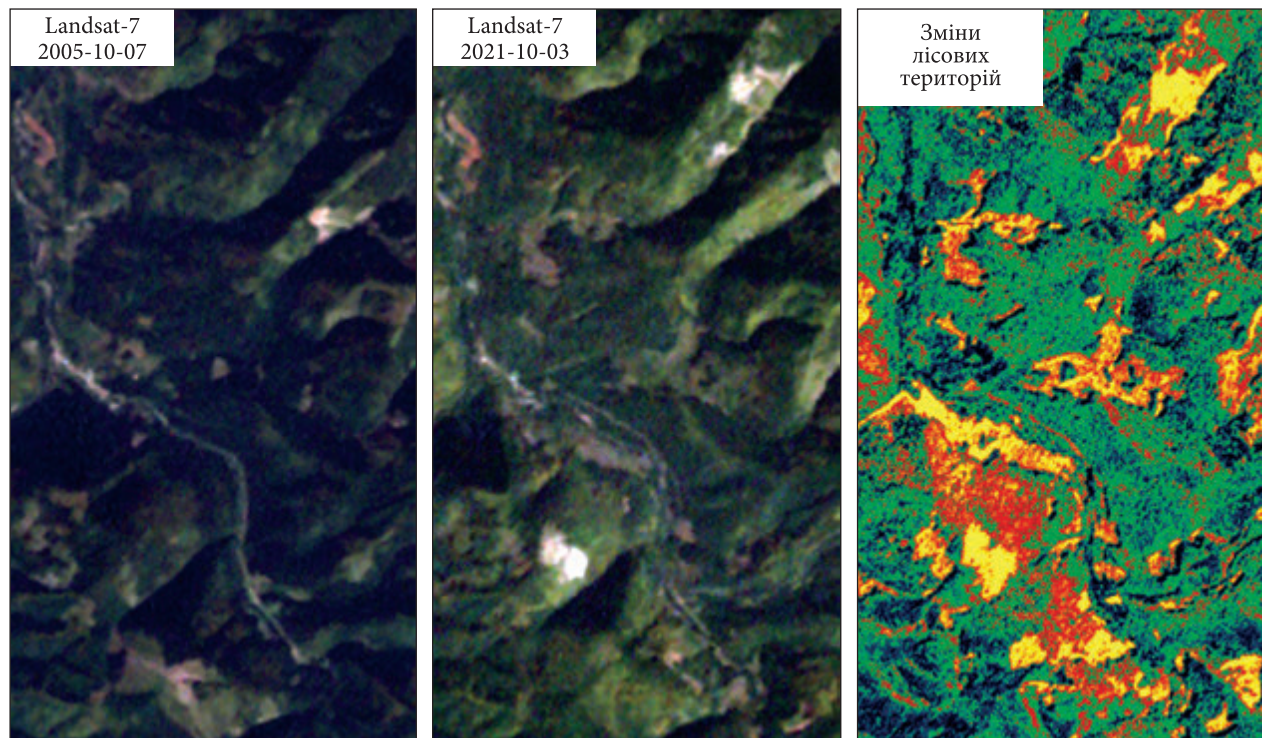


Рис. 6. Приклад використання знімків супутника «Ландсат-7» для оцінювання наслідків масових вирубувань диких лісів на території Карпат

### ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ

Область практичного застосування запропонованої методики досить велика, оскільки архівні багатоспектральні супутникові знімки, отримані зі сканера ETM+ супутника «Ландсат-7», дуже широко використовуються для оцінки антропогенних і природних змін земного покриття [15, 21]. Зокрема, слід зазначити важливий та вкрай актуальний для України напрямок використання відкритих архівних даних ДЗЗ для оцінювання наслідків масових вирубувань диких лісів на території Карпат (рис. 6).

Додатковою перевагою запропонованої методики є те, що розроблена технологія також з успіхом може використовуватися для корекції приладових просторово-періодичних спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів.

### ВИКОРИСТАННЯ В ОСВІТНЬОМУ ПРОЦЕСІ

Матеріали досліджень було використано при підготовці лекційних і лабораторних занять,

включених до складу учбово-методичного комплексу «Обробка архівних багатоспектральних супутникових знімків зі сканера ETM+ супутника «Ландсат-7», що викладається студентам старших курсів Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара в рамках навчальної дисципліни «Системи ДЗЗ», а також використовується при написанні курсових і дипломних робіт. У ході лабораторних робіт студентами ведеться експериментальне відпрацювання і тестування запропонованої методики з використанням архівних знімків різних ділянок Землі, отриманих зі супутника «Ландсат-7».

### НАПРЯМКИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Одним з перспективних напрямків подальших досліджень є удосконалення даної методики з метою зменшення обчислювальних витрат під час обробки супутникових знімків.

Це можливо реалізувати шляхом заміни швидкого двовимірного дискретного перетворення Фур'є на швидке двовимірне дискретне пере-



творення Хартлі [2, 3]. Завдяки цьому можливе суттєве зниження вимог до обсягу необхідної оперативної пам'яті комп'ютера, значне підвищення оперативності обробки супутникових знімків, а також деяке спрощення процедури побудови масок фільтрів.

## ВИСНОВКИ

Запропоновано альтернативний метод корекції приладових спотворень сканера ЕТМ+ на багатоспектральних супутникових знімках «Ландсат-7» з використанням швидкого перетворення Фур'є. Основні переваги запропонованого методу: можливість роботи без використання масок приладових завад; робота з одноканальними та багатоспектральними знімками; можливість роботи з невеликими фрагментами сцени; мінімальна кількість ручних налаштувань для проце-

дур обробки; можливість роботи без додаткових знімків за інші дати; висока стійкість алгоритмів при використанні знімків з різних супутників; досить добра повторюваність результатів на супутникових знімках, зроблених у різні сезони та для різних територій. Експериментальне тестування запропонованого методу на великій кількості знімків та результати візуального аналізу оброблених знімків показали досить якісне видалення приладових спотворень сканера ЕТМ+ у порівнянні з іншими методами. Найефективнішої фільтрації завад було досягнуто на ділянках, розташованих поблизу центральної частини сцени. Розроблену технологію можна використовувати для корекції приладових спотворень на архівних супутникових знімках, отриманих за допомогою інших оптико-механічних сканерів (супутники «Ландсат-5», «Океан-О» та ін.).

## ЛІТЕРАТУРА

1. Артюшенко М. В., Томченко О. В. Перколяційна модель для контролю над поширенням заражень лісу за зображеннями з космічних апаратів. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 4. С. 45—56.
2. Брейсуэлл Р. *Преобразование Хартли. Теория и приложения*. М.: Мир, 1990.
3. Злобин С. Л., Стальной А. Я. Двумерное быстрое преобразование Хартли в цифровой обработке изображений. *Тр. РНТОРЭС им. А. С. Попова*. 2000. **2**. С. 114—116.
4. Макаров О. Л., Білоусов К. Г., Свиначенко Д. Н. та ін. Автоматизоване розпізнавання міської рослинності та водойм за знімками супутника «Jilin-1A». *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 4. С. 42—53.
5. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Эффективная фильтрация пространственно-периодических помех на архивных снимках. *Космічна наука і технологія*. 2014. № 4. С. 14—21.
6. Макаров А. Л., Мозговой Д. К., Хорошилов В. С. и др. Эффективный метод фильтрации приборных помех на снимках от оптико-механических сканеров. V-й Междунар. форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». 14—17 октября 2014 г., Харьков, ХНУРЭ. Т. 1. Тр. конф. «Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии». С. 105—108.
7. Маслей В. Н., Мозговой Д. К., Белоусов К. Г. и др. Методика оценки последствий добычи янтаря по многоспектральным спутниковым снимкам. *Космічна наука і технологія*. 2016. **22**, № 6. С. 26—36.
8. Мозговой Д. К. Применение комбинированных масок для фильтрации периодических помех. *Прикладна геометрія та інженерна графіка*. 2008. С. 175—179.
9. Мозговой Д. К., Волошин В. І. Фільтрація просторово-періодичних приладових завад на супутникових знімках. *Праці Таврійської державної агротехнічної академії*. Вип. 4. Прикладна геометрія та інженерна графіка. 2003. **20**. С. 71—75.
10. Мозговой Д. К., Волошин В. И., Бушуев Е.И. Фильтрация радиометрических помех с пространственно-периодической структурой. *Проблемы управления и информатики*. 2004. № 3. С. 97—106.
11. Омелич І. Ю., Яременко А. А., Непошивайленко Н. О., Горай І. В. Визначення тенденцій розвитку рослинного покриву на підставі розрахунку нормалізованого вегетаційного індексу на прикладі Петриківського району Дніпропетровської області. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2019. № 23. С. 9—13.
12. Попов М. А., Лялько В. И., Станкевич С. А. Национальная система дистанционного зондирования Земли: поиск рациональных решений. *Космічна наука і технологія*. 2019. **25**, № 6. С. 39—50.
13. Федоровський О. Д., Зуб Л. М., Дьяченко Т. М. та ін. Дистанційне оцінювання екологічного стану водойм на основі багатомірної щільності розподілу площ біотопів на прикладі Київського водосховища. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5. С. 38—47.

14. Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я., Яйлимова Г. О. та ін. Супутниковий моніторинг посівів по Україні. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 6. С. 27—37.
15. Яйлимов Б. Я., Лавренюк М. С., Шелестов А. Ю., Колотій А. В., Яйлимова Г. О., Федоров О. П. Методи визначення істотних змінних для оцінки стану земного покриву. *Космічна наука і технологія*. 2018. **24**, № 4. С. 24—37.
16. DesripeLandsat-7 ETM+. URL: <https://blamannen.wordpress.com/2011/07/12/etm-some-thoughts> (дата звернення: 30.11.2021).
17. Filling the Gaps to use in Scientific Analysis. URL: [http://landsat.usgs.gov/sci\\_an.php](http://landsat.usgs.gov/sci_an.php) (дата звернення: 30.11.2021).
18. Gap Fill for Landsat 7 images - A correction of SLC-off / Luis Vega Bustillos, Environmental Engineer DATE: July 2012.
19. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Spirintsev V. V., Udovyk I. M. All-weather monitoring of oil and gas production areas using satellite data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 6. P. 137—143.
20. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliiev V. V., Kavats O. O. Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 2. P. 99—105.
21. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliiev V. V. Satellite monitoring of deforestation as a result of mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. № 5. P. 94—99.
22. How to fill gaps in Landsat ETM images. URL: <https://yceo.yale.edu/landsat-etm-images> (дата звернення: 30.11.2021).
23. Landsat 7 ETM+ Satellite Sensor. URL: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat> (дата звернення: 30.11.2021).
24. Landsat 7 Data Users Handbook / Department of the Interior U.S. Geological Survey, Version 2.0. EROS, Sioux Falls, South Dakota, 2019.
25. Landsat SLC-off: пропущені смуги не відновити? URL: <https://gis-lab.info/forum/viewtopic.php?t=4357> (дата звернення: 30.11.2021).
26. Landsat 7 Satellite SLC Gap Fill Methodology. URL: [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/SLC\\_Gap\\_Fill\\_Methodology.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf) (дата звернення: 30.11.2021).
27. Mozgovoy D., Tsarev R., Svinarenko D., Danichev A., Karnaukhov A. Instrumental Distortion Correction Method for the ETM + Scanner on Landsat-7 Multispectral Satellite Images. *Int. J. Engineering Research and Technology*. 2020. **13**(12). P. 4799—4803.
28. Mozgovoy D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I. Filtration of Radiometric Interference with a Space-Periodic Structure. *J. Automation and Inform. Sci.* **36**. і6.20. P. 14—22.
29. Removing stripes from Landsat-7 SLC OFF images. URL: <https://community.esri.com/thread/164902> (дата звернення: 30.11.2021).
30. Satellite Missions Database. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-7> (дата звернення: 30.11.2021).
31. SLC-off Products: Background. Obtenido de USGS — Landsat Missions. URL: [http://landsat.usgs.gov/using\\_Landsat\\_7\\_data.php](http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_data.php) (дата звернення: 30.11.2021).

## REFERENCES

1. Artyushenko M. V., Tomchenko O. V. (2020). Percolation model to control the distribution of forest infections on images from space vehicles. *Space Sci. & Technol.*, **26**, № 4 (125), 45—56.
2. Brejsuell R. (1990). *Hartley transform. Theory and applications*. M.: Mir (in Russian)
3. Zlobin S. L., Stal'noj A. Ya. (2004). Two-dimensional Fast Hartley Conversion in digital image processing. *Proc. of A.S. Popov RSTSREEC*, **2**, 114—116 (in Russian).
4. Makarov O. L., Bilousov K. G., Svinarenko D. N., Khoroshilov V. S., Mozgovoy D. K., Popel V. M. (2021). Automated recognition of urban vegetation and water bodies by Jilin-1A satellite images. *Space Sci. & Technol.*, **27**, № 4, 42—53. <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.042>
5. Makarov A. L., Mozgovoy D. K., Horoshilov V. S., Balashov V. N., Maslyey D. V., Popel' V. M. (2014). Efficient filtering of space-periodic distortions on archive images. *Kosm. nauka tehnol.*, **20**, № 4, 14—21. <https://doi.org/10.15407/knit2014.04.014>.
6. Makarov A. L., Mozgovoy D. K., Khoroshilov V. S., et al. (2014). Effective Method Filtration of Attachments on Snacks from Opto-Mechanical Scanners. The V Int. Forum “Applied radioelectronics. Share and prospects for development”, 14—17 October 2014., Kharkiv, KNURE. Vol. 1. Conference “Integrated information radio-electronic system and technologies”, 105—108.
7. Maslej V. N., Mozgovoy D. K., Bilousov K. G., Horoshilov V. S., Bushanska O. S., Galich N. G. (2016). Methods of the impact evaluation of amber mining by multispectral satellite images. *Space Sci. & Technol.*, **22**, № 6, 26—36.
8. Mozgovoy D. K. (2008). Consigned combined masks for filtration of periodic interference. Interagency scientific and technical collection “Applied geometry and engineering graphics”. K.: Ukrainian Association of Applied Geometry, 175—179.

