НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА “НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ”

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА “НАУКОВИЙ ЦЕНТР АЕРОКОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗЕМЛІ ІНСТИТУТУ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ”

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ЛУБСЬКИЙ МИКОЛА СЕРГІЙОВИЧ

УДК 528.852.1(100)

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ІНФРАЧЕРВОНОГО АЕРОКОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ НА ОСНОВІ СУБПІКСЕЛЬНОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження
Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня **кандидата технічних наук**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело
_____ М. С. Лубський

Науковий керівник: Станкевич Сергій Арсенійович, доктор технічних наук, головний науковий співробітник, старший науковий співробітник

Київ – 2017

АНОТАЦІЯ

Лубський М. С. Методика підвищення інформативності інфрачервоного аерокосмічного знімання на основі субпіксельної обробки сигналів. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. – Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, (Д 26.162.03 Державної установи “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”), Київ, 2017.

Актуальність теми

Дані дистанційного зондування у довгохвильовій області інфрачервоного спектру дозволили значно розширити спектр задач які можливо вирішувати засобами космічного моніторингу. Однак, фізичні обмеження, які визначаються природою інфрачервоного випромінювання суттєво ускладнюють створення інфрачервоних знімальних систем космічного базування із середньою та високою просторовою розрізненністю.

Наразі найбільш поширені дані в даному діапазоні постачаються із просторовою розрізненністю більш ніж 1000 м. Дані знімання інфрачервоними знімальними системами із кращою просторовою розрізненністю, які надаються у вільному доступі представлені архівними знімками сенсорів TM супутника Landsat-5 із просторовою розрізненністю 120 м, ETM+ супутника Landsat-7 (60 м), TIRS супутника Landsat-8 та п’ятиканального інфрачервоного спектрорадіометра ASTER (90 м) супутникової системи EOS. І лише Landsat-8 наразі є функціонуючим і надає дані у діапазоні 10,3-12,3 мкм із просторовою розрізненністю 100 м, інтерпольованих до 30 м.

Даної просторової розрізненності недостатньо для вивчення територій із високою гетерогенністю, наприклад, урбанізованого середовища, розвиток якого останні десятиліття набув дуже високого темпу, що підвищує актуальність отримання зображень теплових полів порівняно високої

просторової розрізненності. Технологічне вдосконалення вже виведених на орбіту систем дистанційного зондування фізично неможливе.

Таким чином, актуальною науковою задачею є розробка нових методів та технологій підвищення просторової розрізненності даних довгохвильового інфрачервоного діапазону з метою підвищення інформативності зображень просторових розподілів теплового поля за матеріалами супутникового інфрачервоного знімання. В роботі обґрунтовано застосування даних Landsat-8 завдяки суміщенню на одній платформі сенсорних систем видимого, ближнього інфрачервоного діапазонів, які дозволяють отримати розподіл коефіцієнтів теплового випромінювання та довгохвильового інфрачервоного випромінювання, на основі якого формується теплове поле.

В ході виконання дисертаційної роботи розроблено комплексну двоетапну методику підвищення інформативності даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного випромінювання, в якій на першому етапі застосовується вдосконалена технологія розрахунку просторового розподілу коефіцієнта теплового випромінювання на основі даних видимого та ближнього інфрачервоного випромінювання більш високої розрізненності, а на другому етапі виконується підвищення просторової розрізненності на основі субпіксельної обробки окремих частотних компонент пар різночасових зображень.

В ході виконання роботи також виконано оцінку ефективності розробленої методики шляхом оцінки підвищення просторової розрізненності, порівняльної оцінки інформативності вхідних та оброблених даних, та визначення мінімальної розрізнювальної температури та коефіцієнта теплового випромінювання.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, довгохвильове інфрачервоне випромінювання, просторова розрізненність, закон Планка, субпіксельна обробка, коефіцієнт теплового випромінювання, функція передачі модуляції.

ABSTRACT

Lubskyi M. S. Method for infrared aerospace imagery informativity enhancement based on subpixel signal processing. – Qualified scientific paper as manuscript copyright.

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (PhD) with a degree in 05.07.12 (D 26.162.03 – Remote Sensing Aerospace Research) State Institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of Institute of Geological Science of National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv 2017.

Urgency of the research

The long-wavelength infrared remote sensing data allows to extend significantly the range of satellite monitoring applications. However, physical constraints, which are determined by the nature of infrared radiation, greatly complicate the design of space-based thermal infrared imaging systems of moderate and high spatial resolution.

At present, the most common long-wavelength infrared data has spatial resolution coarse of 1000 m. The data acquired by the infrared scanners with better spatial resolution available in free access are represented by archived images derived by TM sensor of the Landsat-5 satellite with 120 m spatial resolution, the ETM+ sensor (60 m spatial resolution) of the Landsat-7 satellite, TIRS sensor onboard the Landsat-8 satellite and the ASTER five-band infrared spectroradiometer (90 m spatial resolution) of the EOS satellite system. But the Landsat-8 only is currently functional and provides data in the 10.3-12.3 μm spectral range with a 100 m spatial resolution interpolated up to 30 m.

This spatial resolution is insufficient to study areas with high spatial heterogeneity, for example, an urban environment, which is rapidly developed in recent decades. This circumstance increases the need of obtaining thermal fields imagery with relatively higher spatial resolution. It is physically impossible to upgrade the remote sensing systems that have already been launched.

Thus, the actual scientific task is the development of new methods and technologies for the long-wavelength infrared data's spatial resolution enhancement

of in order to increase the informativity of thermal fields' spatial distributions imagery based on satellite infrared data. The application of the Landsat-8 data is substantiated by combining on one platform of visible, near-infrared bands, which allow deriving the emissivity distribution and long-wave infrared radiation sensor, on the basis which allow deriving land surface temperature distribution.

A comprehensive two-stage method for long-wavelength infrared data informativity enhancement has been developed: at the first stage an advanced technology for calculating the spatial distribution of the land surface emissivity based on the data of visible and near-infrared bands of higher spatial resolution is used, and at the second stage, the spatial resolution enhancement is achieved through the subpixel processing of separate frequency-domain components of subpixel-shifted image pairs.

Also the efficiency of the developed spatial resolution enhancement method is estimated, also performed a comparative estimation of the informativity of input and processed data, and determination of the minimum resolvable temperature difference and emissivity detected difference.

Keywords: Remote sensing of the Earth, long-wave infrared radiation, spatial resolution, Planck's law, subpixel processing, emissivity, modulation transfer function.

Публікації здобувача

Основні наукові результати дисертаційної роботи описані та відображені в опублікованих зі співавторами наукових працях.

Основні публікації за темою дисертаційної роботи:

1. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Лубський М. С. Підвищення просторової розрізненності аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, 2013. № 9(16). С. 110-117.
2. Станкевич С. А., Филиппович В. Е., Лубский Н. С., Крылова А. Б., Крицук С. Г, Бровкина О. В., Горный В. И., Тронин А. А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки. Електронний науковий фаховий журнал "Український журнал дистанційного зондування Землі" №7. URL: http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77 (Дата звернення: 18.05.2017).
3. Горный В. И., Лялько В.И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Бровкина О. В., Киселев А. В., Давидан Т. А., Лубский Н. С., Крылова А. Б. Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и LANDSAT). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2016. Т. 13. № 7. С. 176-191.
4. Станкевич С. А., Пилипчук В. В., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Оцінка точності визначення температури штучних та природних земних поверхонь за результатами інфрачервоного космічного знімання. *Космічна наука і технологія*, 2016. Т. 101. № 4. С. 19-28.
5. Пазиніч Н. В., Ліщенко Л. П., Крилова Г. Б., Філілпович В. Є., Лубський М. С. Дослідження та моніторинг пожежонебезпечних торфовищ на основі матеріалів дистанційного зондування Землі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека,* 2016. № 1. С. 85-91.

6. Горный В. И., Крицук С. Г. Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский М. С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017. Т. 14. № 3. С. 51-66.

Патенти:

7. Спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень за допомогою сканування спектральним вікном: пат. № 109210 України. МПК G01V 8/20, G06K 9/68, G06K 9/46, G06K 9/62. Попов М. О., Станкевич С. А., Козлова А. О., Пєстова І. О., Лубський М. С.; заявл. 14.02.2014. Опубл. 25.07.2015.

Наукові конференції:

8. Попов М. А., Станкевич С. А., Тягур В. М., Шкляр С. В., Подорван В. Н., Добровольская К. В., Лубский Н. С. Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений. *Проблеми телекомунікацій-2014*: Праці VIII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 22-25 квітня 2014). Київ: НТУУ “КПІ”, 2014. С. 57-60.
9. Krylova H. B., Lubskiy N. S. Remote monitoring of the thermal field at urbanized area, taking Kyiv city as an example. *CIS and Remote Sensing*: Proceedings of the 3rd International Conference (Tsaghkadzor, Armenia, 17-19 November 2014). Environmental Research and GIS Center, 2014. P. 149-155.
10. Лубський М. С. Застосування космічних систем дистанційного зондування для глобального теплового моніторингу. *Астрономічна школа молодих вчених*: Праці доповідей міжнародної наукової конференції (Житомир, 22-25 травня 2015). Житомир: Житомирський державний університет ім. І. Франка, 2015. С. 53.
11. Лубський М. С., Крилова Г. Б. Методика розрахунку приповерхневої температури за даними знімання у дальньому інфрачервоному діапазоні. *Теоретичні та прикладні аспекти використання математичних методів та інформаційних технологій у науці, освіті, економіці та у виробництві*:

Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції (Маріуполь, 25 квітня 2015). Маріуполь: МДУ, 2015. С. 82-85.

12. Станкевич С. А., Лубський М. С., Добровольська К. В. Технологія підвищення розрізненності інфрачервоних мікроболометричних спектрорадіометрів для задач цивільного захисту. *Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури*: Праці міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20-21 квітня 2015). Київ: Український науково-дослідний інститут цивільного захисту (УкрНДІЦЗ), 2015. С. 241-247.
13. Лубський М. С. Шляхи підвищення інформативності супутникових зображень теплового інфрачервоного діапазону. *Проблеми телекомунікацій-2015*: Праці IX Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 21-24 квітня 2015). Київ: НТУУ “КПІ”, 2015. С. 403-405.
14. Станкевич С. А., Філіпович В. Є., Шкляр С. В., Лубський М. С. Технологія розрахунку температур штучних та природних земних поверхонь за даними космічного знімання у тепловому діапазоні. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики*: Праці XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції (Київ, 26-28 травня 2016). Київ: НТУУ “КПІ”, 2016. С.180-184.
15. Лубський М. С. Підвищення інформативності результатів обробки космічних зображень теплового діапазону електромагнітного спектру. *Науково-практична конференція з космічних досліджень*: Праці 16-ї науково-практичної конференції (Одеса, 22-26 серпня 2016). Київ, 2016. С. 205-206.
16. Stankevich S. A., Lubskyi M. S., Krylova H. B. Thermal satellite data processing for prediction of urban heat island’s changes. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки (GEO-UA 2016)*: Праці п’ятої міжнародної конференції (Київ, 10-14 жовтня 2016). Київ, 2016, С. 50-52.
17. Stankevich S. A., Shklyar S. V., Podorvan V. N., Lubskyi N. S. Thermal infrared imagery informativity enhancement using sub-pixel co-registration. *2016 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*:

Proceedings of the International conference (Rzeszów, Poland, 5-7 July 2016). IEEE, 2016. P. 245-248.

18. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Подорван В. М., Лубський М. С. Підвищення інформативності зображень дальнього інфрачервоного діапазону на основі субпіксельної обробки. *Проблеми телекомунікацій-2016*: Праці X Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 19-22 квітня 2016). Київ: НТУУ "КПІ", 2016. С. 40-42.
19. Лубський М. С. Глобальні продукти обробки зображень теплового діапазону електромагнітного спектру. *Астрономічна школа молодих вчених*: праці 18-ї міжнародної наукової конференції (Київ, 26-27 травня 2016). Київ, 2016. С.70-71.
20. Станкевич С. А., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Підвищення просторової розрізненності дистанційних зображень теплового поля земної поверхні. *Проблеми телекомунікацій-2017*: Праці XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 18-21 квітня 2017). Київ: НТУУ "КПІ", 2017. С. 48-50.
21. Лубський М. С. Застосування супутникового знімання у інфрачервоному діапазоні для картування теплових полів середньої просторової розрізненності. *Астрономічна школа молодих вчених*: праці 19-ї міжнародної наукової конференції (Біла Церква, 24-25 травня 2017). Біла Церква, 2017. С. 65-66.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ……..2

ЗМІСТ……...10

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ……..14

ВСТУП……..16

РОЗДІЛ 1 Огляд існуючих методів обробки та підвищення інформативності даних довгохвильового інфрачервоного діапазону……25

1.1 Огляд існуючих систем дистанційного зондування довгохвильового інфрачервоного діапазону……...26

1.2 Методи розрахунку температури земної поверхні за допомогою даних дистанційного зондування ……29

1.3 Методи визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні за допомогою даних дистанційного зондування…… 35

1.4 Методи субпіксельної реєстрації зображень…….. 39

1.5 Методи субпіксельної обробки та відновлення зображень підвищеної розрізненності……42

1.6 Постановка завдання підвищення інформативності аерокосмічного знімання в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні…….……45

Висновки до першого розділу ……... 47

Список використаних джерел до першого розділу…….. 48

РОЗДІЛ 2 Розробка методів розрахунку температурного поля та розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання підвищеної розрізненності за даними космічного знімання…….. 61

2.1 Відбір даних космічного знімання та їх попередня обробка……62

2.1.1 Обґрунтування вибору джерел даних та їх характеристика…..62

2.1.2 Радіометричне калібрування даних космічного знімання……64
2.2 Розрахунок температурного поля за даними космічного знімання……..……66
2.2.1 Побудова моделі радіаційного переносу та усунення впливу атмосферних ефектів на випромінювання…….. 67
2.2.2 Визначення розподілу значень коефіцієнта теплового випромінювання земних покривів …….. 71
2.2.2.1 Розрахунок розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, вкритих рослинністю …….. 72
2.2.2.2 Розрахунок розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, відмінних від рослинних покривів та відкритого ґрунту методом регресійної сплайн-інтерполяції…… 75
2.2.3 Розрахунок теплового поля за даними дистанційного зондування ……78
2.3 Зв’язок інформативності даних аерокосмічного знімання із їх просторовою розрізненністю……79
2.4 Метод підвищення просторової розрізненності на основі пар субпіксельно зміщених зображень коефіцієнтів теплового випромінювання……86
2.4.1 Формування пар субпіксельно зміщених різночасових зображень коефіцієнтів теплового випромінювання……. 87
2.4.2 Методика розрахунку субпіксельних зміщень……... 88
2.4.3 Відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності…… 92
2.4.4 Ітеративна реконструкція зображення……93
Висновки до другого розділу ……95
Список використаних джерел до другого розділу ……...96

РОЗДІЛ 3 Розробка методики відновлення зображеннь теплових полів підвищеної інформативності ……...… 101
3.1 Розробка алгоритмів відновлення теплового поля за даними космічного знімання у видимому, ближньому інфрачервоному та довгохвильовому інфрачервоному діапазонах …….. 101
3.2 Розробка алгоритмів відновлення зображень теплового поля підвищеної розрізненності та оцінки підвищення просторової розрізненності…… 105
3.3 Розробка методики отримання зображень теплового поля на основі різночасових зображень коефіцієнта теплового випромінювання підвищеної розрізненності …… 111
3.4 Розробка методики підвищення просторової розрізненності різночасових зображень теплового поля…… 114
Висновки до третього розділу…… 116
Список використаних джерел до третього розділу…….. 117
РОЗДІЛ 4 Перевірка методу та експериментальна оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності інфрачервоних зображень …… 118
4.1 Характеристика зображень……119
4.2 Оцінювання функції передачі модуляції шляхом аналізу цифрових аерокосмічних зображень…….….. 122
4.2.1 Програмне забезпечення для оцінки ФПМ…… 123
4.2.2 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень теплового поля за рахунок залучення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання 125
4.2.3 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання із застосуванням субпіксельної

обробки…….. 128
4.2.4 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень теплового поля із застосуванням зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання підвищеної розрізненності……133
4.2.5 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень різночасових зображень теплового поля при обробці окремих частотних компонент… 135
4.3 Рекомендації з впровадження розробленої методики……139
Висновки до четвертого розділу……140
Список використаних джерел до четвертого розділу……..… 142
ВИСНОВКИ……144
ДОДАТКИ……148
ДОДАТОК А……148
ДОДАТОК Б……150
ДОДАТОК В……151
ДОДАТОК Г……153
ДОДАТОК Д……155
ДОДАТОК Е……157
ДОДАТОК Є……162
ДОДАТОК Ж……...169
ДОДАТОК З……173

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ARMA	Auto-regressive moving average
ATSR-1	Along Track Scanning Radiometer
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
DN	Digital number
EOS	Earth Observing System
ERS	European Remote-Sensing Satellite
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FWHM	Full width at half maximum
GCV	Generalized cross-validation
GED	Global Emissivity Dataset
HNN	Hopfield neural network
IBD	Iterative blind deconvolution
IBP	Iterative back-projection
IDL	Interface definition language
JPSS	Joint Polar Satellite System
ML	Maximum likelihood
MMD	Min-max difference
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MODTRAN	MODerate resolution atmospheric TRANsmission
MRTD	Minimum resolvable temperature difference
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized difference vegetation index
NEM	Normalized emissivity method
NETD	Noise-equivalent temperature difference
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLI	Operational Land Imager
POCS	Projection onto convex set
SCM	Single-channel method

SW	Split-window
TES	Temperature/emissivity separation
TIFF	Tagged image file format
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
USGS	United States Geological Survey
VIIRS	Visible Infrared Imaging Radiometer Suite
WRS	Worldwide reference system
ДПФ	Дискретне перетворення Фур’є
ДФВЗ	Двопроменева функція відбивальної здатності
МНК	Метод найменших квадратів
ОПФ	Оптична передавальна функція
СДІЧ	Сканер дальнього інфрачервоного діапазону
СЧ ДКР	Складові частини дослідно-конструкторських робіт
ФПМ	Функція передачі модуляції
ФРТ	Функція розсіяння точки

ВСТУП

Актуальність теми

Визначення розподілу температури поверхні Землі є основною задачею обробки даних довгохвильового інфрачервоного випромінювання (діапазон довжин хвиль 8-14 мкм). Ці дані дозволяють вирішувати різноманітні задачі, які неможливо достовірно вирішити за допомогою дистанційних даних лише видимого та ближнього інфрачервоного діапазону.

Однак, фізичні обмеження, які визначаються природою інфрачервоного випромінювання (порівняно велика довжина хвилі та, відповідно, низька енергія його квантів), суттєво ускладнюють створення інфрачервоних знімальних систем космічного базування із середньою та високою просторовою розрізненністю. На сьогодні є доступними дані, одержувані сенсором AVHRR із просторовою розрізненністю 1,09 км, встановленого на супутниках серії NOAA, сенсором MODIS із просторовою розрізненністю 1 км, яким обладнано супутники системи EOS та дані п’яти каналів сенсора SLSTR, встановленого на супутнику Sentinel-3A із просторовою розрізненністю 1 км.

Інфрачервоні знімальні системи із кращою просторовою розрізненністю почали впроваджуватись із 1982 року. Наразі в архівному вигляді доступні дані сенсорів TM супутника Landsat-5 із просторовою розрізненністю 120 м, ETM+ супутника Landsat-7 (60 м), TIRS супутника Landsat-8 та п’ятиканального інфрачервоного спектрорадіометра ASTER (90 м) супутникової системи EOS.

Значний внесок у розвиток знімальних систем довгохвильового інфрачервоного випромінювання та обробки даних зробили J. M. Lloyd (США [1], J. E. Johnson (США), P. W. Kruse (США), K.-P. Möllmann (Німеччина), J. C. Jiménez-Muñoz (Іспанія), Zhao-Liang Li (Китай) [2]. В Радянському Союзі та Україні серед провідних фахівців в даній області є відомі вчені Л. З. Криксунов [3,4], М. М. Мирошников, Ю. К. Рєбрін [5], В. І. Лялько, М. О. Попов та ін. [6].

Методику розрахунку розподілу температур за даними Landsat активно розробляли і вдосконалювали J. A. Sobrino та J. C. Jiménez-Muñoz (Іспанія) [7,8]. E. Valor та ін. (Іспанія) розробили методику відновлення даних коефіцієнта

теплового випромінювання за даними вегетаційного індексу *NDVI* [9]. A. Gillespie (США), Rokugawa S. (Японія) та ін. розробили методику картування коефіцієнта теплового випромінювання на основі багатоканального знімання сенсором ASTER [10].