9. Mozgovij D. K., Voloshin V. I. (2003). Filtration of spatial-periodic devices for satellite images. *Publ. Taurian State Agrotechnical Academy. № 4. Applied geometry and engineering graphics*, **20**, 71–75.
10. Mozgovoy D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I. (2004). Filtration of radiometric interference with a space-periodic structure. *Problems of Control and Informatics*, № 3, 97–106.
11. Omelych I., Yaremenko A., Neposhyvailenko N., Ghoraj I. (2019). Determination of vegetation cover trends based on the calculation of the normalized vegetation index on the example of Petrykivskiyi district of Dnipropetrovsk region. *Ukrainian J. Remote Sensing*, № 23, 9–13.
12. Popov M. O., Lyal'ko V. I., Stankevich S. A. (2019). Ukrainian national system for Earth's remote sensing: look for efficient solutions. *Space Sci. & Technol.*, **25**, № 6, 39–50.
13. Fedorovskiy O. D., Zub L. N., Dyachenko T. N., Tomchenko O. V., Khyzhniak A. V., Yakymchuk V. H. (2020). Remote assessment of the ecological state of water bodies based on the multidimensional density distribution of biotope areas on the example of the Kyiv reservoir. *Space Sci. & Technol.*, **26**, № 5 (126), 38–47.
14. Shelestov A. Yu., Yailymov B. Ya., Yailymova H. O., Bilokonska Y. V., Nivievskiy O. V. (2020). Satellite crop monitoring for Ukraine. *Space Sci. & Technol.*, **26**, № 6 (127), 27–37. <https://doi.org/10.15407/knit2020.06.027>
15. Yailymov B. Ya., Lavreniuk M. S., Shelestov A. Yu., Kolotii A. V., Yajlymova G. O., Fedorov O. P. (2018). Methods of essential variables determination for the Earth's surface state assessing. *Space Sci. & Technol.*, **24**, № 4, 24–37. <https://doi.org/10.15407/knit2018.04.026>
16. DestrifeLandsat-7 ETM+. URL: <https://blamannen.wordpress.com/2011/07/12/ etm-some-thoughts> (Last accessed: 30.11.2021).
17. Filling the Gaps to use in Scientific Analysis. URL: [http://landsat.usgs.gov/sci\\_an.php](http://landsat.usgs.gov/sci_an.php) (Last accessed: 30.11.2021).
18. Gap Fill for Landsat 7 images — A correction of SLC-off / Luis Vega Bustillos, Environmental Engineer DATE: July 2012.
19. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Spiritsev V. V., Udovik I. M. (2019). All-weather monitoring of oil and gas production areas using satellite data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 6, 137–143.
20. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliiev V. V., Kavats O. O. (2017). Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 2, 99–105.
21. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Vasyliiev V. V. (2017). Satellite monitoring of deforestation as a result of mining. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, № 5, 94–99.
22. How to fill gaps in Landsat ETM images. URL: <https://yceo.yale.edu/landsat-etm-images> (Last accessed: 30.11.2021).
23. Landsat 7 ETM+ Satellite Sensor. URL: <https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/other-satellite-sensors/landsat> (Last accessed: 30.11.2021).
24. Landsat 7 Data Users Handbook / Department of the Interior U.S. Geological Survey, Version 2.0. EROS, Sioux Falls, South Dakota, 2019.
25. Landsat SLC-off: propushcheni smugi ne vidnoviti? URL: <https://gis-lab.info/forum/viewtopic.php?t=4357> (Last accessed: 30.11.2021).
26. Landsat 7 Satellite SLC Gap Fill Methodology. URL: [https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/SLC\\_Gap\\_Fill\\_Methodology.pdf](https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf) (Last accessed: 30.11.2021).
27. Mozgovoy D., Tsarev R., Svinarenko D., Danichev A., Karnaukhov A. (2020). Instrumental Distortion Correction Method for the ETM + Scanner on Landsat-7 Multispectral Satellite Images. *Int. J. Engineering Research and Technology*, **13**(12), 4799–4803.
28. Mozgovoy D. K., Voloshin V. I., Bushuev E. I. Filtration of Radiometric Interference with a Space-Periodic Structure. *J. Automation and Inform. Sci.*, **36**. i6.20, 14–22.
29. Removing stripes from Landsat-7 SLC OFF images. URL: <https://community.esri.com/thread/164902> (Last accessed: 30.11.2021).
30. Satellite Missions Database. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/l/landsat-7> (Last accessed: 30.11.2021).
31. SLC-off Products: Background. Obtenido de USGS — Landsat Missions. URL: [http://landsat.usgs.gov/using\\_Landsat\\_7\\_data.php](http://landsat.usgs.gov/using_Landsat_7_data.php) (Last accessed: 30.11.2021).