Зв'язок просторової розрізненності одновимірних аерокосмічних зображень та їх інформативності описано в роботі Кононова В. І. та Станкевича С. А. [11].

Наразі єдиним функціонуючим сенсором довгохвильового інфрачервоного випромінювання є прилад TIRS (Thermal Infrared Sensor) на супутнику Landsat-8 із просторовою розрізненністю 100 м, інтерпольованих до 30 м. При цьому актуальність використання даних середньої просторової розрізненності значно зросла із активним розвитком міст по всьому світу, оскільки урбанізоване середовище є надзвичайно активним джерелом теплового випромінювання. Для урбанізованого середовища характерною є висока гетерогенність, тому для створення детальних карт теплових полів постала необхідність розробки програмних та апаратних методів підвищення просторової розрізненності даних. З цією метою реалізовано ряд способів підвищення просторової розрізненності даних аерокосмічного знімання [12-14], в тому числі і розробки українських фахівців М. І. Лихоліта, В. І. Лялько, М. О. Попова, В. Г. Бурачека та ін. [15-16].

Дана робота, що базується на публікаціях [17-37], присвячена розробці методики підвищення інформативності результатів обробки даних знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні спектру.

Отже, ***актуальною науковою задачею*** є розробка нових методів та технологій підвищення просторової розрізненності даних довгохвильового інфрачервоного діапазону з метою підвищення інформативності зображень просторових розподілів теплового поля за матеріалами супутникового інфрачервоного знімання.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Дисертаційна робота виконана в рамках наукових досліджень, що проводились

у Державній установі “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України” за такими темами: “Методологія комплексного геоінформаційного аналізу матеріалів аерокосмічних спостережень Землі і наземних даних в інтересах підвищення ефективності природокористування” (державний реєстраційний номер 0111U000030), “Методи інформаційного інтегрування даних багатоспектрального аерокосмічного знімання, польової спектрометрії і геолого-геофізичних даних при вирішенні завдань дистанційного пошуку покладів корисних копалин на суходолі і морському шельфі” (державний реєстраційний номер 0112U000702), “Методи дистанційного оцінювання біофізичних параметрів лісових рослинних угруповань та агрофітоценозів в межах різних ландшафтно-кліматичних зон території України” (державний реєстраційний номер 0115U003682), “Методи і алгоритми обробки даних від перспективного кадрового спектрорадіометра дальнього інфрачервоного діапазону” (державний реєстраційний номер 0115U003674), “Створення прототипу бібліотеки коефіцієнтів відбиття і теплового випромінювання типових об’єктів і фонів у дальньому інфрачервоному діапазоні” (державний реєстраційний номер 0111U000030), “Розробка програмного модуля підвищення просторової розрізненості первинних інформаційних матеріалів” (державний реєстраційний номер 0116U006798), “Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненності за допомогою субпіксельного оброблення зображень” (державний реєстраційний номер 0114U001665), “Технологія підвищення просторової розрізненності зображень, що отримуються матричною знімальною камерою космічної системи “Січ”, за допомогою субпіксельного оброблення” (державний реєстраційний номер 0113U000913), “Дослідження впливу урбанізації на мікроклімат міст (за матеріалами теплових аерокосмічних зйомок)” (державний реєстраційний номер 0114U005309), “Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формуються СДІЧ” (державний реєстраційний номер 0116U008458).

Мета і задачі дослідження. Метою дослідження є підвищення інформативності космічних зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону шляхом розробки методики субпіксельної обробки супутникових даних.

Для досягнення поставленої мети потрібне розв'язання наступних наукових *завдань*:

– огляд існуючих засобів формування і методів обробки даних дистанційного зондування в інфрачервоному діапазоні, а також відомих підходів до підвищення просторової розрізненності дистанційних зображень;

– вдосконалення методу розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні;

– розробка алгоритмів відновлення теплового поля за даними космічного знімання у видимому, ближньому інфрачервоному та довгохвильовому інфрачервоному діапазоні;

– розробка методики підвищення просторової розрізненності різночасових зображень коефіцієнтів теплового випромінювання та теплового поля шляхом субпіксельної обробки;

– перевірка працездатності розробленої методики та оцінка досягнутого підвищення просторової розрізненності реальних супутникових інфрачервоних зображень;

– розробка рекомендацій щодо практичного застосування розробленої методики.

Об'єкт дослідження – космічні зображення довгохвильового інфрачервоного діапазону.

Предмет дослідження – методи підвищення інформативності космічних зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону.

Методи дослідження

Для вирішення поставлених задач використовувалися:

– теорія радіаційного переносу – для створення моделі переносу теплового випромінювання з метою урахування впливу атмосфери на формування зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону;

– теорія теплового випромінювання – для обчислення фізичної температури і коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні на основі даних дистанційного зондування;

– теорія інтерполяції та апроксимації функцій – для опису нелінійної регресійної залежності коефіцієнта теплового випромінювання різних типів земних поверхонь від вегетаційного індексу *NDVI*;

– субпіксельна обробка растрових даних – для оцінки субпіксельних зміщень різночасових супутникових зображень однієї і той же сцени та відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності;

– статистична регуляризація – для розв’язання недовизначених систем рівнянь при відновленні зображень підвищеної просторової розрізненності;

– просторово-частотний аналіз – для обчислення та порівняльної оцінки функцій передачі модуляції цифрових зображень при перевірці розробленої методики;

– математична статистика – для статистичної оцінки результатів за вибіркою кількісних даних при оцінці підвищення просторової розрізненності зображень.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. ***Вперше*** отримано нову дворівневу методику підвищення інформативності зображень теплового поля, отриманих за допомогою обробки даних дистанційного зондування Землі за рахунок підвищення просторової розрізненності проміжних даних обробки та результуючого зображення теплового поля, коли на першому рівні підвищення досягається залученням даних розподілу коефіцієнта теплового випромінювання, отриманих шляхом обробки зображень видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, а на другому рівні розрізненність підвищується шляхом субпіксельної обробки пар зображень інваріантних в часі даних (коефіцієнта теплового випромінювання)

та подальшого програмного відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності.

2. Розроблено ***новий*** метод підвищення просторової розрізненності різночасових зображень температурного поля шляхом субпіксельної обробки окремих частотних компонент зображень.

3. ***Вдосконалено*** методики та алгоритми розрахунку фізичної температури та коефіцієнта теплового випромінювання земних покривів та адаптовано їх до даних, отриманих бортовими сенсорами OLI (Operational Land Imager) та TIRS супутникової системи Landsat-8.

Практичне значення одержаних результатів

Розроблена методика дозволить отримувати карти теплового поля значно вищої просторової розрізненності у порівнянні із технічними можливостями нині існуючих сенсорів довгохвильового інфрачервоного випромінювання, що дозволить більш детально досліджувати території із високою гетерогенністю поверхонь, наприклад, урбанізованого середовища, з більшою точністю відслідковувати окремі джерела інтенсивного теплового випромінювання та динаміку теплового поля, обумовлену вирубками лісів, забудовою, намиванням пісків та будь-якими іншими природними чи антропогенними факторами та розробляти більш точні та ґрунтовні прогнози мікрокліматичних змін, що особливо актуально на сьогодні, в умовах інтенсивного розвитку урбанізованих та індустріальних ландшафтів.

Розроблену методику підвищення просторової розрізненності було *впроваджено* в рамках виконання завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013-2017 рр. та використовувалося в 2016 році при виконанні складових частин дослідно-конструкторських робот (СЧ ДКР) “Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формуються СДІЧ”, і “Розробка програмного модуля підвищення просторової розрізненності первинних інформаційних матеріалів”, що підтверджується відповідним актами впровадження (Додаток А).

Особистий внесок здобувача. Автором проаналізовано існуючі методи визначення температури земних поверхонь та покривів та розподілу їх коефіцієнта теплового випромінювання за допомогою даних дистанційного зондування. Автором особисто було оброблено 24 різночасових зображення видимого, ближнього інфрачервоного та довгохвильового інфрачервоного діапазону, отримано зображення теплового поля та розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, а при попарному суміщенні різночасових зображень однієї сцени були отримані супутникові дані підвищеної просторової розрізненності.

Основні наукові результати дисертаційної роботи описано у ряді наукових робіт, опублікованих сумісно зі співавторами, а внесок здобувача, описаний в роботах полягає в наступному:

– у роботах [18-22,25,27,29,31] – запропоновано методику застосування даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону з метою розрахунку розподілу коефіцієнта теплового випромінювання;

– у роботах [17,24,28-31,33] – розроблено методику підвищення просторової розрізненності аерокосмічного знімання шляхом субпіксельної обробки;

– у роботах [34,36] – практично реалізовано спосіб оцінки субпіксельного зміщення різночасових зображень одне відносно одного;

– у роботі [36] – розроблено нову методику підвищення просторової розрізненності різночасових зображень теплового поля шляхом субпіксельної обробки окремих частотних компонент;

– у роботах [35-37] – вдосконалено спосіб розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання на основі обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону.

– у роботі [23] – запропоновано та протестовано новий спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень.

Апробація результатів дисертації

Попередні результати дисертаційного дослідження та основні теоретичні та методичні засади були представлені та обговорені на: на VIII Міжнародної науково-технічної конференції “Проблеми телекомунікацій-2014” (Київ, 22-25 квітня 2014 р.), міжнародній науковій конференції “Астрономічна школа молодих вчених” (Житомир, 22-25 травня 2015 р.), 3-й міжнародній конференції “International Conference on CIS and Remote Sensing” (Цахкадзор, Вірменія, 17-19 листопада 2014 р.), другій Всеукраїнської науково-практичній конференції “Теоретичні та прикладні аспекти використання математичних методів та інформаційних технологій у науці, освіті, економіці та у виробництві” (Маріуполь, 25 квітня 2015 р.), міжнародній науково-практичній конференції “Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об’єктах критичної інфраструктури” (Київ, 20-21 квітня 2015 р.), IX міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми телекомунікацій-2015” (Київ, 21-24 квітня 2015 р.), XIV всеукраїнській науково-практичній конференції “Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики” (Київ, 26-28 травня 2016 р.), 16-й науково-практичній конференції з космічних досліджень (Одеса, 22-26 серпня 2016 р.), п’ятій міжнародній конференції “Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки” (GEO-UA 2016) (Київ, 10-14 жовтня 2016 р.), міжнародній конференції “International Conference on Information and Digital Technologies” (IDT-2016) (Жешув, Польща, 5-7 липня 2016 р.), X міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми телекомунікацій-2016” (Київ, 19-22 квітня 2016 р.), 18-й міжнародній науковій конференції “Астрономічна школа молодих вчених” (Київ, 26-27 травня 2016), XI міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми телекомунікацій-2017” (Київ, 18-21 квітня 2016 р.), 19-й міжнародній науковій конференції “Астрономічна школа молодих вчених” (Київ, 24-25 травня 2017).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 21 робота, у тому числі: у фахових виданнях, що внесені до Переліку наукових фахових видань України з

технічних наук – 6 (з яких дві включено у наукометричні бази “РИНЦ” та Scopus); 1 патент на винахід; 14 – у збірниках матеріалів і тез доповідей вітчизняних та міжнародних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (157 найменувань на 21 сторінках) і 9 додатків на 32 сторінках. Робота викладена на 179 сторінках, що містять 102 сторінок основного тексту, 21 рисунок і 11 таблиць.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ТА ПІДВИЩЕННЯ ІНФОРМАТИВНОСТІ ДАНИХ ДОВГОХВИЛЬОВОГО ІНФРАЧЕРВОНОГО ДІАПАЗОНУ

Аерокосмічне знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні (8-14 мкм) дозволяє отримувати дані для вирішення завдань, в яких температура земних покривів та об'єктів на ній виступає визначальною характеристикою [38]. До таких завдань можна віднести пошук корисних копалин та енергоносіїв [39], контроль екологічного стану і виявлення джерел забруднень навколишнього середовища, аналіз стану сільськогосподарських та лісонасаджень, моніторинг надзвичайних ситуацій [21], оцінювання теплових режимів і тепловтрат міст і промислових територій [37] і т.д.

Температура земної поверхні є фундаментальним регулятором багатьох фізичних, хімічних і біологічних процесів і властивостей земних об'єктів [40]. В даний час деякі супутникові системи низької та середньої просторової розрізненності забезпечують оперативний довготривалий моніторинг земної поверхні в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні, що дозволяє оцінювати і аналізувати просторові та часові розподіли її температури [41].

При цьому найважливішим показником виступає точність дистанційних вимірювань температури земної поверхні, яка є вхідним параметром для подальшої інтерпретації і моделювання. Точність вимірювань залежить від калібрування інфрачервоного сенсора, наявних фізичних невизначеностей, наприклад, стану атмосфери, необхідної допоміжної інформації, використовуваних методів і алгоритмів відновлення температури [42].

Не менш важливою характеристикою інфрачервоних даних є просторова розрізненність, яка визначається як мінімальна відстань між компактними об'єктами на зображенні, яка дозволяє їх розрізнити на зображенні дистанційного зондування [43]. Просторова розрізненність залежить від таких факторів як пропускна здатність оптичного тракту, відношенням "сигнал-шум"

знімальної системи, радіометричні властивості об’єктів [44], і нерідко не відповідають просторовій дискретизації зображення, яка визначається лінійним розміром реального простору, що входить в один піксел зображення. Так, наприклад, при заявленій розробником просторовій розрізненності даних сенсору TIRS супутника Landsat-8 100 м просторова дискретизація даних становить 30 м яка досягається шляхом інтерполяції. Така інтерполяція виконується для можливості синтезу даних різних каналів. За рахунок більшої довжини хвилі електромагнітного випромінювання у порівнянні із даними видимого та ближнього інфрачервоного діапазону та значно нижчою енергією квантів випромінювання значно ускладнюється можливість отримання деталізованих даних в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні. Апаратні рішення значно ускладнюють знімальну систему та підвищують її масу, тому наразі дуже актуальними є розробки програмних методів підвищення просторової розрізненності проміжних даних, необхідних для розрахунку теплового поля, наприклад, зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання земних поверхонь та покривів, та результуючих зображень теплого поля, отримані космічними системами дистанційного зондування в інфрачервоному діапазоні.

1.1 Огляд існуючих систем дистанційного зондування довгохвильового інфрачервоного діапазону

Переважна більшість даних теплового знімання представлена зображеннями просторовою розрізненністю 1 км і більше. Найпершим сенсором теплового знімання став Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR), який застосовуються на супутниках серії NOAA, експлуатація яких розпочалась в 1978 році і триває досі. Наразі функціонуючий ряд супутників NOAA представлений трьома платформами (NOAA-15, 18 та 19 на яких застосовується 3-є покоління сенсорів AVHRR), які щоденно постачають зображення усієї території Землі із просторовою розрізненністю 1,1 км. У довгохвильовому

інфрачервоному діапазоні на основі зображень AVHRR створюються теплові карти земної поверхні та хмарного покриву (денні та нічні). Характеристики сенсора AVHRR представлено у табл. 1.1.

Таблиця 1.1.

Спектральні діапазони каналів сенсора AVHRR/3

Канал	Спектральний діапазон, мкм	Середина спектрального діапазону, мкм	Просторова розрізненність, км
1	0,58 – 0,68	0,63	1,1
2	0,727 – 1,00	0,862	
3a	1,58 – 1,64	1,61	
3b	3,55 – 3,93	3,74	
4	10,30 – 11,30	10,8	
5	11,50 – 12,50	12	

Найбільшого поширення набули дані, отримані сенсором MODIS, встановленого на супутниках системи спостереження Землі EOS, введених в експлуатацію в 2000 та 2002 роках відповідно. Даний сенсор має 16 каналів у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні та формує зображення із просторовою розрізненністю 1 км та радіометричною розрізненністю 12 біт із повторюваністю знімання 8 діб. Основними інформаційними продуктами теплового знімання є MOD11 (Land Surface Temperature and Emissivity) – температура поверхні та коефіцієнт теплового випромінювання, та MOD14 (Thermal Anomalies/Fire) – виявлення теплових аномалій та пожеж. Також на основі даних MODIS виконується картування температури водної поверхні на основі короткохвильового (3,9-4 мкм) та довгохвильового (11-12 мкм) інфрачервоного знімання. Спектральні канали довгохвильового інфрачервоного випромінювання MODIS перелічено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2.

Спектральні діапазони каналів сенсора MODIS

Номер каналу	Спектральний діапазон, мкм	Середина спектрального діапазону, мкм	Просторова розрізненність, км
20	3,66–3,84	3,750	1
21	3,929–3,989	3,959	
22	3,929–3,989	3,959	
23	4,02–4,08	4,05	
24	4,433–4,498	4,4655	
25	4,482–4,549	4,5155	
27	6,535–6,895	6,715	
28	7,175–7,475	7,325	
29	8,40–8,70	8,55	
30	9,58–9,88	9,73	
31	10,78–11,28	11,03	
32	11,77–12,27	12,02	
33	13,185–13,485	13,335	
34	13,485–13,785	13,635	
35	13,785–14,085	13,935	
36	14,085–14,385	14,235	

Серед сенсорів із більш високою просторовою розрізненністю виділяється сенсор ASTER супутникової системи EOS, який виконує знімання у тепловому діапазоні у 5-ти спектральних діапазонах із просторовою розрізненністю 90 м та радіометричною розрізненністю 12 біт. Характеристики сенсора ASTER наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3.

Спектральні діапазони каналів сенсора ASTER

Номер каналу	Спектральний діапазон, мкм	Середина спектрального діапазону, мкм	Просторова розрізненність, м
10	8,125–8,475	8,3	90
11	8,475–8,825	8,65	

12	8,925–9,275	9,1	
13	10,25–10,95	10,6	
14	10,95–11,65	11,3	

Також серед даних теплового інфрачервоного знімання із просторовою розрізненністю <1 км найбільш застосованими є дані супутників серії Landsat. Зображення сенсорів TM та ETM+, які застосовувались на супутниках Landsat-5 та 7, мають просторову розрізненність 120 та 60 м відповідно, радіометричну розрізненність 8 біт та спектральний діапазон 10,4-12,5 мкм. Дані сенсора TIRS супутника Landsat-8 мають просторову розрізненність 100 м, радіометричну розрізненність 16 біт. Сенсор TIRS отримує дані у двох спектральних діапазонах (10 канал – 10,3-11,3 мкм, 11 канал – 11,5-12,5 мкм). Завдяки вільному доступу до даних, отриманих сенсорами супутників Landsat, наданому оператором системи – американською геологічною службою (USGS), вони досі є найбільш поширеними для вирішення різноманітних задач. Ці дані добре зарекомендували себе при картуванні теплових островів міських агломерацій [18] та за рахунок просторової узгодженості між даними більш старих та нових супутників дозволяє будувати на їх основі довготривалі часові серії [19].

1.2 Методи розрахунку температури земної поверхні за допомогою даних дистанційного зондування

Визначення температури земної поверхні за даними дистанційного оцінювання спектральної щільності енергетичної яскравості можливе завдяки застосуванню законів теплового випромінювання [4]. Однак, задача формування зображення розподілу температури земної поверхні безпосередньо за даними знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні є некоректною та математично невизначеною [45]. Невизначеність вноситься зв’язком температури земних покривів з їх коефіцієнтами теплового випромінювання, які є спектрально-залежними. Також значні похибки в оцінку спектральної щільності енергетичної яскравості вносить вплив атмосфери.

Таким чином, в загальному вигляді дистанційне оцінювання температури земної поверхні зводиться до вирішення трьох задач:

– отримання даних спектральної щільності енергетичної яскравості у довгохвильовому діапазоні інфрачервоного випромінювання;

– створення моделі радіаційного переносу випромінювання, яка визначається великою кількість факторів, серед яких склад атмосфери, відносна вологість повітря, наявність атмосферних домішок, параметри орбіти знімальної системи та ін.;

– визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів.

Принципово усі методи визначення температури земної поверхні поділяються на два роди в залежності від визначеності або невизначеності коефіцієнта теплового випромінювання.

Найбільш поширеним способом визначення температури за умови відомості коефіцієнтів теплового випромінювання є Single-Channel Method (SCM) – прямий перерахунок спектральної щільності енергетичної яскравості на температуру за даними знімання одного спектрального каналу в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні шляхом обернення формули Планка [46-50] у вигляді:

$$T_s = B^{-1}\left[\frac{L_i(T_i) - L_i^{\uparrow} - (1-\varepsilon_i)L_i^{\downarrow}\tau_i}{\varepsilon_i \tau_i}\right] \tag{1.1}$$

де T_s – температура земної поверхні, B^{-1} – обернена формула Планка, $L_i(T_i)$ – спектральна щільність енергетичної яскравості в i-му діапазоні, $L_i^{\uparrow}$ – спектральна щільність енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора в i-му діапазоні; $L_i^{\uparrow}$ – спектральна щільність енергетичної яскравості низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі в i-му діапазоні; τ_i – зональний коефіцієнт пропускання

атмосфери; ε_i – коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні в i-му діапазоні.

Визначення температури при застосуванні даного методу потребує високоточної моделі пропускання/розсіяння інфрачервоного випромінювання в атмосфері, точного визначення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання для спектрального каналу, за яким розраховується температура, та врахування топографічних ефектів місцевості [7]. В загальному випадку, точність моделі визначення пропускання/розсіяння випромінювання залежить від загальної моделі атмосферного переносу, що використовується, та невизначеностей коефіцієнтів атмосферного і аерозольного поглинання/розсіювання [51]. Найбільш уживані моделі радіаційного переносу, такі як MODTRAN [52] та 4A/OP [53], широко застосовуються для реалізації корекції даних космічного знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні.

З метою зниження залежності від даних метеорологічного радіозондування атмосфери було запропоновано метод визначення температури окремо для даних 6-го каналу Landsat-5 із використанням даних приземної температури повітря та вмісту водяної пари в атмосфері замість повного атмосферного профілю із застосуванням емпіричних лінійних залежностей між спектральною щільністю енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери та показником спектрального пропускання атмосфери, а також між середньою температурою атмосфери та її приземною температурою [54]:

$$T_s = \frac{1}{C}\left\{a(1-C-D)+\left[b(1-C-D)+C+D\right]\,T_i - DT_{a\uparrow}\right\}, \qquad (1.2)$$

де $C=\varepsilon_i\tau_i$, $D=(1-\tau_i)[1+(1-\varepsilon_i)\tau_i]$, a та b – константи калібрування сенсора (для сенсора TM a = –67,35535, b = 0,4586), T_i – яскравісна температура в i-му діапазоні, $T_{a\uparrow}$ – середня температура атмосфери, яка визначається таким чином:

$$T_{a\uparrow} = 16{,}01 + 0{,}926\ T_0\ , \qquad (1.3)$$

де T_0 – приземна температура повітря. Для діапазону тиску водяної пари (W) 0,4 .. 1,6 г/см^2 коефіцієнт спектрального пропускання атмосфери визначається за лінійними залежностями.

Також було розроблено узагальнений метод визначення температури Full width at half maximum (FWHM) який включає в себе відомі значення коефіцієнтів теплового випромінювання та тиску водяної пари [55,56]:

$$T_s = \gamma\left[\varepsilon_i^{-1}\left(\psi_1 L_i(T_i) + \psi_2\right) + \psi_3\right] + \delta \text{ , де} \qquad (1.4)$$

$$\gamma = \left\{\frac{C_2 L_i(T_i)}{T_i^2}\left[\frac{\lambda^4}{C_1} L_i(T_i) + \lambda^{-1}\right]\right\}^{-1}, \qquad (1.5)$$

$$\delta = -\gamma L(T_i) + T_i\ , \qquad (1.6)$$

де λ – середнє значення спектрального діапазону i-го каналу, C_1 = 1,19104 × 10^8 Вт·(мкм)^4/(ср·м^2), C_2 – 14387,7 мкм·К. ψ_1, ψ_2, ψ_3 – атмосферні коефіцієнти, що визначаються емпірично як квадратичні залежності від тиску водяної пари.

Даний метод потребує мінімум вхідних даних та може бути застосований до різних знімальних систем за єдиним рівнянням. У роботі [57] описаний спосіб включення в одне рівняння приземної температури повітря разом із вмістом водяної пари, який особливо ефективний в умовах високого вмісту водяної пари в атмосфері.

Методи визначення температури земних покривів із застосуванням даних знімання в одному каналі довгохвильового інфрачервоного випромінювання потребують точного визначення коефіцієнтів теплового випромінювання, точну модель радіаційного переносу або дані про розподіли приземної температури атмосфери та тиску водяної пари.

Для багатоканальних сенсорів довгохвильового інфрачервоного діапазону розроблено ряд методів визначення температури земної поверхні, заснованих на паралельній обробці даних в усіх каналах. Оскільки в кожному спектральному

діапазоні випромінювання, що відповідають різним каналам, показники спектрального пропускання атмосфери та коефіцієнти теплового випромінювання земних покривів є різними, можливо розрахувати внесок атмосфери у спектральну щільність енергетичної яскравості земної поверхні та коефіцієнти теплового випромінювання без залучення сторонніх даних. Цей метод отримав назву split-window (SW), він заснований на тому, що послаблення атмосферою випромінювання, яке надходить від земної поверхні Землі, пропорційне різниці між спектральними щільностями енергетичної яскравості на сенсорі, знятими в кожному каналі [58]. Даний метод застосовувався для розрахунку температури водних поверхонь без використання будь-яких даних про атмосферні профілі. Метод широко використовується в дистанційному зондуванні і неодноразово модифікувався [59-61].

У спрощеному вигляді метод SW подається рівнянням:

$$L(T_s) = a_0 + a_1 L_i(T_i) + a_2 \left(L_i(T_i) - L_i(T_j)\right), \tag{1.7}$$

де T_i та T_j – яскравісна температура у каналах i та j, $L_i(T_i)$ та $L_i(T_j)$ – спектральні щільності енергетичної яскравості у каналах i та j, $a_0 .. a_2$ – коефіцієнти, які визначаються із спектральної чутливості каналів сенсора, коефіцієнтів теплового випромінювання, вмісту вологи в атмосфері та зенітного кута огляду. Звідси T_s [2]:

$$T_s = a_0 + a_1 T_i + a_2 \left(T_i - T_j\right), \tag{1.7}$$

Оскільки лінійне рівняння (1.7) демонструє значні розбіжності при визначенні температури при різній вологості атмосфери з метою підвищення точності було запропоновано нелінійний варіант методу split-window:

$$T_s = c_0 + c_1 T_i + c_2 \left(T_i - T_j\right) + c_3 \left(T_i - T_j\right)^2, \tag{1.8}$$

де $c_0 .. c_2$ – коефіцієнти, що визначаються за регресійною залежністю, яка враховує атмосферні параметри та характеристики земної поверхні, по аналогії із $a_0 .. a_2$ для рівняння 1.7 [62-64].

Варіацією метода SW є метод визначення температури за даними знімання в одному спектральному каналі, але шляхом багаторазового знімання однієї території під різними кутами. Таким чином формується кілька зображень в одному спектральному діапазоні, а параметри атмосфери визначаються за рахунок різної дистанції проходження випромінювання для кожного зображення [65-67].

Цей метод був розроблений для сенсора ASTR, встановленого на супутнику ERS-1. ASTR здатний сканувати одну територію за одне проходження над нею двічі під двома кутами: у надір (0° .. 21,6°) та перспективою назад (52° .. 55°). При цьому враховується горизонтальна гомогенність атмосфери та її стабільність впродовж часу формування зображення [66]. Знімання у надір забезпечує формування зображення у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні із просторовою розрізненністю 1 км, при перспективному зніманні піксел зображення збільшується до 1,5×2 км. У роботі [67] запропоновано вдосконалений метод, який враховує різні показники коефіцієнта теплового випромінювання в залежності від кута огляду:

$$T_s = T_n + p_1(T_n - T_f) + p_2 + p_3(1 - \varepsilon_n) + p_4(\varepsilon_n - \varepsilon_f), \qquad (1.9)$$

де p_k (k = 1..4) – коефіцієнти, які враховують показники спектрального пропускання атмосфери та середню температуру повітря для кожного із кутів огляду, T_n, T_k – яскравісні температури поверхні, виміряні у надір та перспективою назад, ε_n, ε_k – коефіцієнти теплового випромінювання, залежні від кута огляду поверхні.

Складність даного методу полягає у самій реалізації технології огляду поверхні під кількома кутами, що ускладнює систему та підвищує її вартість.

При цьому просторова розрізненність отриманих даних значно знижується зі зменшенням кута огляду.

Описані методи працюють в умовах визначеності коефіцієнта теплового випромінювання. Для іншого типу методів потребується його незалежне визначення.

1.3 Методи визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні за допомогою даних дистанційного зондування

Різноманіття даних, що постачаються системами дистанційного зондування Землі дозволили створити велику кількість методів отримання даних про розподіл коефіцієнтів теплового випромінювання різних типів поверхонь. Вони поділяються на дві категорії:

– методи, засновані на незалежному визначенні коефіцієнтів теплового випромінювання;

– методи одночасного визначення температури земних поверхонь та коефіцієнта теплового випромінювання.

Відомо метод розрахунку значень коефіцієнта теплового випромінювання, заснований на класифікації земної поверхні та створенні бази коефіцієнтів теплового випромінювання в діапазоні випромінювання 10,8–12,3 мкм на основі трьох різних двопроменевих функцій відбивальної здатності (ДФВЗ) із спектральними коефіцієнтами, залежними від типу земної поверхні [68-70]. Далі спектральне відбиття та коефіцієнти теплового випромінювання, залежні від кута знімання, визначають шляхом адаптації ДФВЗ до діапазону кута знімання сенсорною системою. У випадку включення у піксел зображення різних класів, застосовується модель змішування залежно від відношення площ цих класів.

Іншим методом визначення коефіцієнта теплового випромінювання є метод, заснований на статистичній залежності вегетаційного індексу *NDVI*, отриманого на основі обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного

діапазону, та коефіцієнта теплового випромінювання. Була відмічена висока кореляція між коефіцієнтом теплового випромінювання у діапазоні 8-14 мкм та натуральним логарифмом індексу *NDVI* [71]:

$$\varepsilon = a + b\ln(NDVI), \tag{1.10}$$

де a і b – константи, що отримуються на основі регресійного аналізу.

У роботі [9] описано метод визначення коефіцієнта теплового випромінювання поверхні, яка на растровому зображенні є однорідною, але фактично має складну структуру. Однак, цей метод вимагає точного знання про структуру території (висота лісу, густина рослинності і т.д.) тому для зниження складності застосування даного методу було здійснено певні припущення: поверхня складається лише із відкритого ґрунту та рослинного покриву; коефіцієнт теплового випромінювання можна представити лінійною залежністю від спектрального відбиття у червоному каналі; коефіцієнт теплового випромінювання лінійно підвищується із ростом густини рослинності [72]. Таким чином, даний метод включає в себе визначення коефіцієнта теплового випромінювання для відкритого ґрунту, території повністю вкритою рослинністю та змішаної:

$$\varepsilon_i = \begin{cases} a_i + b_i\rho_{red} & NDVI < NDVI_s \\ \varepsilon_{vi}P_v + \varepsilon_{si}(1-P_v) + \Delta\varepsilon_i & NDVI_s < NDVI < NDVI_v \\ \varepsilon_{vi} + \Delta\varepsilon_i & NDVI > NDVI_v \end{cases}, \tag{1.11}$$

де a_i і b_i – константи, що отримуються на основі регресійного аналізу, ρ_{red} – спектральне відбиття у червоному каналі, P_v – проективне покриття рослинності, ε_{si} та ε_{vi} – коефіцієнти теплового випромінювання відкритого ґрунту та поверхні, повністю вкритої рослинністю, $\Delta\varepsilon_i$ – додаткова поправка, що визначається шорсткістю поверхні.

Також запропоновано метод визначення коефіцієнта теплового випромінювання, заснованого на зніманні земної поверхні у довгохвильовому та

середньохвильовому діапазонах інфрачервоного випромінювання вдень та вночі [73]. Згідно із даним методом, виконується порівняння власного випромінювання земної поверхні у довгохвильовій та середньохвильовій областях інфрачервоного спектру вночі (за умови відсутності сонячного випромінювання) та вдень.

Розроблена велика кількість методів, які дозволяють одночасно визначити як розподіл коефіцієнтів теплового випромінювання земних поверхонь так і температуру із атмосферно скоригованих даних дистанційного зондування або шляхом зменшення кількості невідомих у системі рівнянь, що описують дані параметри поверхні, або шляхом збільшення кількості незалежних рівнянь. Це досягається або багаторазовим зніманням однієї і тієї же ділянки земної поверхні, або застосуванням багатоканальних знімальних систем.

Двотемпературний метод дозволяє визначити температуру та коефіцієнт теплового випромінювання шляхом обробки атмосферно скоригованих даних багаторазового знімання однієї території у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні, при цьому коефіцієнт теплового випромінювання приймається незмінним [74].

Подальшого розвитку набув метод визначення коефіцієнта теплового випромінювання за даними нічного та денного знімання [75]. Це дозволило також визначати температуру земних покривів на основі аналізу пар денних і нічних зображень однієї території за умови, що за час між отриманням пар зображень були відсутні фактори, що значно змінять випромінювальну здатність поверхні (сніг, дощ); кут знімання та атмосферні умови залишались незмінними.

На основі моделі “сірого тіла” розвинено метод відновлення температури за даними багатоканального знімання, при якому коефіцієнт теплового випромінювання є однаковим для усіх каналів [76]. Однак, складність реальних розподілів коефіцієнта теплового випромінювання за спектром у різних типів поверхонь може давати значні похибки.

Метод опорного каналу [77] застосовується для багатоканальних знімальних систем. Він заснований на припущенні, що коефіцієнт теплового випромінювання є однаковим для усіх пікселів в одному із каналів. Дані у цьому каналі коригуються значенням спектральної щільності енергетичної яскравості низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі і визначається температура поверхні в опорному каналі. Далі ця температура використовується для визначення коефіцієнтів теплового випромінювання в інших каналах. Метод нормалізованого коефіцієнта теплового випромінювання для багатоканальних систем базується на припущенні, що коефіцієнт теплового випромінювання для деякого обраного піксела в усіх каналах є однаковим [78,79]. Далі за атмосферно скоригованими даними знімання в довгохвильовій інфрачервоній області розраховується температура в цьому пікселі в усіх каналах. Максимум із температур приймається за реальну температуру поверхні, на основі якої відбувається встановлення коефіцієнта теплового випромінювання в інших каналах.

Метод нормалізованого коефіцієнта теплового випромінювання став основою для методу TES (Temperature/Emissivity Separation) [80]. В основі методу покладено емпіричну залежність між спектральним контрастом та мінімумом коефіцієнта теплового випромінювання, яка використовується для збільшення кількості рівнянь. Метод TES має три модулі:

1) модуль NEM – для розрахунку першого наближення температури поверхні та нормалізованих коефіцієнтів теплового випромінювання та їх максимуму;

2) модуль Ratio – для розрахунку відносних коефіцієнтів теплового випромінювання;

3) модуль MMD – для визначення спектрального контрасту в усіх каналах даних, визначення мінімуму коефіцієнта теплового випромінювання серед усіх каналів, розрахунок коефіцієнтів теплового випромінювання та температури.

Застосування алгоритму TES до п’ятиканального сенсора ASTER [10] дозволило досягнути точності визначення коефіцієнта теплового випромінювання ±0,001 для кожного діапазону знімання сенсора.

За допомогою сенсору ASTER було створено глобальне покриття коефіцієнтів теплового випромінювання Global Emissivity Dataset (GED) який став загальнодоступним у квітні 2014 р. На основі даних, зібраних за період 2000–2008 рр. було створено глобальне покриття коефіцієнтів теплового випромінювання із просторовою розрізненністю 100 м. Також за матеріалами MODIS було одержано ряд глобальних покриттів коефіцієнта теплового випромінювання за період 2000–2015 рр. із часовим інтервалом в місяць із просторовою розрізненністю близько 5 км [81].

1.4 Методи субпіксельної реєстрації зображень

Підвищення просторової розрізненності при збереженні кута огляду потребує підвищення кількості детекторних елементів фотоприймального пристрою, що призводить до підвищення складності конструкції і вартості приймальної апаратури. У випадку постійної кількості фоточутливих елементів кут огляду сенсорної системи знижується, що негативно впливає на оперативність отримання даних за рахунок зменшення продуктивності знімання та звуження смуги огляду.

Використання субпіксельної реєстрації значною мірою послабляє вимоги до технічної складності фотоприймальної апаратури за рахунок збільшення часу реєстрації та деякого ускладнення знімальної системи а в окремих випадках зовсім не потребує апаратних модифікацій знімальної системи, що важливо при обробці даних від супутникових систем, які наразі вже виведені на орбіту.

Субпіксельна реєстрація зображень є одним із найбільш уживаних способів підвищення просторової розрізненності дистанційного знімання у випадку, коли обмежені як кількість фотодетекторів в багатоелементному фотоприймальному пристрої, так і поле огляду знімальної апаратури.

Отже, застосування субпіксельної реєстрації супутникових зображень супутникових є перспективним і основним способом підвищення просторової розрізненності супутникового знімання.

Якість цифрового зображення визначається кількістю фотоелементів багатоелементного приймача електромагнітного випромінювання. Багато задач ДЗЗ окрім високої детальності також потребують охоплення значної території. Через технічні обмеження підвищення просторової розрізненності знімків може забезпечує метод субпіксельної реєстрації зображень або “мікросканування” [82]. Даний ряд методів являють собою технічне рішення проблеми підвищення просторової розрізненності.

Оптичне мікросканування було першим апробованим способом підвищення просторової розрізненності зображень, для виконання якого використовувалося фотоприймальна збірка з двох субпіксельно зміщених одна відносно одної фотоприймальних лінійок, що теоретично забезпечувало двократне підвищення просторової розрізненності [83]. В наступному цей спосіб був теоретично обґрунтований [84] і широко застосовувався в аерокосмічному зніманні.

Також для підвищення різкості та просторової розрізненності зображень при розробці мікроскопічної техніки застосовується просторова модуляція освітленості [85].

Субпіксельне знімання реалізується багатьма різноманітними способами – за допомогою системи прозорих сферичних мікролінз, закріплених на фотоприймальному пристрої [86] шляхом послідовного екранування визначеної частки поверхні фотоприймальних елементів матричного фотоприймального пристрою [87] тощо.

Методи мікросканування умовно можна розбити на дві основні групи: відхилення лінії візування електромеханічними приладами з оптичними елементами, та зсув світлових променів за допомогою рідкокристалічних пристроїв керування. Кожен з цих методів дозволяє маніпулювати лінією візування з метою забезпечення мікросканування. При обробці даних

виконується рекомбінація підкадрів і формування результуючого зображення з високою розрізненністю.

Мікросканування може здійснюватися шляхом відхилення оптичної осі електромеханічними пристроями. Для систем такого типу фіксовані оптичні лінзи доповнюються оптичним фільтром мікросканування, який складається із дзеркал, призм, або додаткових лінз для регулювання лінії візування системи.

Недоліком систем з електромеханічними елементами є її значна маса та габарити, та необхідність застосування складних систем слідкування.

Також для підвищення просторової розрізненності застосовується метод із залученням кількох зображень, геометрично зміщених відносно один одного на невідому частку піксела внаслідок збурень та вібрацій знімального приладу з використанням алгоритму мінімізації неузгодженості [88], або внаслідок руху об’єкта з визначенням вектору руху зображення [89].

Отримати зображення з підвищеною розрізненністю дозволяє формування декількох геометрично зміщених зображень за рахунок руху носія знімальної апаратури, із застосуванням повороту матричного приймача випромінювання відносно напрямку орбітального руху [90].

Також описано спосіб субпіксельного знімання, при якому здійснюється кутове зміщення оптичної осі знімальної камери за напрямком рядків і стовпчиків матричного фотоприймального пристрою на *n* позицій з інтервалом, який залежить від лінійного розміру фотоприймального пристрою та фокусної відстані об’єктива знімальної камери [91].

Програмні підходи до підвищення дешифрувальних властивостей аерокосмічних зображень реалізовано шляхом застосування вдосконаленої формули Живичина для багатоспектральних знімальних систем та технології злиття даних, отриманих від різних сенсорних систем [92]

При обробці даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного діапазону для отримання зображень температурного поля підвищеної розрізненності можливе застосування пар зображень, які є інваріантними (при одночасному зніманні у кількох каналах інваріантною є температура, при

зніманні одноканальною системою – різночасові зображення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання). При цьому субпіксельне зміщення можливо оцінити шляхом спільної обробки зображень [33].

1.5 Методи субпіксельної обробки та відновлення зображень підвищеної розрізненності

Із метою отримання цільового зображення підвищеної розрізненності масив зображень низької розрізненності піддається відповідній субпіксельній обробці різними методами.