Стаття надійшла до редакції 31.01.2022  
Після доопрацювання 31.01.2022  
Прийнято до друку 14.04.2022

Received 31.01.2022  
Revised 31.01.2022  
Accepted 14.04.2022



*K. H. Bilousov*<sup>1</sup>, Chief Designer – Head of the Design Office of Spacecraft and Sites System Engineering

*M. V. Nechyporuk*<sup>2</sup>, Rector of National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Dr. Sci. in Tech., Professor

*V. S. Khoroshylov*<sup>1</sup>, Leading Researcher, , Dr. Sci. in Tech., Head of Department in the Design Office of Spacecrafts and Sites System Engineering, «Honored Worker of Science and Technology of Ukraine»

*D. M. Svyntarenko*<sup>3</sup>, Vice-rector for Scientific and Pedagogic Work, Ph. D. in Tech., Professor at the Department of Telecommunication Systems and Networks

*D. K. Mozgovoy*<sup>3</sup>, Associate Professor at the Department of Physics, Electronics, and Computer Systems, Ph. D. in Tech.

*V. M. Popel*<sup>1</sup>, Deputy Chief of the Department in the Design Office of Spacecraft and Sites System Engineering

<sup>1</sup> Yangel Yuzhnoye State Design Office

3, Kryvorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

<sup>2</sup> National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

17, Chkalova St, Kharkiv, 61000 Ukraine

<sup>3</sup> Oles Honchar Dnipro National University

72, Gagarina Ave, Dnipro, 49010 Ukraine

#### METHOD OF AUTOMATED CORRECTION OF INSTRUMENT DISTORTIONS ON LANDSAT-7 MULTISPECTRAL SATELLITE IMAGES

An alternative method of automated correction of instrumental distortions of the ETM + scanner on Landsat-7 multispectral satellite images is proposed. The method is based on the application of filtering in the field of spatial frequencies using fast Fourier transform and spectral masks. The parameters of the mask are determined by a known spatial period of interference or experimentally by the results of the filtration. To filter the area of spatial frequencies to be removed, a filtering mask is applied, consisting of pixels with zero values. Periodic components whose spatial period corresponds to the spatial frequencies filtered on the Fourier image will be removed from the filtered image. The quality of filtration is determined by the mask used. When using multispectral images, a filter mask based on the Fourier image of one of the spectral channels is applied to filter other channels. The results of visual analysis of the processed images showed a fairly high-quality correction and elimination of instrumental distortions of the ETM + scanner in comparison with other methods. The main advantages of the proposed method are the next: the ability to work without the use of metadata and masks of instrumental distortion; work with single-channel and multispectral images; ability to work with small fragments of the scene; minimum number of manual settings for processing procedures; possibility to work without additional pictures for other dates; high stability of the used algorithms when using images from different satellites; fairly good repeatability of the results on satellite images taken in different seasons and for different areas. Experimental testing of the proposed method on a large number of images also confirmed the good repeatability and high stability of the algorithms used. It is expected that the developed technology will also be successfully used to correct instrumental spatial-periodic distortions in archival satellite images obtained using other optical-mechanical scanners.

**Keywords:** Landsat-7 satellite, ETM + scanner, multispectral images, instrumental distortions, fast Fourier transform, spectral masks.