Один із поширених і потужних математичних інструментів субпіксельної обробки зображень є метод найменших квадратів (МНК) [93]. МНК забезпечує високу точність і може застосовуватися до зображень різних спектральних діапазонів. Недоліком методу є необхідність розв’язування систем нелінійних рівнянь високої розмірності.

Також відомий метод ітераційної зворотної проекції (iterative back-projection – IBP), який адаптовано до підвищення просторової розрізненності субпіксельно зміщених супутникових зображень просторової розрізненності, що відрізняється [94].

Спеціальний спосіб оцінювання та корекції субпіксельного зміщення цифрових зображень на основі аналізу розподілу високих просторових частот в спектрах потужності та крос-спектрах описано в роботі [95]. Розроблена параметрична модель формування безперервних версій зображень, що оброблюються. Параметри моделі оцінюються методом максимальної подібності.

Представлено ряд ефективних алгоритмів для точної субпіксельної реєстрації зображень з малими розмірами субпікселів на основі дискретного перетворення Фур’є (ДПФ) і нелінійної оптимізації [96].

В роботі [97] запропонований спосіб субпіксельної реєстрації зображень на основі виявлення границь лінійних сегментів. Параметри зміщення

зображень обчислюються шляхом аналітичного розв'язку двох лінійних задач МНК.

Для гіперспектральних супутникових зображень реалізована технологія підвищення просторової розрізненності без залучення додаткових зображень [98]. Алгоритм базується на використанні просторової розбіжності між окремими зональними зображеннями отриманими гіперспектральною апаратурою. Наявні субпіксельні зміщення несуть додаткову просторову інформацію, що дозволяє сформувати зображення підвищеної розрізненності.

Виявлення просторових залежностей між фракціями земних покривів, які дешифровано за допомогою нечіткої класифікації також дозволило розробити спосіб підвищення просторової розрізненності [99]. Шляхом обробки декількох субпіксельно зміщених зображень низької розрізненності визначається просторове розташування фракцій. Застосування нейронної мережі Хопфельда (Hopfield neural network – HNN) дозволило розробити модель злиття вхідних класифікацій. Особливістю методу є можливість використання даних різної просторової розрізненності.

Для пересемплювання через похибки інтерполяції, неточності визначення параметрів обробки та інші фактори характерне утворення артефактів, аналіз і компенсація яких є важливим аспектом процесу підвищення просторової розрізненності [100]. Інколи доводиться застосовувати злагоджувальні фільтри для усунення найбільш заважаючих артефактів.

Основні зусилля при відновленні зображень високої розрізненності з вхідних зображень лягають на максимізації різкості результуючого зображення.

Метод відновлення зображень, що необхідно застосувати для підвищення розрізненності, залежить перед усім від моделі субпіксельної реєстрації та взаємного розташування піксельних сіток вхідних зображень низької розрізненності. Окремо розглядаються афінні, проекційні, безперервні та кусково-безперервні перетворення, лінійні зсуви, зсуви з обертанням [101].

В частотній області може бути реалізований кореляційний метод оцінювання субпіксельного зміщення і послідовного злиття частотних областей

і підвищення різкості. Особливість методу полягає у можливості виконання перетворень з невідомими зміщеннями. Оцінюється фазова кореляція між частотними спектрами потужності вхідних зображень, а взаємне зміщення між ними визначається за методом максимальної правдоподібності (maximum likelihood – ML) [102].

Метод проекції на опуклі множини (projection onto convex set – POCS) обчислює систему лінійних рівнянь за умови опуклих (лінійних і квадратичних) обмежень [103]. У класичному методі POCS функція розсіяння точки (ФРТ) сенсора включається до системи рівнянь. В результаті вже пересемпльоване зображення не зазнає розмиття. Опуклі обмеження вимагають регулярності рішення. Була також введена ітеративна безпосередня обернена згортка (iterative blind deconvolution – IBD) [104]. Це найбільш поширений метод інверсної фільтрації [105] на основі ДПФ. Він забезпечує достатню стійкість до шумів і відносно низькі обчислювальні витрати. Основним недоліком IBD є відсутність гарантії збіжності ітераційного процесу.

Метод авторегресійного рухомого середнього (auto-regressive moving average – ARMA) розглядає оригінальне зображення високої розрізненності двомірним авторегресійним процесом з ФРТ у вигляді двомірного рухомого середнього. В такому випадку низькоконтрастне зображення може розглядатися як зашумлене спостереження оригінального зображення. Відновлення зображення підвищеної розрізненності стає проблемою визначення параметрів ARMA [106]. Для цього застосовуються різноманітні алгоритми, включаючи метод максимальної правдоподібності (ML), узагальнену крос-валідацію (generalized cross-validation – GCV), нейронні мережі, статистика вищих порядків та інші.

Отже, розроблена значна кількість методів розрахунку температури земних покривів і поверхонь та відновлення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання. Для компенсації низької просторової розрізненності результуючих зображень можливо застосувати один із багатьох існуючих способів підвищення просторової розрізненності.

1.6 Постановка завдання підвищення інформативності аерокосмічного знімання в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні

Сумісна обробка даних видимого, ближнього інфрачервоного та довгохвильового інфрачервоного діапазону дозволяє отримати дані про розподіл коефіцієнта теплового випромінювання та температуру земних покривів, але поки що отримані результати є недостатньо інформативними для опису теплового поля територій із високою гетерогенністю поверхонь (наприклад – урбанізованого середовища).

Основним інструментом досягнення мети дослідження має стати комплексна двоетапна методика підвищення інформативності результатів обробки зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону шляхом підвищення їх просторової розрізненності, яка включає в себе як обробку зображень видимого та ближнього інфрачервоного діапазону із наступним підвищенням просторової розрізненності результатів обробки одним із відомих способів субпіксельної обробки дозволять значно підвищити інформативність результуючого теплового поля. Для розробки даної методики необхідно виконати ряд досліджень, систематизованих і графічно поданих на рис. 1.1.

Рис. 1.1. Схема проведення дослідження

Інформаційною основою дослідження є огляд та аналіз існуючих засобів формування зображень довгохвильового інфрачервоного діапазону, методів відновлення коефіцієнтів теплового випромінювання та температури земної поверхні засобами дистанційного зондування Землі та методик підвищення просторової розрізненності. Далі виконується розробка методик визначення коефіцієнтів теплового випромінювання на основі даних знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні та методики визначення температури земної поверхні за даними знімання у довгохвильовій області інфрачервоного спектру із врахуванням впливу атмосфери на випромінювання даного діапазону. Далі виконується розробка методики підвищення просторової розрізненності пар зображень розподілу інваріантних за часом даних (коефіцієнта теплового випромінювання) та неінваріантних даних (температури земної поверхні). Для отриманих в результаті застосування розроблених методик результуючих зображень виконується оцінка підвищення просторової розрізненності шляхом

просторово-частотного аналізу. На основі отриманих результатів виконується розробка рекомендацій щодо застосування розробленої методики та впровадження.

Результатом розробки методики підвищення інформативності даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного спектру стане інформаційний продукт, в основі якого використання багатоспектральних космічних знімків, що охоплюють видимий, ближній інфрачервоний та довгохвильовий інфрачервоний діапазони.

Висновки до першого розділу

1. Проведено аналіз існуючих сенсорних систем, що надають дані знімання у довгохвильовій області інфрачервоного спектру випромінювання. Існуючі сенсорні системи не дозволяють достатньо детально картувати теплові поля із високою гетерогенністю, що потребує підвищення просторової розрізненності результатів обробки даних, отриманих ними з метою підвищення їх інформативності.

2. Проаналізовано існуючі методики розрахунку температури земних покривів, відновлення їх коефіцієнта теплового випромінювання за даними дистанційного знімання. Також проаналізована існуючі методи формування масивів субпіксельно зміщених зображень, їх обробки та відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності. В умовах неможливості апаратного вдосконалення космічних систем дистанційного зондування, які вже виведені на орбіту доцільним є залучення програмних методів підвищення просторової розрізненності шляхом субпіксельної обробки.

3. Визначено завдання дослідження та розроблена схема його проведення яка включає в себе вдосконалення існуючих методик, об’єднання різких підходів до підвищення просторової розрізненності в одну комплексну методику, виконання просторово-частотного аналізу отриманих результатів та розробку рекомендацій щодо застосування методики та її впровадження.

Список використаних джерел

1. Lloyd J. M. Thermal Imaging Systems. New York: Plenum Press, 1975. 456 p.
2. Tang H., Li Z.-L. Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2014. 281 p.
3. Криксунов Л. З., Усольцев И. Ф. Инфракрасные системы. Москва: Советское радио, 1968. 320 с.
4. Криксунов Л. З. Справочник по основам инфракрасной техники. Москва: Советское радио, 1978. 400 с.
5. Ребрин Ю. К. Оптико-электронное разведывательное оборудование летательных аппаратов. К: КВВАИУ, 1988. 450 с.
6. Лялько В. І., Попов М. О., Станкевич С. А., Шкляр С. В., Подорван В. М., Лихоліт М. І., Тягур В. М., Добровольська К. В. Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненості за допомогою субпіксельної обробки зображень. *Наука та інновації*, 2015. Т. 11. № 6. С. 16-28.
7. Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 2004. Vol. 90. P.434-440.
8. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Skokovic D., Mattar C., Cristóbal J. Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2014. Vol. 11. № 10. P. 1840-1843.
9. Valor E., Caselles V. Mapping Land Surface Emissivity from NDVI: Application to European, African, and South American Areas. *Remote Sensing of Environment*, 1996. № 57. P. 167-184.
10. Gillespie A., Rokugawa S., Matsunaga T., Cothern J. S., Hook S., Kahle A. B. Temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998. Vol. 36. № 4. P. 1113-1126.
11. Кононов В. И., Станкевич С. А. Сравнительная оценка цифровых аерокосмических изображений высокого и низкого разрешения. *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского*, 2004. Т. 17. № 2. С. 88-95.

12. Method for image resolution enhancement: пат. US7187811 B2 Сполучені Штати Америки. МПК G06K9/62, G06K9/32, G06T3/40. Lin C.-T., Pu H.-C., Liang S.-F., Chen J.-L.; заявл. 18.03.2003. Опубл. 06.03.2006.
13. High-resolution imaging system: пат. US9273241 B2 Сполучені Штати Америки. МПК G02B3/00, G02B13/14, H04N5/349, E01C21/00, C09K5/20, A23L3/37, G02B26/08, G02B13/00, H04N5/225, H01L27/146. Chomont C., Cau F., Pealat M., Duriaud V.; заявл. 17.02.2012. Опубл. 01.03.2016.
14. Image resolution enhancement: пат. US8538201 B2 Сполучені Штати Америки. МПК G06K9/32. Damkat C.; заявл. 14.05.2009. Опубл. 17.09.2013.
15. Спосіб підвищення просторової розрізненості при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення: пат. 109181 Україна. МПК G06K 9/00, H04N 5/225, G06K 9/32, G01V 8/20, G01C 3/08. Харитоненко К. В., Станкевич С. А., Лихоліт М. І., Лялько В. І., Попов М. О., Тягур В. М.; заявл. 17.09.2013. Опубл. 27.07.2015.
16. Спосіб підвищення розрізненості кольорового зображення цифрового аерокосмічного знімка: пат. 107047 Україна. МПК G01C 11/02. Бурачек В. Г., Донець В. В., Станкевич С. А.; заявл. 09.07.2013. Опубл. 10.11.2014.
17. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Лубський М. С. Підвищення просторової розрізненності аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, 2013. № 9(16). С. 110-117.
18. Станкевич С. А., Филиппович В. Е., Лубский Н. С., Крылова А. Б., Крицук С. Г, Бровкина О. В., Горный В. И., Тронин А. А. Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки. Електронний науковий фаховий журнал “Український журнал дистанційного зондування Землі” №7. URL: http://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77 (Дата звернення: 18.05.2017).
19. Горный В. И., Лялько В.И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Бровкина О. В., Киселев А. В.,

Давидан Т. А., Лубский Н. С., Крылова А. Б., Прогноз тепловой реакции городской среды Санкт-Петербурга и Киева на изменение климата (по материалам съемок спутниками EOS и LANDSAT). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2016. Т. 13. № 7. С. 176-191.

20. Станкевич С. А., Пилипчук В. В., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Оцінка точності визначення температури штучних та природних земних поверхонь за результатами інфрачервоного космічного знімання. *Космічна наука і технологія,* 2016. Т. 101. № 4. С. 19-28.
21. Пазиніч Н. В., Ліщенко Л. П., Крилова Г. Б., Філілпович В. Є., Лубський М. С. Дослідження та моніторинг пожежонебезпечних торфовищ на основі матеріалів дистанційного зондування Землі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека,* 2016. № 1. С. 85-91.
22. Горный В. И., Крицук С. Г. Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский М. С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева). *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2017. Т. 14. № 3. С. 51-66.
23. Спосіб підвищення спектральної розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень за допомогою сканування спектральним вікном: пат. № 109210 України. МПК G01V 8/20, G06K 9/68, G06K 9/46, G06K 9/62. Попов М. О., Станкевич С. А., Козлова А. О., Пєстова І. О., Лубський М. С.; заявл. 14.02.2014. Опубл. 25.07.2015.
24. Попов М. А., Станкевич С. А., Тягур В. М., Шкляр С. В., Подорван В. Н., Добровольская К. В., Лубский Н. С. Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений. *Проблеми телекомунікацій-2014*: Праці VIII Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 22-25 квітня 2014). Київ: НТУУ “КПІ”, 2014. С. 57-60.
25. Krylova H. B., Lubskiy N. S. Remote monitoring of the thermal field at urbanized area, taking Kyiv city as an example. *CIS and Remote Sensing*: Proceedings of the 3rd

International Conference (Tsaghkadzor, Armenia, 17-19 November 2014). Environmental Research and GIS Center, 2014. P. 149-155.

26. Лубський М.С. Застосування космічних систем дистанційного зондування для глобального теплового моніторингу. *Астрономічна школа молодих вчених*: Праці доповідей міжнародної наукової конференції (Житомир, 22-25 травня 2015). Житомир: Житомирський державний університет ім. І. Франка, 2015. С. 53.
27. Лубський М. С., Крилова Г. Б. Методика розрахунку приповерхневої температури за даними знімання у дальньому інфрачервоному діапазоні. *Теоретичні та прикладні аспекти використання математичних методів та інформаційних технологій у науці, освіті, економіці та у виробництві*: Матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції (Маріуполь, 25 квітня 2015). Маріуполь: МДУ, 2015. С. 82-85.
28. Станкевич С. А., Лубський М. С., Добровольська К. В. Технологія підвищення розрізненності інфрачервоних мікроболометричних спектрорадіометрів для задач цивільного захисту. *Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єктах критичної інфраструктури*: Праці міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20-21 квітня 2015). Київ: Український науково-дослідний інститут цивільного захисту (УкрНДІЦЗ), 2015. С. 241-247.
29. Лубський М.С. Шляхи підвищення інформативності супутникових зображень теплового інфрачервоного діапазону. *Проблеми телекомунікацій-2015*: Праці IX Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 21-24 квітня 2015). Київ: НТУУ “КПІ”, 2015. С. 403-405.
30. Станкевич С. А., Філіпович В. Є., Шкляр С. В., Лубський М. С. Технологія розрахунку температур штучних та природних земних поверхонь за даними космічного знімання у тепловому діапазоні. *Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики*: Праці XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції (Київ, 26-28 травня 2016). Київ: НТУУ “КПІ”, 2016. С.180-184.

31. Лубський М. С. Підвищення інформативності результатів обробки космічних зображень теплового діапазону електромагнітного спектру. *Науково-практична конференція з космічних досліджень*: Праці 16-ї науково-практичної конференції (Одеса, 22-26 серпня 2016). Київ, 2016. С. 205-206.
32. Stankevich S. A., Lubskyi M. S., Krylova H. B. Thermal satellite data processing for prediction of urban heat island's changes. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки (GEO-UA 2016)*: Праці п'ятої міжнародної конференції (Київ, 10-14 жовтня 2016). Київ, 2016, С. 50-52.
33. Stankevich S. A., Shklyar S. V., Podorvan V. N., Lubskyi N. S. Thermal infrared imagery informativity enhancement using sub-pixel co-registration. *2016 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT)*: Proceedings of the International conference (Rzeszów, Poland, 5-7 July 2016). IEEE, 2016. P. 245-248.
34. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Подорван В. М., Лубський М. С. Підвищення інформативності зображень дальнього інфрачервоного діапазону на основі субпіксельної обробки. *Проблеми телекомунікацій-2016*: Праці X Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 19-22 квітня 2016). Київ: НТУУ "КПІ", 2016. С. 40-42.
35. Лубський М. С. Глобальні продукти обробки зображень теплового діапазону електромагнітного спектру. *Астрономічна школа молодих вчених*: праці 18-ї міжнародної наукової конференції (Київ, 26-27 травня 2016). Київ:, 2016. С.70-71.
36. Станкевич С. А., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Підвищення просторової розрізненності дистанційних зображень теплового поля земної поверхні. *Проблеми телекомунікацій-2017*: Праці XI Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 18-21 квітня 2017). Київ: НТУУ "КПІ", 2017. С. 48-50.
37. Лубський М. С. Застосування супутникового знімання у інфрачервоному діапазоні для картування теплових полів середньої просторової розрізненності. *Астрономічна школа молодих вчених*: праці 19-ї міжнародної наукової конференції (Біла Церква, 24-25 травня 2017). Біла Церква, 2017. С. 65-66.

38. Попов М. О., Ліхоліт М. І., Станкевич С. А., Полежаєв В. В., Тягур В. М., Титаренко О. В. Перспективи використання інфрачервоного аерознімання для вирішення природоресурсних і спеціальних задач. *Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій*: праці науково-практичної конференції (Київ, 10-13 травня 2011). Київ: ІЗІТ НАУ, 2011. С.33-39.
39. Титаренко О. В., Лубський М. С., Рибак О. А. Визначення якісних зв'язків між наявністю покладів вуглеводнів та тепловими характеристиками по даним ДЗЗ. *"Аерокосмічні спостереження в інтересах стійкого розвитку та безпеки" (GEO-UA 2014)*: Праці четвертої міжнародної конференції (Київ, 26-30 травня 2014). Київ: Наукова думка, 2014. С.185-187.
40. Weng Q., Lu D., Schubring J. Estimation of land surface temperature vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 2004. Vol. 89. № 4. P.467-483.
41. Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications. C. Kuenzer, S. Dech (Eds). Dordrecht: Springer, 2013. 556 p.
42. Tang H., Li Z.-L. Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications. Heidelberg: Springer-Verlag, 2014. 281 p.
43. ДСТУ 4220-2003. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни та визначення понять. 2003, Київ. 16 с.
44. Nelson T., Wulder M., Niemann K. O. Spatial resolution implications of digitizing aerial photography for environmental applications. The Imaging Science Journal, 2002. № 49. P. 223-232
45. Kealy P. S., Hook S. J. Separating temperature and emissivity in thermal infrared multispectral scanner data: Implications for recovering land surface temperatures. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993. № 31. P. 1155-1164.
46. Price J. C. Estimating surface temperatures from satellite thermal infrared data - A simple formation for the atmospheric effect. *Remote sensing of Environment*, 1983. № 13. P. 353-361.

47. Susskind J., Rosenfield J., Reuter D., Chahine M. T. Remote sensing of weather and climate parameters from HIRS2/MSU on TIRON-N. *Journal of Geophysical Research*, 1984. № 89, P. 4677-4697.
48. Chédin A., Scott N. A., Wahiche C., Moulinier P. The improved initialization inversion method: A high resolution physical method for temperature retreivals from satellites of the TIRON-N series. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1985. № 24, P. 128-143.
49. Otlé C., Vidal-Madjar D. Estimation of the land surface temperature with NOAA9 data. *Remote Sensing of Environment*, 1992. № 40. P. 27-41.
50. Li F., Jackson T. J., Kustas W. P., Schumugge T. J., French A. N., Cosh M. H., Bindlish R. Deriving land surface temperature from Landsat 5 and 7 during SMEX02/SMACEX. *Remote Sensing of Environment*, 2004. № 92. P. 521-534.
51. Wan Z. MODIS land-surface temperature algorithm theoretical basis document. In Greenbelt MD, USA: NASA/GSFC, 1999.
52. Berk A., Anderson G. P., Acharya P. K., Hoke M. L., Chetwynd J. H., Bermstein L. S., Shettle E. P., Mattthew M. W.,Adler-Golden S. M. MODTRAN4 Version 3 Revision 1 USER'S MANUAL. *Hanscom Air Force Base*. 2003. St, Bedford: Air Force Res. Lab.
53. Chaumat L., Standfuss C., Tournier B., Armante R., Scott N. A. 4A/OP reference documentation. In NOV-3049-NT-1178-v4.0, 2009. NOVELTIS, LMD/CNRS, CNES.
54. Qin Z., Karnieli A., Berniner P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, 2001. № 22, P. 3719-3746.
55. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. *Journal of Geophysical Research*, 2003. № 108, P. 4688-4695.
56. Jiménez-Muñoz J. C., Cristobal J., Sobrino J. A., Soria G., Ninyerola M., Pons X. Revision of the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval for

Landsat thermal-infrared data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009. № 47. P. 339-349.

57. Cristóbal J., Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Ninyerola M., Pons X. Improvements in land surface temperature retrieval from Landsat series thermal band using water vapor and air temperature. *Journal of Geophysical Research*, 2009. № 114. D.08103.
58. McMillin L. M. Estimation of sea surface temperature from two infrared window measurements with different absorptions. *Journal of Gephysical Research*, 1975. № 80. P. 1117-1129.
59. Llewellyn-Jones D. T., Minett P. J., Sauders R. W., Zavody A. M. Satellite multichannel infrared measurements of sea surface temperaure of the NE Atlantic Ocean using AVHRR/2. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1984. № 110. P. 613-631.
60. Sobrino J. A., Caseles V., Coll C. Theoretical split-window algorithms for determining the actual surface temperature. *IL Nuovo Cimento C*, 1993. № 16. P. 219-236.
61. Niclós R., Caseles V., Coll C.,Valor E. Determination of sea surface temperature at large observation angles using an angular and emissivity-dependent split-window equation. *Remote Sensing of Environment*, 2007. № 111. P. 107-121.
62. Sobrino J. A., Li Z.-L., Stoll M. P., Becker F. Improvements in the split-window technique for land surface temperature determination. *IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing*, 1994. № 32. P. 243-253.
63. Coll C., Caselles V. A split-window algorythm for land surface temperature from advanced very high resolution radiometer data: Validation and algorithm comparison. *Journal of Geophysical Research*, 1997. № 102. P. 16697-16713.
64. Alitar M., Sobrino J. A. A split-window algorithm for estimating LST from Teteosat 9 data: Test and comparison with in situ data and MODIS LSTs. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2009. № 6. P. 122-126.

65. Chédin A., Scott N. A., Berroir A. A single-channel, double-viewing angle method for sea surface temperature determination from coincident Meteosat and TIROS-N radiometric measurements. *Journal of Applied Meteorology*, 1982. № 24. P. 128-143.
66. Prata A. J. Surface temperatures derived from the advanced very high resolution radiometer and the along track scanning radiometer. 1. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 1993. № 98. P. 16689-16702.
67. Sobrino J. A., Li Z.-L., Stoll M. P.,Becker F. Multi-channel and multi-angle algorithms for estimating sea and land surface temperature with ATSR data. *International Journal of Remote Sensing*, 1996. № 17. P. 2089-2114.
68. Li Z.-L., Stoll M. P., Zhang R. H., Jia L. Su Z. B. On the separate retrieval of soil and vegetation temperatures from ATSR data. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2001. № 44. P. 97-111.
69. Snyder W. C., Wan Z., Zhang Y., Feng Y. Z. Classification-based emissivity for land surface temperature measurement from space. *International Journal of Remote Sensing*, 1998. № 19. P. 2753-2774.
70. Snyder W. C., Wan Z. M. BRDF models to predict spectral reflectance and emissivity in the thermal infrared. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998. № 36. P. 214-225.
71. Van de Grield A. A., Owe M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 1993. № 14. P. 1119-1131.
72. Sobrino J. A., Raissouni N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 2000. № 21. P. 353-366.
73. Becker F., Li Z.-L. Temperature-independent spectral indices in thermal infrared bands. *Remote Sensing of Environment*, 1990. № 32. P. 17-33.
74. Watson K. Two-temperature method for measuring emissivity. *Remote Sensing of Environment*, 1992. № 42. P. 117-121.

75. Wan Z. M., Li Z.-L. A physics-based algorithm for retrieving land-surface emissivity and temperature from EOS/MODIS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997. № 35. P. 980-996.
76. Barducci A., Pippi I. Temperature and emissivity retrieval from remotely sensed images using the “Grey body emissivity” method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996. № 34. P. 681-695.
77. Kahle A. B., Madura D. P., Soha J. M. Middle infrared multispectral aircraft scanner data: Analysis for geological applications. *Applied Optics*, 1980. № 19. P. 2279-2290.
78. Gillispie A. R. Lithologic mapping of silicate rocks using TIMS. *Thermal infrared multispectral scanner data user’s data user’s workshop*: Proceedings of the first TIMS workshop (Pasadena, USA 18-19 June 1985). Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1985. P. 29-44.
79. Realmuto V. J. Separating the effects of temperature and emissivity: Emissivity spectrum normalization. *Thermal infrared multispectral scanner data user’s data user’s workshop*: Proceedings of the second TIMS workshop (Pasadena, USA, 6 June 1990). Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 1990. P. 23-27.
80. Gillespie A. R., Rokugava S., Hook S. J., Matsunaga T., Kahle A. B. Temperature/emissivity separation algorithm theoretical basis document. Version 2.4. NASA/GSFC, 1999. 64 p.
81. Hulley G. C., Hook S. J., Abbot E., Malakar N., Islam T., Abrams M. The ASTER Global Emissivity Dataset (ASTER GED): Mapping Earth’s emissivity at 100 meter spatial scale. *Geophysical Research Letters*, 2015. Vol. 42. № 19. P. 7966-7976.
82. Belenok V. Y, Burachek V. G., Zatserkovny V. I., Popov M. A., Stankevich S. A. Subpixel image acquisition for detailed aerospace imaging. *Conference on Digital Technologies (DT’2011)*: Proceedings of the Eighth International Conference (Žilina, Slovakia, 10-11 November 2011). University of Žilina, 2011. P. 190-193.
83. Пристрій для підвищення просторової розрізненності багатоспектральних аерокосмічних зображень на основі класифікування спектральних сигнатур об’єктів: пат. № 96354 Україна. МПК: G06K 9/64, G06K 9/46. Ковальчук С. П., Попов М. О., Станкевич С. А.; заявл. 01.03.2010. Опубл. 25.10.2011.

84. Пристрій для цифрового аерофотознімання: пат. № 79886 Україна. МПК G02B 13/06. Железняк О. О., Бурачек В. Г., Надточій О. В., Шульц Р. В., Крельштейн П. Д.; заявл. 09.11.2005. Опубл. 25.07.2007.
85. Боровицкий В. Н., Чёрная В. В. Применение пространственной модуляции освещения в оптической микроскопии. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 2011. № 2. С. 159-167.
86. Ребрин Ю. К., Сидоров В. И. Оптические дефлекторы. Киев: Техника, 1988. 136 с.
87. Young S. S., Driggers R. G., Jacobs E. L. Signal Processing and Performance Analysis for Imaging Systems. Norwood: Artech House, 2008. 304 p.
88. Wexler H. The effects of electronic microscanning on infrared image aliasing and spatial resolution. MS Thesis. Cambridge: MIT, 1995. 59 p.
89. Imaging apparatus, imaging method, and imaging program: пат. EP2385698 A2 Європа. МНК: H04N5/349, H04N5/225. Kurimoto N., Hiruma Y., Shibata K., Shigematsu N.; заявл. 26.04.2011. Опубл. 04.01.2012.
90. System, method, and product for imaging probe arrays with small feature sizes: пат. US8055098 Сполучені Штати Америки. МПК: A61B8/00. Kaiser M. D., Smith D. R.; заявл. 26.01.2007. Опубл. 08.11.2011.
91. Method of super-resolving images: пат US7602997 B2 Сполучені Штати Америки. МПК: G06K9/32. Young S. S.; заявл. 19.01.2001. Опубл. 13.10.2005.
92. Пономаренко С. О., Станкевич С. А, Герда М. І., Білецький І. Г., Целіщев І. Ю. Оцінювання інтерпретаційних можливостей багатоспектральних зображень при плануванні аерокосмічного знімання. *Збірник наукових праць ДНДІА*, 2012. № 8(15). С.110-118.
93. Спосіб підвищення просторової розрізненності при дистанційній зйомці з використанням субпіксельної реєстрації зображень та пристрій для його здійснення: пат. № 109181 Україна. МПК: G01C 3/08, G01V 8/20, G06K 9/00, G06K 9/32, H04N 5/225. Тягур В. М., Попов М. О., Лихоліт М. І., Лялько В. І., Станкевич С. А., Харитоненко К. В.; заявл. 17.09.2013. Опубл. 27.07.2015.

94. Holst G. C. Electro-Optical Imaging System Performance. Winter Park: JCD Publishing, 1995. 264 p.
95. Duan Y., Barbastathis G., Zhang B. Classical imaging theory of a microlens with super-resolution. *Optics Letters*, 2013. Vol. 38. № 16. P. 2988-2990.
96. Vandewalle P., Süsstrunk S., Vetterli M. Superresolution images reconstructed from aliased images. *Proceedings of the SPIE*, 2003. Vol. 5150. P. 1398-1405.
97. Vasileisky A. S., Casanova J.-L. R., Al-Rawi K. R. Automated sub-pixel co-registration of the same sensor images by the least square technology. *Observing our environment from space: new solutions for a new millennium*: proceedings of the 21th EARSel Symposium (Paris, France 14-16 May 2001). Paris: Balkema, 2002. P. 221-226.
98. Gao S., Zhang X. J., Sun W. D. Lossless inter-array predictive coding for subpixel-shifted satellite images based on texture analysis. *Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic (Geoinformatics 2004)*: Proceedings of 12th International conference (Gävle, Sweden, 7-9 June 2004). University of Gävle, 2004. P. 275-282.
99. Hu Z.-H., Ju J.-S., Perng M.-H. A sub-pixel image registration technique with applications to defect detection. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2009. Vol. 3. № 3. P. 132-137.
100. Reji A. P., Tessamma T. Single frame image super resolution using learned directionlets. *International Journal of Artificial Intelligence and Applications*, 2010. Vol. 1, № 4. P. 29-42.
101. Qian S.-E., Chen G. Enhancing spatial resolution of hyperspectral imagery using sensor's intrinsic keystone distortion. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012. Vol. 50. № 12. P. 5033-5048.
102. Спосіб підвищення просторової розрізненності гіперспектральних аерокосмічних зображень на основі субпіксельного перерозподілу часток спектральних компонент: пат. № 92541 Україна. МПК: G06K 9/00, G06K 9/40. Попов М. О., Станкевич С. А., Шкляр С. В.; заявл. 18.02.2009. Опубл. 10.11.2010.

103. Vandewalle P., Baboulaz L., Dragotti P. L., Vetterli M. Subspace-based methods for image registration and super-resolution. *International Conference on Image Processing (ICIP'2008)*: Proceedings of 15th IEEE International Conference (San Diego, USA, 12-15 October 2008). San Diego: IEEE, 2008. P. 645-648.
104. Shekarforoush H., Berthod M., Zerubia J. Subpixel image registration by estimating the polyphase decomposition of cross power spectrum. *Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'96)*: Proceedings of international conference (San Francisco, USA, 18-20 June 1996). San Francisco: IEEE, 1996. P. 532-537.
105. Schultz R., Stevenson R. A Bayesian approach to image expansion for improved definition. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1994. Vol. 3. № 3. P. 233-242.
106. Papoulis A. A new algorithm in spectral analysis and band-limited extrapolation. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1979. Vol. 22. № 9. P.735-742.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ТА РОЗПОДІЛУ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПІДВИЩЕНОЇ РОЗРІЗНЕННОСТІ ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОГО ЗНІМАННЯ

Застосування даних дистанційного зондування довгохвильового інфрачервоного випромінювання (довжина хвилі 8-14 мкм) дозволяє отримувати дані про інтенсивність теплового випромінювання від земних покривів та поверхонь, тим самим значно розширяється спектр можливостей практичного застосування космічних сенсорних систем [1]. Однак, природа випромінювання цього діапазону не дозволяє отримувати дані із високою просторовою розрізненністю на рівні із даними видимого та короткохвильового інфрачервоного діапазону. Оскільки технічне вдосконалення сенсорних систем вимагає значних витрат та підвищення загальної маси знімальної системи значно актуалізувалося питання програмного вирішення підвищення інформативності та детальності результатів обробки даних знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні.

Основним результатом обробки даних довгохвильового інфрачервоного діапазону є зображення розподілу температур, яке розраховується із врахуванням впливу атмосферних ефектів на випромінювання. Для визначення фізичної температури земних покривів виконується визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання шляхом обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, просторова розрізненність яких значно вища за дані знімання у діапазоні 8-13 мкм, що в свою чергу дозволяє значно підвищити просторову розрізненність результуючого температурного зображення.

Наступним кроком виконується програмне підвищення просторової розрізненності пари субпіксельно зміщених зображень розподілу коефіцієнтів

теплового випромінювання для наступного підвищення деталізації та інформативності результуючого зображення теплового поля.

2.1 Відбір даних космічного знімання та їх попередня обробка

Для отримання детальних зображень теплового поля із максимально високою деталізацією вхідні дані дистанційного зондування мають відповідати ряду критеріїв. Оскільки одним з важливіших об’єктів вивчення розподілу теплового навантаження на середовище в наш час становлять урбанізовані території, для яких характерні велика різноманітність природних і штучних поверхонь різного типу та невеликої площі, головним критерієм відбору зображень є достатньо висока просторова розрізненність для можливості детального аналізу розподілів теплових полів. Також за точність визначення температури безпосередньо відповідає радіометрична розрізненність сенсорної системи. Створення пар різночасових зображень для їх субпіксельної обробки з метою підвищення просторової розрізненності вимагає максимально короткого часового інтервалу між зніманнями однієї території та точного геореференціювання знімків, що постачаються.

Сукупність зазначених характеристик знімальної системи та матеріалів знімання дозволяють сформувати вимоги до вхідних даних довогохвильового інфрачервоного знімання, які забезпечать максимально високу ефективність аналізу теплових полів.

2.1.1 Обґрунтування вибору джерел даних та їх характеристика

На сьогоднішній день одними із найбільш поширених джерел даних довгохвильового інфрачервоного діапазону є сенсори AVHRR (супутники серії NOAA), MODIS (супутники серії EOS) та VIIRS (супутники серії JPSS), однак їх дані із просторовою розрізненністю 1,09 км для AVHRR, 1 км у MODIS та 375 м у VIIRS не дозволяють створювати детальні зображення теплового поля.

Наразі доступні архівні дані 14-канального сенсору EOS/ASTER, серед яких п’ять каналів довгохвильового інфрачервоного випромінювання із просторовою розрізненністю 90 м. Для цього сенсору була створена спеціалізована методика відновлення коефіцієнтів теплового випромінювання TES (temperature and emissivity separation) за рахунок одночасного аналізу даних усіх п’ятьох каналів [2].

Також доступні довгохвильові інфрачервоні зображення супутникових систем серії Landsat (5, 7, 8), які безкоштовно поширюються через веб-ресурси Геологічної служби Сполучених Штатів Америки (https://earthexplorer.usgs.gov/). Зображення довгохвильового інфрачервоного випромінювання сенсорів TM та ETM+ супутників Landsat-5 та Landsat-7 мають просторову розрізненність 120 та 60 м відповідно, а дводіапазонні зображення сенсора TIRS супутника Landsat-8 – просторову розрізненність 100 м. Усі зазначені зображення інтерпольовано до дискретизації 30 м, що забезпечує можливість їх попіксельного суміщення із зображеннями інших спектральних діапазонів цих супутникових систем.

Матеріали знімання супутникових систем серії Landsat постачаються у вигляді набору окремих зображень формату GeoTIFF та метаданих до них.

На сьогоднішній день активним є лише Landsat-8. На його борту розміщено дві сенсорні системи: OLI – сенсор видимого, ближнього інфрачервоного та короткохвильового інфрачервоного випромінювання із просторовою розрізненністю 30 м та TIRS – двоканальний сенсор довгохвильового інфрачервоного випромінювання із просторовою розрізненністю 100 м. Обидва сенсори мають радіометричну розрізненність 16 біт. Періодичність знімання однієї території складає 16 днів, а для деяких територій в залежності від площ перекриття зображень сусідніх орбіт проходження супутника – 8 днів [3].

Суміщення на одній супутниковій платформі двох знімальних систем допомагає отримувати як зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів шляхом обробки даних видимого та

ближнього інфрачервоного діапазону, так і розраховувати фізичну температуру земних поверхонь та покривів шляхом обробки даних довгохвильового інфрачервоного випромінювання [4].

Основним критерієм відбору зображень для обробки є хмарність в межах досліджуваної території, яка не має перевищувати 5%. Також визначальним критерієм є чітка періодичність знімання та надання даних.

Таким чином, сенсорні системи супутника Landsat-8 є найбільш прийнятним джерелом для застосування методики підвищення просторової розрізненності зображень теплового поля. Її також можливо застосувати для даних знімання Landsat-4, 5 та 7 та адаптувати до даних знімання сенсором ASTER.

2.1.2 Радіометричне калібрування даних космічного знімання

Дані космічного знімання, придатні для наступної обробки та виконання математичних розрахунків мають представляти собою розподіл конкретної фізичної величини – спектральної густини енергетичної яскравості на апертурі сенсора, або коефіцієнт спектрального відбиття [5].

Первинні дані знімання космічними сенсорними системами мають вигляд цілочисельних значень масштабованої спектральної яскравості *DN* (digital number), записані у кожен піксел зображення. Такий вигляд необхідний для зниження обчислювального навантаження на системи супутника, підвищення швидкості передачі даних через менший необхідний об’єм пам’яті, необхідний для запису цілочисельних даних у порівнянні із даними із плаваючою комою. Також із часом сенсорні системи піддаються деградації та потребують повторного калібрування [6]. Головною умовою радіометричного калібрування є досягнення лінійної залежності між *DN* та відповідними фізичними величинами, які отримуються після калібрування [7].

Таким чином, першим етапом обробки даних інфрачервоного знімання є перерахунок піксельних значень на величини спектральної густини енергетичної яскравості на апертурі сенсора L за лінійною залежністю

$$L_\lambda = a_\lambda \cdot DN + b_\lambda \tag{2.1}$$

де L_λ – спектральна густина енергетичної яскравості на апертурі сенсора в спектральному діапазоні λ, DN – цифровий код спектральної яскравості, a_λ та b_λ – калібрувальні коефіцієнти підсилення та зміщення.

Калібрувальні коефіцієнти визначаються в лабораторних умовах в ході розробки сенсорної системи з врахуванням спектральної чутливості сенсора. Криві відносної спектральної чутливості сенсора TIRS показано на рис. 2.1.

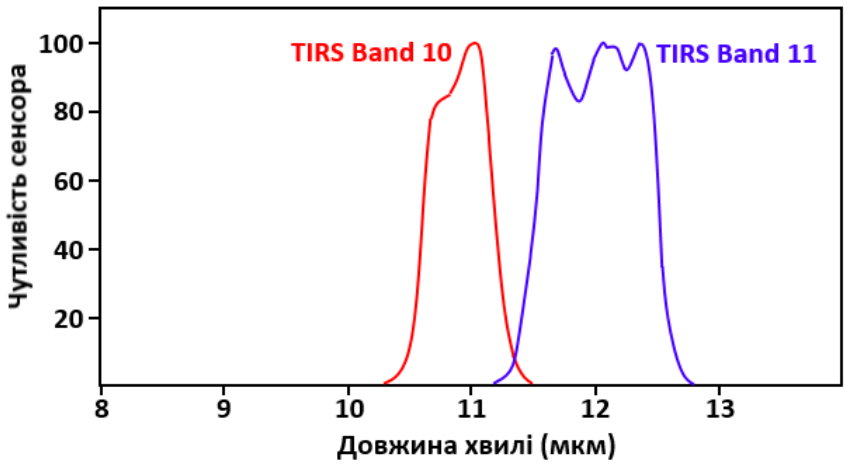


Рис. 2.1. Криві спектральної чутливості сенсора TIRS супутника Landsat-8

Типові коефіцієнти підсилення та зміщення для спектральних діапазонів, що відповідають довгохвильовому інфрачервоному випромінюванню із відповідними робочими діапазонами супутникових знімальних систем, встановлених на серії супутників Landsat представлені у таблиці 1 [8].

Таблиця 2.1.

Робочі спектральні діапазони та калібрувальні константи інфрачервоних сенсорів супутникових систем серії Landsat

Сенсорна система	Робочий спектральний діапазон, мкм	Підсилення (gain), Вт/(м^2·мкм·ср)/DN	Зміщення (bias), Вт/(м^2·мкм·ср)
TM	6 (10,4 – 12,5)	0,055	1,18243
ETM+	6-1 (10,4 – 12,5)	0,067	–0,06709
	6-2 (10,4 – 12,5)	0,037	3,1628
TIRS	10 (10,6 – 11,19)	0,0003342	0,1
	11 (11,5 – 12,51)	0,0003342	0,1

Показники підсилення та зміщення при перерахунку цифрових кодів *DN* на спектральну густину енергетичної яскравості на апертурі сенсора або коефіцієнт спектрального відбиття зазвичай постачаються в анатоційному файлі метаданих.

2.2 Розрахунок температурного поля за даними космічного знімання

Основним продуктом обробки даних дистанційного зондування у довгохвильовій області інфрачервоного випромінювання виступає зображення температурного поля. Для отримання коректного і точного результату необхідне врахування ряду показників, які є визначальними при розрахунку значень фізичної температури земної поверхні: вплив атмосфери на випромінювання та значення показника теплового випромінювання різних типів поверхонь і земних покривів.

Можливість дистанційного визначення температури ґрунтується на законі теплового випромінювання Планка для “сірого” тіла (тіло, коефіцієнт теплового випромінювання якого не залежить від довжини хвилі випромінювання) – вираз для спектральної густини потоку випромінювання [9]:

$$L(\lambda,\ T) = \varepsilon(\lambda)\ M(\lambda,\ T) = \frac{\varepsilon(\lambda)\, c_1\, \lambda^{-5}}{\exp\left(\dfrac{c_2}{\lambda T}\right) - 1}, \qquad (2.2)$$

де $L(\lambda, T)$ – спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні, $\varepsilon(\lambda)$ – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання, $M(\lambda, T)$ – спектральна густина енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла, $c_1 = 2hc^2 = 1{,}191 \cdot 10^{-16}$ Вт·м^2 и $c_2 = \dfrac{hc}{k} = 1{,}439 \cdot 10^{-2}$ м·К – перша і друга константи закону Планка, $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постійна Планка, $c = 2{,}998 \cdot 10^8$ м/с – швидкість світла у вакуумі, $k = 1.381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання.

Перед виконанням розрахунку температури за значеннями спектральної густини енергетичної яскравості попередньо необхідно визначити та усунути вплив атмосферних ефектів на випромінювання та визначити розподіл коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів в межах зображення.

2.2.1 Побудова моделі радіаційного переносу та усунення впливу атмосферних ефектів на випромінювання

Для максимально точної оцінки температури дистанційним методом обов’язковим є врахування впливу атмосфери на сонячне випромінювання, оскільки атмосфера містить в собі велику кількість газових та аерозольних фракцій, здатних поглинати, розсіювати та відбивати електромагнітне випромінювання в залежності від його довжин хвиль. Основними парниковими газами, в порядку їх оцінюваного впливу на тепловий баланс Землі, є водяна пара, вуглекислий газ, метан і озон [10]. На рис. 2.2 представлено спектр проникності випромінювання в діапазоні довжини хвилі 7-14 мкм, та типові лінії поглинання речовинами, які вносять найбільший вклад у тепловий баланс.

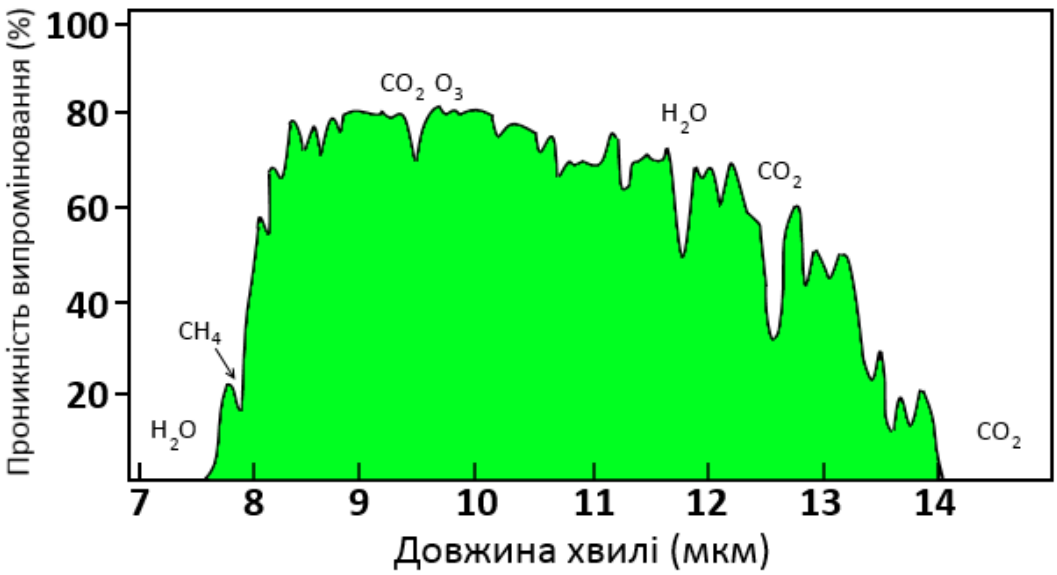


Рис. 2.2. Проникність випромінювання довгохвильового інфрачервоного діапазону та найбільш типові лінії поглинання випромінювання

Узагальнена атмосферна модель, яка застосовується для коригування впливу атмосфери на випромінювання вимагає визначення трьох параметрів: спектральної густини енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора, низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі та спектрального коефіцієнта пропускання атмосфери, і має наступний вигляд [11]:

$$L_i = \tau_i[\varepsilon_i L_s + (1-\varepsilon_i)L_i^{\downarrow}] + L_i^{\uparrow}, \qquad (2.3)$$

де L_s – спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні в i-му діапазоні; L_i – спектральна густина енергетичної яскравості верхньої границі атмосфери в i-му діапазоні; $L_i^{\uparrow}$ – спектральна густина енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора в i-му діапазоні; $L_i^{\downarrow}$ – спектральна густина енергетичної яскравості низхідного випромінювання атмосфери в напрямку поверхні Землі в i-му діапазоні; τ_i – зональний коефіцієнт пропускання атмосфери; ε_i – коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні в i-му діапазоні.

Спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні з рівняння (2.3) виражається наступним чином:

$$L_s = \frac{L_i - L_i^{\uparrow}}{\varepsilon_i \tau_i} - \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} L_i^{\downarrow}, \tag{2.4}$$

Значення $L_i^{\uparrow}$, $L_i^{\downarrow}$, і τ_i залежать від довжини хвилі електромагнітного випромінювання, що проходить через атмосферу, і розраховуються для кожного сенсора за допомогою моделюючих систем, таких як MODTRAN [12].

На основі даного програмного забезпечення реалізовано розрахунок параметрів коригування атмосферного впливу на випромінювання. Одним із варіантів реалізації є калькулятор атмосферних параметрів Atmcorr, розроблений співробітниками NASA (https://atmcorr.gsfc.nasa.gov/). Калькулятор розроблено на основі програми MODTRAN, і він розраховує інтегральні показники корекції впливу атмосфери на випромінювання в межах каналів, які відповідають за дані довгохвильового інфрачервоного випромінювання сенсорів супутників Landsat-7 та 8, який враховує дату, час, широту та довготу знімання, тип атмосферного профілю в залежності від сезону (зима у середніх широтах або літо у середніх широтах) та погодні умови на момент знімання [13].

Існуючий наразі інтерфейс (рис. 2.3) дає дані по параметрам коригування атмосферного впливу на випромінювання лише для десятого каналу даних супутника Landsat-8 (13,3-11,3 мкм) тому доцільно розраховувати температурні поля застосовуючи лише даний канал. В умовах незалежного визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання дані одного каналу є достатнім мінімумом для розрахунку теплового поля.

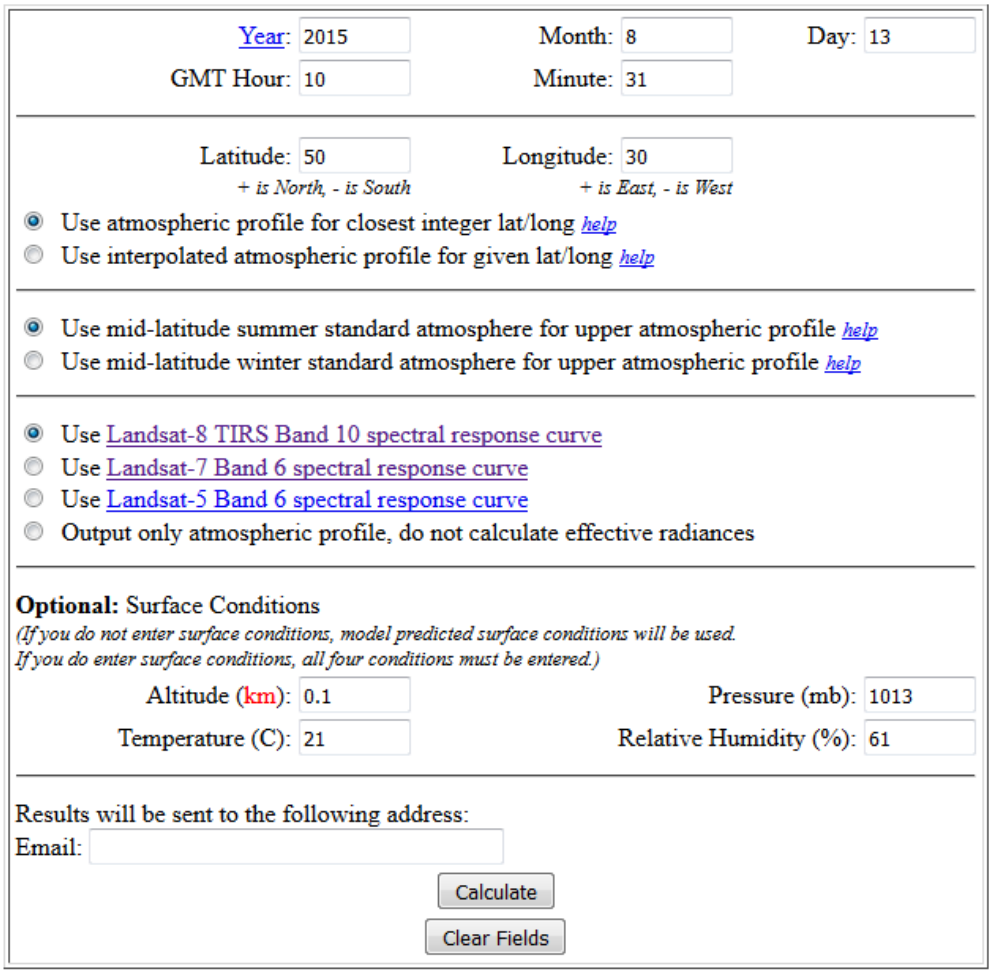


Рис. 2.3. Інтерфейс калькулятора атмосферних параметрів Atmcorr

В результаті застосування калькулятора Atmcorr отримуються параметри спектральної густини енергетичної яскравості висхідного випромінювання атмосфери в напрямку сенсора, в напрямку поверхні Землі зональний коефіцієнт пропускання атмосфери.

Реалізація розрахунку для інших систем знімання у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні, зокрема для зображень 11-го каналу даних супутника Landsat-8, можлива за рахунок застосування згортки розрахунків параметрів атмосфери, отриманих гіперспектральними сенсорами довгохвильового інфрачервоного випромінювання [14]. У випадку відсутності перекриття спектральних діапазонів сенсорних систем (наприклад, спектральний діапазон сенсора TASI-600 8–11,5 мкм а у 11-го каналу даних Landsat-8 11,5–12,5 мкм) криві розподілу атмосферних параметрів можливо екстраполювати на діапазон спектру, для якого необхідно визначити ці параметри (рис. 2.4).

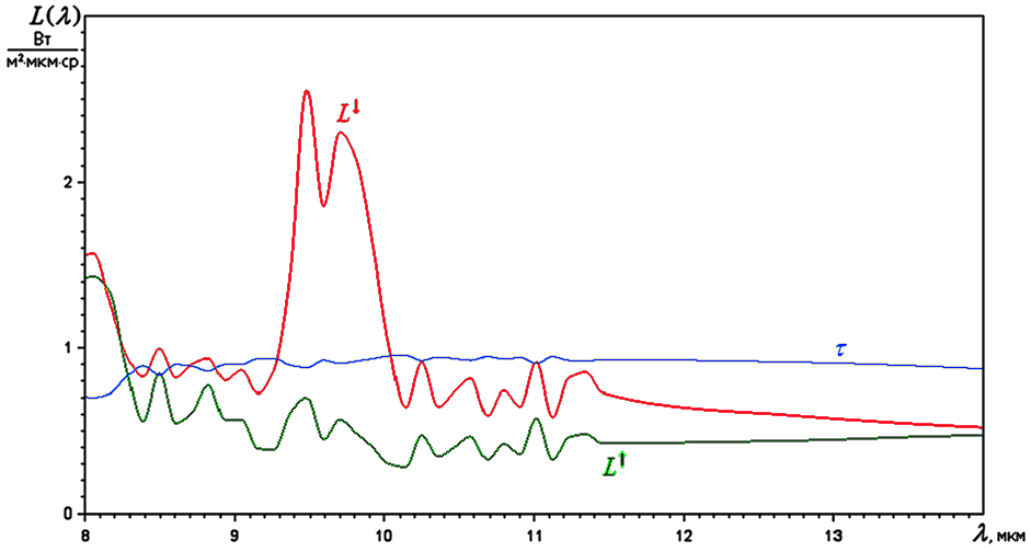


Рис. 2.4. Спектральний розподіл атмосферних параметрів $L^{\uparrow}$, $L^{\downarrow}$ та τ

2.2.2 Визначення розподілу значень коефіцієнта теплового випромінювання земних покривів

Основною складністю при визначенні температури земної поверхні по супутникових зображеннях далекого інфрачервоного діапазону виступає невизначеність коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні. Дана невизначеність робить завдання розрахунку термодинамічної температури математично некоректною: кількість невідомих в рівняннях радіаційного переносу завжди на одиницю перевищує кількість рівнянь в системі [15].

Спектральні характеристики різних поверхонь відрізняються одна від одної, та їх випромінювальна здатність, в залежності від довжини хвилі падаючого на нього випромінювання, так само різна. Тому кожен окремо взятий матеріал має вкрай складну криву залежності випромінювальної здатності від довжини хвилі. Для спрощення отримання значення температури поверхонь за допомогою даних дистанційного зондування Землі використовується широкосмуговий коефіцієнт теплового випромінювання, тобто, використовується модель “сірого” тіла – об’єкта, випромінювальна здатність якого не залежить від довжини хвилі випромінювання, а лише від температури [16].

Визначення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання за допомогою даних дистанційного зондування виконуються шляхом обробки зображень видимого та ближнього інфрачервоного діапазону.

Зазвичай використовується його оцінювання за допомогою спектральних індексів RVI, NDVI та ін., засноване на можливості відділення рослинного покриву від відкритих ґрунтів і штучних поверхонь за пороговими значеннями цих індексів [17]. Тому для штучних поверхонь та поверхонь, вкритих рослинністю, визначення кривої залежності від вегетаційного індексу NDVI виконуються відокремлено.

2.2.2.1 Розрахунок розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, вкритих рослинністю

Принцип розрахунку коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, вкритих рослинністю заснований різниці коефіцієнтів теплового випромінювання рослинності та ґрунтів.

Проміжні між порогами відкритого ґрунту $NDVI_0$ і повного покриття рослинністю $NDVI_\infty$ значення $NDVI$ трактуються як відповідні величинам проективного покриття рослинності F в поточному пікселі [18]:

$$F = \left(\frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_\infty - NDVI_0} \right)^2, \tag{2.5}$$

де $NDVI$ – значення нормалізованого вегетаційного індексу в поточному пікселі зображення; $NDVI_0$ – максимальне значення нормалізованого вегетаційного індексу відкритого ґрунту (або іншій поверхні, де повністю відсутня рослинність); $NDVI_\infty$ – мінімальне значення нормалізованого вегетаційного індексу поверхні, повністю покритою рослинністю.

Далі проводиться розрахунок сумарного коефіцієнта теплового відбиття для змішаних поверхонь:

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_{v\lambda} \cdot F + \varepsilon_{s\lambda}(1 - F) + \Delta\varepsilon_\lambda, \quad (2.6)$$

де; ε_λ – коефіцієнт теплового випромінювання земної поверхні в даному пікселі; $\varepsilon_{v\lambda}$, $\varepsilon_{s\lambda}$ – коефіцієнти теплового випромінювання в робочому діапазоні електромагнітного випромінювання для поверхні, повністю вкритою рослинністю та відкритого ґрунту або іншій поверхні, де повністю відсутня рослинність відповідно; $\Delta\varepsilon_\lambda$ – поправка, що враховує нерівномірність відображення шорсткою поверхні (стандартне значення для шорсткою поверхні в діапазоні теплового випромінювання $\Delta\varepsilon_\lambda$ = 0,005).

Для поверхонь, повністю вкритих рослинністю в діапазоні 10,3-11,3 мкм (10 канал даних супутника Landsat-8) досягає значення 0,99 для хвойного лісу та 0,985 для поля люцерни (рис. 2.5) [19]. Усереднене значення приймається за верхній поріг значень максимумів *NDVI* та значення коефіцієнта теплового випромінювання для поверхонь вкритих рослинністю.

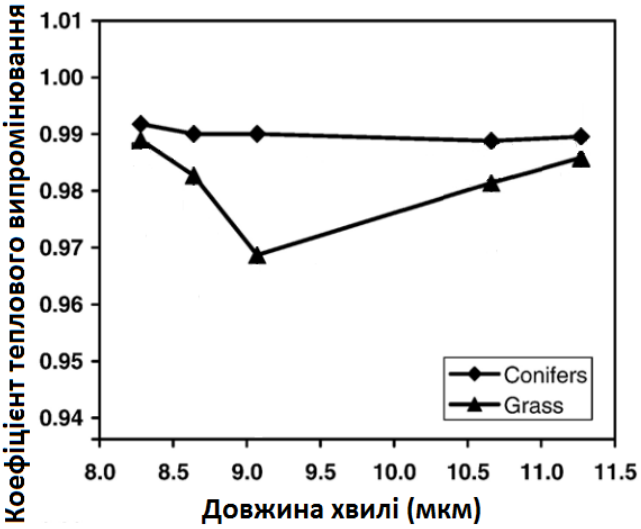


Рис. 2.5. Інструментально визначені значення коефіцієнтів теплового випромінювання для поля люцерни та хвойного лісу

Типове значення верхнього порогу вегетаційного індексу *NDVI* для відкритого ґрунту складає 0,78 а нижнього 0,18 [19], однак ці показники можуть варіюватись в залежності від якості отриманих даних спектрального відбиття у ближній інфрачервоній та червоній областях спектру, які використовуються для

розрахунку *NDVI*, і доцільним є встановлення порогів у ручному режимі. Оскільки в даному дослідженні вегетаційний індекс використовується як величина, відносна до коефіцієнту теплового випромінювання і також використовуються порогові значення індексу, будь-які його коливання в залежності від якості даних та інших чинників не чинять впливу на достовірність результуючого зображення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання.

Нижній поріг коефіцієнта теплового випромінювання та вегетаційного індексу *NDVI* задаються показником, який відповідають відкритому ґрунту. Згідно із існуючими спектральними бібліотеками, наприклад, ASTER Spectral Library, в діапазоні 10,3-11,3 мкм для типових для України ґрунтів класу Mollisol (за класифікацією USDA [20]) коефіцієнт спектрального відбиття складає 2,5-3%, що відповідає коефіцієнту теплового випромінювання 0,975-0,97 (рис. 2.6).

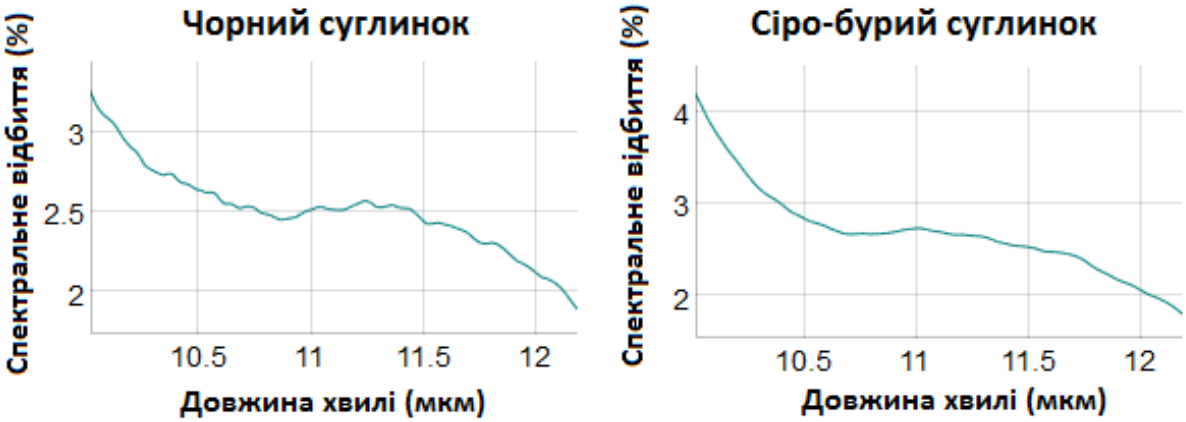


Рис. 2.6. Криві спектрального відбиття суглинкових ґрунтів класу Mollisol

Однак, типові спектри створюються на основі проб ґрунту із нормальним вмістом вологи, в той час як системами дистанційного зондування Землі одержуються зображення поверхні ґрунту, яка під дією сонячного випромінювання втрачає більшу частину вологи. При цьому питома теплоємність ґрунту знижується, і, відповідно, знижується здатність

випромінювати тепло [21]. Інструментальна оцінка коефіцієнта теплового випромінювання дозволила встановити його значення на рівні 0,92 [22].

Загальний розподіл значень коефіцієнта теплового випромінювання за рівнянням 2.6 представлено на рис. 2.7.

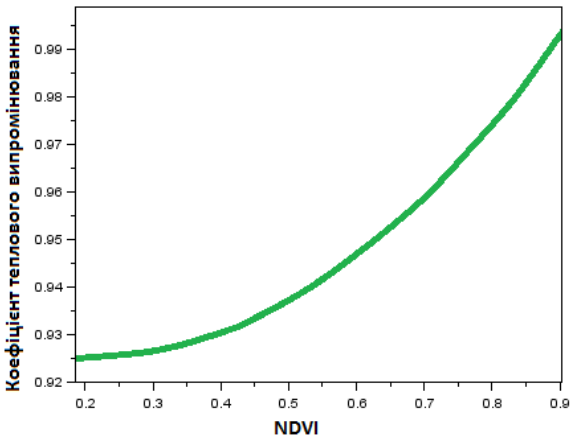


Рис. 2.7. Залежність розподілу коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* для земної поверхні, вкритої рослинністю

Далі відокремлено виконується відновлення коефіцієнтів теплового випромінювання для всіх інших типів поверхонь.

2.2.2.2 Розрахунок розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання поверхонь, відмінних від рослинних покривів та відкритого ґрунту методом регресійної сплайн-інтерполяції

Для покривів, відмінних від розглянутих в розділі 2.2.2 подібної функціональної залежності між коефіцієнтом теплового випромінювання та вегетаційним індексом *NDVI* не існує. Однак, при наявності попередньо визначених експериментально значень можливо відновити цю залежність статистичними методами.

Для проміжку $-1 \le NDVI \le NDVI_0$ взято припущення, що коефіцієнт теплового випромінювання буде зростати зі зменшенням вегетаційного індексу до значення 0,99 при значенні $NDVI = -1$, а при $NDVI = NDVI_0$ коефіцієнт теплового випромінювання дорівнює його значенню для відкритого ґрунту. На

проміжку $NDVI_{\infty} \le NDVI \le 1$ припущено, що коефіцієнт теплового випромінювання буде зростати до 0,995 при $NDVI = 1$. Проміжні вузлові точки для обох діапазонів визначаються на основі регресійної залежності спектрів характерних для досліджуваної території штучних покривів отриманих із бази ASTER Spectral Library від показника вегетаційного індексу *NDVI* за межами його значень, що відповідають рослинним покривам та відкритому ґрунту.

Кожен із отриманих спектрів із бази ASTER Spectral Library скорочується до меж довжин хвиль електромагнітного випромінювання, в яких отримані дані знімання довгохвильового інфрачервоного діапазону.

Далі отримані спектри узагальнюються та перераховуються із спектрального відбиття у коефіцієнт теплового випромінювання, дублювання одержаних значень усувається. Для цього реалізовано скрипт для програмного середовища SciLab (Додаток Б).

На основі отриманих спектрів створюється хмара точок залежності усередненого коефіцієнта теплового випромінювання кожного із типових спектрів від вегетаційного індексу *NDVI* вираженого через спектральну чутливість сенсора у червоному та ближньому інфрачервоному каналах (рис. 2.8). Дана процедура також реалізована у вигляді скрипта (додаток В).

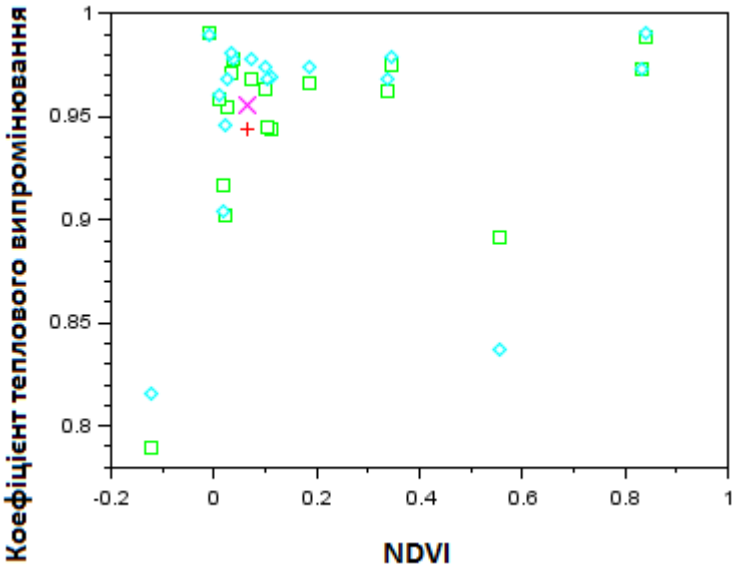


Рис. 2.8. Хмара точок залежності коефіцієнтів теплового випромінювання типових поверхонь від індексу *NDVI*

Невелика кількість та близькі значення ε та *NDVI*, одержані для багатьох природних та штучних поверхонь дозволяють із задовільною точністю описати їх регресійну залежність сплайном, проведеним через оптимально підібрані вузлові точки. Отримана хмара точок усереднюється по обох осях (вісь коефіцієнтів теплового випромінювання та індексу *NDVI*) в межах, які виходять за рамки розподілу вегетаційного індексу для рослинних покривів, і одержані усереднені точки і є вузловими точками, через які виконується квазіоптимальна сплайн-апроксимація функцій залежності *NDVI* від коефіцієнта теплового випромінювання (рис. 2.9).

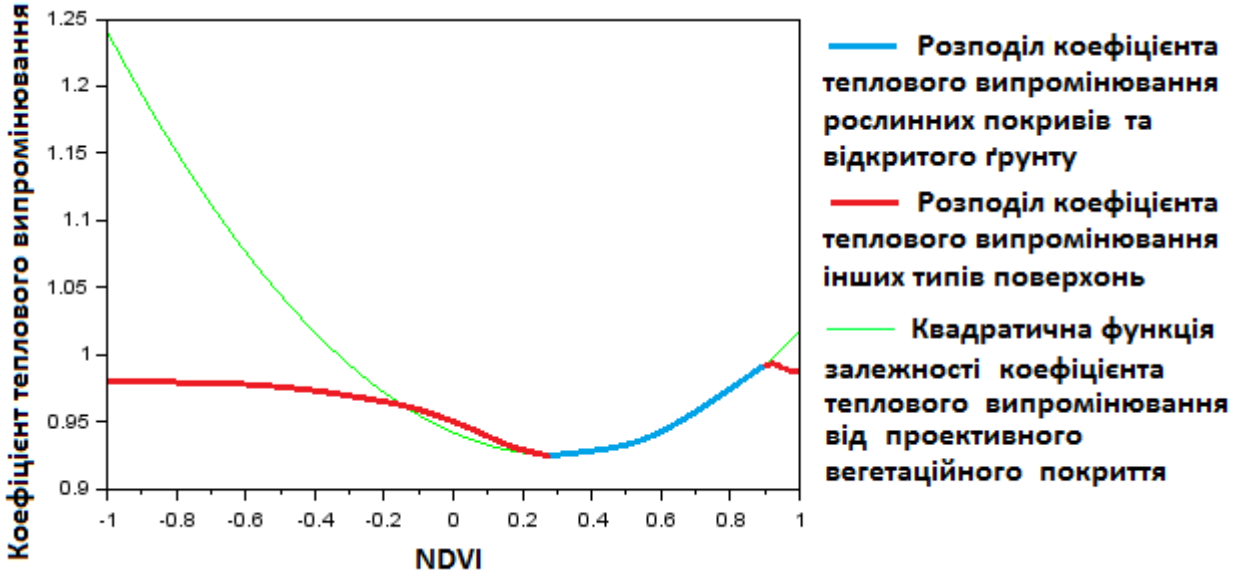


Рис. 2.9. Розподіл залежності коефіцієнта теплового випромінювання земних покривів від вегетаційного індексу NDVI

Об’єднання обох розподілів коефіцієнта теплового випромінювання дає можливість розрахувати узагальнену функціональну залежність коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* для всіх типів покриттів. На основі отриманої функції залежності можливо та вхідного зображення розподілу вегетаційного індексу *NDVI* можливо виконати розрахунок розподілу коефіцієнта теплового випромінювання. Дана процедура реалізована у вигляді програмного скрипта для середовища SciLab (додаток Г).

2.2.3 Розрахунок теплового поля за даними дистанційного зондування

Коефіцієнт теплового випромінювання – головний показник, який дозволяє перейти від значень спектральної густини енергетичної яскравості до значень фізичної температури [23]. Значення температури отримується оберненням рівняння вираження спектральної густини енергетичної яскравості Планка для “сірого” тіла (2.2):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln\left(\frac{\varepsilon(\lambda)\, c_1}{\lambda^5\, L_s} + 1\right)}, \tag{2.7}$$

Перша і друга константи Планка не є зручними для використання в розрахунках, тому зазвичай рівняння (2.7) адаптують за допомогою розрахованих для конкретного сенсора констант K_1 і K_2, встановлених при лабораторному калібруванні під час розробки.

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_s} + 1\right)}, \tag{2.8}$$

де T – температура досліджуваної поверхні (К); L_s – спектральна густина енергетичної яскравості на апертурі сенсора, розрахована з урахуванням атмосферного впливу на випромінювання (рівняння 2.4).

Значення констант K_1 і K_2 для всіх інфрачервоних сенсорів супутників серії Landsat наведено в таблиці 2.2 [24].

Таблиця 2.2

Константи для розрахунку температури сенсорів супутників серії Landsat

	Landsat TM (band 6)	Landsat ETM+ (band 6-1)	Landsat ETM+ (band 6-2)	Landsat TIRS (band 10)	Landsat TIRS (band 11)
K_1	607,76	666,09	666,09	774,89	480,89
K_2	1260,56	1282,71	1282,71	1321,08	1201,14

Реалізація розрахунку температурного поля за допомогою формули 2.8 та попередня обробка, калібрація та коригування атмосферного впливу на випромінювання за атмосферною моделлю 2.4 можлива шляхом застосування растрового калькулятора, який вбудовано в усі існуючі програмні продукти, пов'язані із обробкою даних дистанційного зондування (Harris Geospatial's ENVI, ArcGIS, QGIS, ERDAS Imagine). Для створення растрового зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання можливостей вбудованих растрових калькуляторів недостатньо, тому для реалізації розрахунку необхідне застосування окремих програмних середовищ (наприклад SciLab) або розробка додаткових програмних модулів для середовищ обробки даних ДЗЗ (наприклад, модулів мовою IDL для Harris Geospatial's ENVI).

Застосування даних знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні для розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання дозволяє не лише перейти від радіаційної температури до фізичної температури земних поверхонь та покривів, а і значно підвищити деталізацію результуючого зображення теплового поля за рахунок значно вищої просторової розрізненності у порівнянні із даними довгохвильового інфрачервоного випромінювання.

2.3 Зв'язок інформативності даних аерокосмічного знімання із їх просторовою розрізненністю

Поняття інформативності не має однозначного визначення і його зміст залежить від типу даних, інформативність яких визначається.

Під оцінкою інформативності ми розуміємо апріорну оцінку можливостей спектрального каналу (або комбінацій спектральних каналів) надавати інформацію для вирішення конкретних тематичних задач, це є головною особливістю оцінки, що розглядається [25]. Для оцінювання інформативності даних космічного знімання при вирішенні тематичних задач необхідно опиратись на оцінку імовірності виявлення тих чи інших об'єктів на аерокосмічних знімках. В теорії інформації інформативністю прийнято вважати

обсяг або частку корисної інформації в її повному обсязі. Корисність інформації, що міститься у зображенні,визначається її значенням для вирішення конкретної тематичної задачі. Тому інформативність оцінюється кількістю інформації та вимірюється у відповідних одиницях.

Стосовно растрових геопросторових даних визначено, що їх інформативність прямо залежить від просторової розрізненності знімальної системи [26]. Так, при покращенні просторової розрізненності одновимірних цифрових зображень інформативність збільшується квадратично. Питання інформаційної ємності даних аерокосмічного знімання розглядав Кононов [26, 27].

Інформативність результатів обробки даних довгохвильового інфрачервоного знімання відносно задачі формування зображення розподілу температури поверхонь гетерогенного ландшафту визначається кількістю інформації, яка може бути корисною для правильного розрізнення об’єктів та фонів, характерних для даного ландшафту. Якщо об’єктів та фонів декілька, така інформація має додаватись по всіх парах “об’єкт-фон” та “об’єкт-об’кт”. Основним результатом обробки растрових даних довгохвильового інфрачервоного діапазону є значення температури у кожному пікселі зображення. При залученні даних розподілу коефіцієнта теплового випромінювання більш високої просторової розрізненності можливе виконання більш точного окреслення деталей ландшафту у випадку наявності різниці випромінювальної здатності поверхонь, що підвищує інформативність та більш точне визначення власне температури поверхні. Так, наприклад, при рівномірному розподілі довгохвильового інфрачервоного випромінювання від певної ділянки в різних частинах даної ділянки випромінювальна здатність може бути різною, що при наявності розподілу коефіцієнта теплового випромінювання продемонструє наявність різниці значень фізичної температури між даними ділянками при однаковій радіаційній температурі.

Іншою важливою складовою інформативності знімальної системи є еквівалентне відношення “сигнал-шум” у каналі реєстрації відносно об’єкта та

фону, яке визначає, зокрема, число корисних градацій сигналу, що розрізнюється.

На рис. 2.10 зображено блок-схему проходження сигналів і шумів у дискретному інформаційному каналі, який може бути представлений, наприклад, розподілом температури земних покривів або їх коефіцієнта теплового випромінювання.

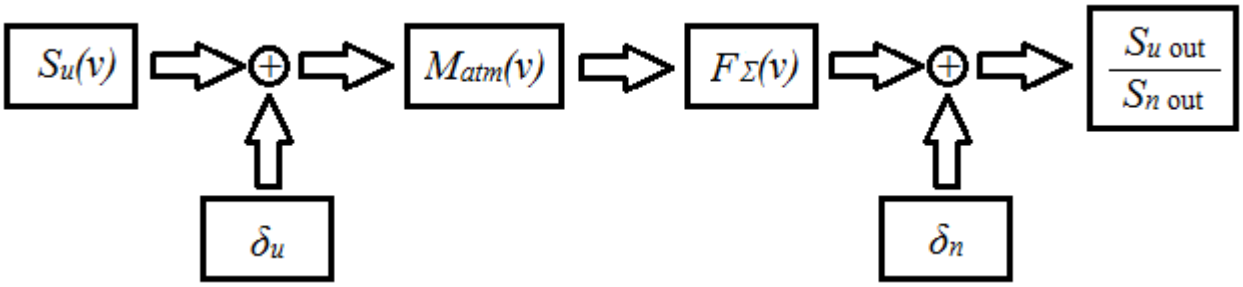


Рис. 2.10. Блок-схема проходження сигналу та шумів

У рис. 2.10 прийняті наступні позначення: $S_u(v)$ – усереднений просторово-частотний спектр Хінчина-Вінера вхідного сигналу; $M_{atm}(v)$ – модель радіаційного переносу атмосфери; $F_\Sigma(v)$ – сумарна функція передачі модуляції оптичної системи та фотоприймача; δ_u – середньоквадратичне значення дисперсії сигналу; δ_n – середньоквадратичне значення дисперсії шуму; $S_{u\ \mathrm{out}}(v)$ та $S_{n\ \mathrm{out}}(v)$ – просторово-частотні спектри Хінчина-Вінера сигналу та шуму відповідно на виході системи; v – узагальнена просторова частота ($v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$, де v_x и v_y – просторові частоти по осям x и y відповідно).

Інформаційна оцінка C визначається наступним чином[27]:

$$C_1 = \pi \int_0^{R_K} v \log_2 \left(1 + \frac{S_{\mathrm{u\,out}}(v)}{S_{\mathrm{n\,out}}(v)} \right) \cdot dv, \qquad (2.9)$$

де R_K – просторова розрізненність для контрасту міри, рівної контрасту об’єкта K.

Вираз для середньої енергії інформаційного сигналу на виході системи, яка зчитується апертурою, рівною площі проекції піксела знімальної системи на

площину об’єктів за певний час експозиції представляється у наступному вигляді:

$$S_{\text{u out}} = (d_0 m)^2 \cdot \Delta t \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\text{o}}^2(\lambda) \cdot \tau_{\Sigma}^2(\lambda) d\lambda = k_{\text{n}}^2 \cdot (d_0 m)^2 \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \overline{L}_{\text{o}}^2(\lambda) \cdot \tau_{\Sigma}^2(\lambda) d\lambda, \qquad (2.10)$$

де $S_{u\ \text{out}}$ – середня енергія інформаційного сигналу на виході системи; d_0 – лінійний розмір фотоприймального елемента знімальної системи, м; Δt – час експозиції, с; $L_o(\lambda)$ и $\overline{L}_o(\lambda)$ – спектральна яскравість об’єкта та спектральна яскравість об’єкта нормування відповідно; k_{n} – коефіцієнт нормування; $\tau_{\Sigma}(\lambda)$ – сумарний коефіцієнт спектрального пропускання атмосфери та оптико-електронної системи сенсора; λ_1 и λ_2 – межі спектрального пропускання сенсора; m – знаменник масштабу знімання.

Енергія шуму на виході представлена у наступному вигляді:

$$S_{\text{n out}} = (d_0 m)^2 \cdot \delta_n^2 \cdot \Delta t, \qquad (2.11)$$

де $S_{\text{n out}}$ – середня енергія шуму інформаційного каналу на виході системи, визначається флуктуаціями вхідного сигналу; δ_{c}^2 – дисперсія вхідного сигналу.

Із рівнянь (2.10) та (2.11) видно, що величини сигналу та шуму на виході системи співвідносяться із площею фотоприймального елемента, приведеного у площину об’єктів. У даних виразах спектральні яскравості сигналів та середньоквадратичні флуктуації яскравості піднесені до квадрату. В даному випадку яскравість є амплітудою сигналу та шуму, а відношення “сигнал-шум” випадкових процесів виражається як відношення спектрівХінчина-Вінера, які по суті є спектрами дисперсій [28].

Гранична просторова розрізненність дискретної системи для контрасту $K = 1{,}0$ у площині об’єктів згідно із теоремою Найквіста визначається наступним чином:

$$R_{1,0} = \frac{1}{2d_0 m}, \tag{2.12}$$

Вираз просторової розрізненності дискретної системи для контрасту *К* дорівнює [29]:

$$R_K = R_{1,0} \cdot \sqrt[4]{K}\,\frac{\sqrt[4]{K}}{2d_0 m}, \tag{2.13}$$

а визначення інформативності набуває наступного вигляду:

$$C = R_K^2 \cdot \log_2\left(1 + \frac{S_{u\ out}}{S_{n\ out}}\right), \tag{2.14}$$

Отже, оцінка інформативності за Кононовим [27] для зображення розподілу температури земних поверхонь набуває наступного змісту:

$$C \cong \frac{\sqrt{K}}{4\left(d_0 m\right)^2} \log_2(1+\psi) \tag{2.15}$$

де *K* – температурний контраст ділянок із найвищою та найнижчою температурами в межах сцени; *d* – просторова розрізненність знімальної системи; ψ – відношення “сигнал-шум”. Розмірність інформативності – біт/м^2.

Таким чином, інформативність можливо виразити через наступні параметри сцени:

– температурний контраст двох ділянок, одна з яких має відносно високу температуру, інша – відносно низьку (дана характеристика є відносною, оскільки залежить від характеру поверхонь, але даний підхід є доцільним при порівняльній оцінці підвищення інформативності двох зображень, коли для порівняння застосовуються одні і ті ж ділянки);

– просторова розрізненність знімальної системи;

– відношення “сигнал-шум”.

Температурний контраст визначається на основі різниці середніх температур двох однорідних ділянок, дисперсія значень температури в межах яких не змінюється при внесенні додаткових даних, наприклад, розподілу коефіцієнта теплового випромінювання, яка збільшує дисперсію значень температури більшості ділянок, при цьому даний приріст являє собою корисний сигнал, а не шум. Наприклад, до достатньо гомогенних територій відносяться водна поверхня, або зорані сільськогосподарські угіддя. Температурний контраст визначається наступним чином:

$$K = \frac{\Delta T}{T_1 + T_0}, \tag{2.16}$$

де ΔT – різниця температур двох ділянок; T_1 – середня температура ділянки із вищою температурою; T_0 – середня температура ділянки із нижчою температурою.

Слід зауважити, що різниця температур між вибраними ділянками має бути якнайменшою, але при цьому має перевищувати дисперсію значень на обох ділянках. На рис. 2.11 представлено приклад визначення температурного контрасту між ділянкою, вкритою піском та відкритою водною поверхнею, виділених у райони інтересу.

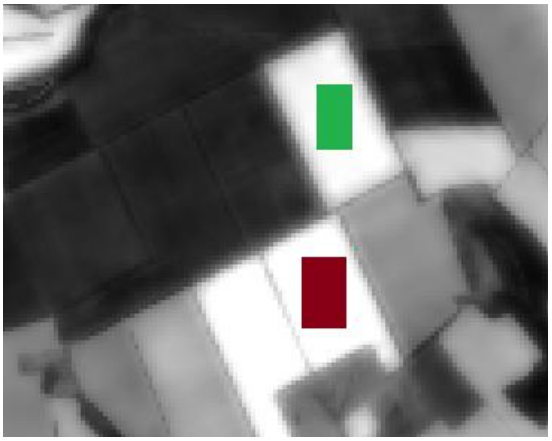


Рис. 2.11. Окреслення районів інтересу для визначення температурного контрасту на зображенні теплового поля між двома полями із різною температурою

Класичним методом оцінки просторової розрізненності одновимірних зображень, в тому числі і дискретних – цифрових є просторово-частотний аналіз, заснований на функціях передачі модуляції (ФПМ) ланок тракту передачі оптичного сигналу. Сумарна ФПМ повністю описує передавальні властивості іконічним систем та має об’єктивний характер вимірювання [30]. На основі зображень, отриманих відповідною знімальною системою та за деякими відомими її параметрами можливо виконати моделювання ФПМ даної знімальної системи [31].

Відношення “сигнал-шум” на основі зображення теплового поля визначається наступним чином [32]:

$$\psi = \frac{\Delta T^2}{\delta_1^2 + \delta_0^2}, \tag{2.17}$$

де δ_1 – середньоквадратичне відхилення значень температури в межах ділянки із вищою температурою; δ_0 – середньоквадратичне відхилення значень температури в межах ділянки із нижчою температурою.

Рівняння (2.16) та (2.17) можливо адаптувати також до зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання.

Інформативність саме інфрачервоних зображень окрім просторової розрізненності додатково оцінюється загальноприйнятим показником *MRTD* (minimum resolvable temperature difference), який є значенням мінімальної розрізнювальної різниці температур з урахуванням просторово-частотних властивостей знімальної системи [33]:

$$MRTD = \frac{\pi}{4}\psi \frac{NETD}{F(\nu)}, \tag{2.18}$$

де *NETD* (noise-equivalent temperature difference) – різниця температур, еквівалентна шуму, *F(ν)* – функція передачі модуляції.

NETD за цифровим інфрачервоним зображенням можна визначити як [34]

$$NETD = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_0^2}\,. \tag{2.19}$$

Таким чином, з урахуванням 2.17 і 2.19 вираз для визначення *MRTD* набуває наступного вигляду:

$$MRTD = \frac{\pi}{4}\left(\frac{\Delta T^2}{\delta_1^2 + \delta_0^2} \cdot \frac{\sqrt{\delta_1^2 + \delta_0^2}}{F(\nu)}\right) = \frac{\pi}{4}\left(\frac{\Delta T^2}{F(\nu)\sqrt{\delta_1^2 + \delta_0^2}}\right). \tag{2.20}$$

В роботі не удосконалюються такі знімальні можливості інфрачервоних систем космічного базування, як відношення “сигнал-шум”, ширина смуги огляду та ін. Тому підвищення інформативності реалізується цілком за допомогою підвищення просторової розрізненності даних знімання програмними методами, наприклад, шляхом спільної субпіксельної обробки пар зображень.

Показник *MRTD* дозволяє визначити мінімальне значення різниці температур, яка являє собою різницю між значеннями корисного сигналу, а не шуму і його порівняння для зображень низької та підвищеної просторової розрізненності дозволяє додатково оцінити приріст інформативності в контексті точності визначення температури за даними дистанційного зондування.

2.4 Метод підвищення просторової розрізненності на основі пар субпіксельно зміщених зображень коефіцієнтів теплового випромінювання

Підвищення просторової розрізненності даних аерокосмічного знімання можливе шляхом залучення субпіксельної обробки зображень. Субпіксельна обробка застосовується до кількох зображень однієї самої сцени, зміщених одно відносно одного на дробову частину геометричного розміру піксела. Підвищення просторової розрізненності досягається за рахунок переходу від

всього набору вхідних до нового спільного зображення із субпіксельною сіткою растра [35].

Субпіксельна обробка набору зображень можлива за умови, що всі зображення отримано із коротким проміжком часу, коли сцена не встигає суттєво змінитися, або у випадку зображень розподілу такої характеристики сцені, яка є інваріантною на проміжку часу їх отримання.

Прикладом інваріантної характеристики може виступити розподіл коефіцієнта теплового випромінювання, із застосуванням результату субпіксельної обробки зображень якого можливо забезпечити підвищення розрізненності [31].

Субпіксельна реєстрація зображень є єдиним можливим способом підвищення просторової розрізненності дистанційного знімання у випадку, коли обмежені можливості регулювання зображувальних властивостей знімальної апаратури.

Зазвичай підвищення просторової розрізненності складається з наступних етапів [36]:

– оцінка субпіксельного зміщення вхідних зображень низької розрізненності;

– злиття зображень низької розрізненності в спільне пересемпльоване зображення на єдиному субпіксельному растрі;

– відновлення прикінцевого зображення підвищеної розрізненності шляхом покращення різкості пересемпльованого зображення.

2.4.1 Формування пар субпіксельно зміщених різночасових зображень коефіцієнтів теплового випромінювання

Зображення для субпіксельної обробки мають бути сформованими із пар зображень, отриманих однією знімальною системою. Також необхідно відбирати пари зображень із мінімально можливим часовим проміжком між зніманнями (для Landsat-8 це – 16 діб). При цьому виключається застосування

сцен із різними значеннями Path і Row (умовна координатна сітка розміщення сцен у системі USGS WRS), оскільки в такому випадку між зображеннями можуть бути наявними кутові зміщення одне відносно іншого, коригування яких призведе до погіршення якості зображень та унеможливить оцінку субпіксельного зміщення. Приклад подібних кутових зміщень ображено на рис. 2.12.

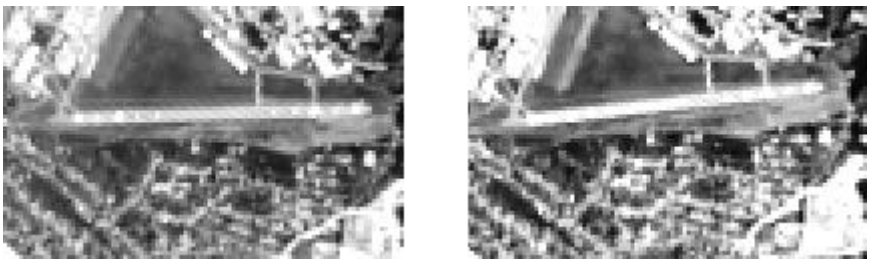


Рис. 2.12. Кутове зміщення зображень одне відносно одного при зніманні однієї ділянки в різних смугах WRS

Також обов'язковою умовою є відсутність хмарності над досліджуваними ділянками на обох зображеннях. Обидва зображення мають бути обрізані до однакового піксельного розміру та зображувати одну й теж сцену із точністю до піксела.

Пари зображень інваріантних даних, які відповідають вказаним вище вимогам, є придатними для субпіксельної обробки і формування вихідного зображення підвищеної розрізненності.

2.4.2 Методика розрахунку субпіксельних зміщень

Субпіксельне зміщення між зображеннями однієї ділянки, отриманих в різний час, наявні завжди через незначні відхилення орбіти супутника, обертання Землі та інші причини. Також субпіксельне зміщення можливо симулювати штучно в лабораторних умовах шляхом зміщення об'єкта знімання або самої знімальної системи [35]. В таких умовах значення зміщень є фіксованим та відомим. Але в умовах роботи із реальними зображеннями поверхні Землі зміщення є стохастичними і вимагають окремого розрахунку.

Напрям орбіти супутникової системи є практично незмінним, тому субпіксельне зміщення можливо розглядати як паралельне перенесення, тобто без кутових зміщень. Таким чином задача зводиться до оцінювання величини та напряму паралельного переносу.

Розрахунок субпіксельного зміщення виконується на основі двох невеликих ділянок зображення, які включають в себе об'єкт із чіткими контурами і високим контрастом відносно фону. Таким об'єктом можуть виступити контури місцевості, великі будівлі, границі водних тіл і т. д.

Методика визначення субпіксельного зміщення будується на основі наступних базових умов [37]:

– визначаються такі значення зміщень, при якому кореляція між суміщеними зображеннями є максимальною;

– використовується дискретне перетворення Фур'є для зменшення обчислювальних витрат;

– використовується пригнічення високочастотної складової для інтерполяції дискретно заданого зображення.

– виконується інтерполяція цільової функції кореляції для переходу від дискретних значення зміщення до абсолютних.

Задано два субпіксельно зміщені зображення Y_1 та Y_2 із розміром $m \times n$ в точках (x, y), $x = 0, 1, \ldots, m-1$, $y=0, 1, \ldots, n-1$. За одиницю довжини приймається сторона піксела, тобто розмір піксела приймається як 1×1.

Далі виконується дискретне перетворення Фур'є:

$$\hat{Y}_k(\theta_1, \theta_2) = \sum_{x=0}^{m-1} y = 0^{n-1} e^{-2\pi(\theta_1 x + \theta_2 y)}, \tag{2.21}$$

де k=1 або k=2 при $\theta_1 = \ldots, -\frac{2}{m}, -\frac{1}{m}, 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \ldots$ та $\theta_1 = \ldots, -\frac{2}{n}, -\frac{1}{n}, 0, \frac{1}{n}, \frac{2}{n}, \ldots$

$\hat{Y}_k(\theta_1, \theta_2)$ доцільно використовувати при $|\theta_1| < \frac{1}{2}$, $|\theta_2| < \frac{1}{2}$.

Далі виконується усунення впливу високочастотної складової зображення шляхом множення перетворення Фур'є на функцію $\omega(\theta_1)\omega(\theta_2)$:

$$\hat{Y}_{k,lo}(\theta_1,\theta_2)=\hat{Y}_k(\theta_1,\theta_2)\omega(\theta_1)\omega(\theta_2), \tag{2.22}$$

де $\omega(\theta)=1, \qquad -0{,}25\le\theta\le 0{,}25;$

$\omega(\theta)=2-4|\theta|, \qquad 0{,}25\le|\theta|\le 0{,}5;$

$\omega(\theta)=0, \qquad |\theta|\ge 0{,}5.$

Відповідне перетворення у просторовій області – це інтерполяція зображення шляхом згортки з функцією $\text{const}\cdot\left(\cos\frac{\pi x}{2}-\cos\pi x\right)\left(\cos\frac{\pi y}{2}-\cos\pi y\right)$. Однак це перетворення не є точною інтерполяцією, оскільки при його застосуванні змінюється значення функції в точках, де ця функція задана. Для того, щоб значення функції не змінювалось, слід взяти

$\omega(\theta)=1, \qquad -\frac{1}{3}\le\theta\le\frac{1}{3};$

$\omega(\theta)=2-3|\theta|, \qquad \frac{1}{3}\le|\theta|\le\frac{2}{3};$

$\omega(\theta)=0, \qquad |\theta|\ge\frac{2}{3}.$

В результаті паралельного перенесення зображення на $(\Delta x,\ \Delta y)$, дискретних субпікселів піксела основного зображення, тобто $Y_{\overline{(\Delta x,\Delta y)}}(x,y)=Y(x+\Delta x,\ y+\Delta y)$, його Фур'є-перетворення змінюється таким чином:

$$\hat{Y}_{\overline{(\Delta x,\Delta y)}}(\theta_1,\theta_2)=\hat{Y}_k(\theta_1,\theta_2)e^{2\pi(\theta_1\Delta x+\theta_2\Delta y)}. \tag{2.23}$$

При цьому пікселі, що знаходяться на краю зображення, нехтуються. Перетворенню Фур'є, визначеному за допомогою формули (2.23), відповідає зсув із згортанням зображення: та частина зображення, яка знаходиться біля його межі, переноситься до його протилежної межі.

Для обчислення кореляції між зображеннями використовується рівність Парсеваля: якщо $\hat{Y}_k(\theta_1,\theta_2)$ є перетвореннями Фур'є функцій $\hat{Y}_k(x,y)$ заданих при $0 \le x \le m,\ 0 \le y \le n$, тобто

$$\hat{Y}_{k,lo}(\theta_1,\theta_2) = \int_0^m \int_0^m e^{-2\pi(\theta_1 x + \theta_2 y)} Y_k(x,y)\,dxdy \tag{2.24}$$

то

$$\int_0^m \int_0^m Y_1(x,y) Y_2(x,y)\,dxdy = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{\theta_1 = \ldots, -\frac{1}{m}, 0, \frac{1}{m}, \ldots} \sum_{\theta_1 = \ldots, -\frac{1}{n}, 0, \frac{1}{n}, \ldots} \overline{\hat{Y}_1(\theta_1,\theta_2)} \hat{Y}_2(\theta_1,\theta_2) \tag{2.25}$$

Перетворення Фур'є другого зображення, зміщеного на $(\Delta x,\ \Delta y)$ після пригнічення високочастотної складової має вигляд:

$$\hat{Y}_{2,lo,\overline{(\Delta x,\Delta y)}}(\theta_1,\theta_2) = \hat{Y}_{2,lo}(\theta_1,\theta_2) e^{2\pi(\theta_1 \Delta x + \theta_2 \Delta y)}. \tag{2.26}$$

Функція кореляції зображень має наступний вигляд:

$$\begin{aligned} Q(\Delta x,\Delta y) &= \sum_{\theta_1 = \ldots, -\frac{1}{m}, 0, \frac{1}{m}, \ldots} \sum_{\theta_1 = \ldots, -\frac{1}{n}, 0, \frac{1}{n}, \ldots} \overline{Y_{1,lo}(\theta_1,\theta_2)} Y_{2,lo,\overline{(\Delta x,\Delta y)}}(\theta_1,\theta_2) = \\ &= \sum_{k_1 = -\lfloor m/2 \rfloor}^{\lfloor m/2 \rfloor} \sum_{k_2 = -\lfloor n/2 \rfloor}^{\lfloor n/2 \rfloor} \overline{Y_{1,lo}\left(\frac{k_1}{m},\frac{k_2}{n}\right)} Y_{2,lo}\left(\frac{k_1}{m},\frac{k_2}{n}\right) \times \exp\left\{2\pi\left(\frac{k_1 \Delta x}{m} + \frac{k_2 \Delta y}{n}\right)\right\}. \end{aligned} \tag{2.27}$$

За дискретне зміщення одного зображення відносно іншого по осях x та y приймаються такі значення Δx та Δy, при яких значення функції $Q(\Delta x,\Delta y)$ є максимальним.

Далі виконується уточнення значення зміщення. Для цього отримані показники функцій кореляції у субпікселах інтерполюються і визначається максимум інтерпольованої функції в межах попередньо визначеного дискретного субпіксела із максимальним значенням $Q(\Delta x,\Delta y)$.

Таким чином, при переході до інтерпольованої функції кореляції можливо отримати абсолютне значення зміщення із достатньо високою точністю.

Алгоритм визначення субпіксельного зміщення повторюється для декількох пар опорних зображень і з результатів оцінки яких формується вибірка значень, середнє із якої приймається значення субпіксельного зміщення одного зображення відносно іншого.

2.4.3 Відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності

Визначення значень субпікселів зображення підвищеної розрізненності X ($\mathrm{vec}\, X = x$) зводиться до системи лінійних рівнянь [38], яка у матричному вигляді записується як

$$Ax = y + e, \tag{2.28}$$

де y – пересемпльоване вхідне зображення, розгорнуте у вектор, A – лінійний оператор підвищення розрізненності, e – вектор залишкових похибок.

Для відновлення зображення підвищеної розрізненності застосовується метод гауссівської регуляризації [35]. Зображення підвищеної розрізненності та похибки в рівнянні (2.28) E ($\mathrm{vec}\, E = e$) вважаються стаціонарними випадковими полями. Тоді оцінку x можна записати у вигляді

$$\hat{x} = L(y - \bar{y}) + \bar{y}, \tag{2.29}$$

де

$$L = \Sigma_x A^{\mathrm{T}} (A \Sigma_x A^{\mathrm{T}} + \Sigma_e) - \tag{2.30}$$

оператор регуляризації, Σ_x та Σ_e – коваріаційні матриці векторів x та e.

Щоб запобігти накопиченню шумів та зменшення обчислювальних витрат (в основному – вимог щодо потрібного об’єму пам’яті), можна застосовувати розв’язок, аналогічний (2.29), в ковзаючому вікні зображення для лише

центрального піксела вікна.

При практичній реалізації даного методу виявлено деградацію контрасту та певну зашумленість вихідного зображення. Для усунення деградації контрасту оператор L було модифіковано так, щоб його функція передачі контрасту для об'єктів, сумірних з розміром вікна, дорівнювала одиниці. Для зменшення зашумленості зображення використано метод ітеративної реконструкції зображення [39]. Метод полягає у почерговій регуляризації відновленого зображення та усуненні нев'язкок – похибок, які отримуються при підстановці відновленого зображення у рівняння (2.28).

Система лінійних рівнянь (2.28) є недовизначеною, тобто містить більш невідомих ніж кількість рівнянь. При перерозподілі значень чотирьох сусідніх пікселів відновленого зображення, які складають піксел зображення низької розрізненності, рівність (2.28) не порушиться. Це дозволяє накласти умови регулярності, задані нерівностями:

$$\min(x_{2i-1,2j},\ x_{2i,2j+1}) \le \max(x_{2i-1,2j+1},\ x_{2i,2j}), \tag{2.31}$$

$$\max(x_{2i-1,2j},\ x_{2i,2j+1}) \ge \min(x_{2i-1,2j+1},\ x_{2i,2j}), \tag{2.32}$$

$$\min(x_{2i,2j-1},\ x_{2i+1,2j}) \le \max(x_{2i,2j},\ x_{2i+1,2j-1}), \tag{2.33}$$

$$\max(x_{2i,2j-1},\ x_{2i+1,2j}) \ge \min(x_{2i,2j},\ x_{2i+1,2j-1}). \tag{2.34}$$

Кожні чотири пікселі зображення підвищеної розрізненності, де ці нерівності порушуються є "шаблонами".

Таким чином, математична модель відновлення зображень передбачає опис таких основних процедур: суміщення вхідних зображень, мінімізації нев'язок між поточним та цільовим зображеннями, усунення шаблонів та власне ітеративну реконструкцію зображення підвищеної розрізненності.

2.4.4 Ітеративна реконструкція зображення

Задачею ітеративної реконструкції зображень є послідовне усунення

нев'язок відновлюваного зображення з одночасним придушенням шумів. На кожній ітерації обчислюється поточна нев'язка отриманого зображення з попереднім по всьому полю, і за максимальним її значенням приймається рішення про продовження подальшої обробки. При стабілізації величини максимальної нев'язки обробка закінчується.

Придушення шумів здійснюється за допомогою медіанної фільтрації на етапі зменшення розрізненності відновленого зображення. Медіанну фільтрацію обрано тому, що основними очікуваними шумами в процесі реконструкції зображення підвищеної розрізненності є артефакти відновлення, за своєю природою схожі з імпульсними завадами [40].

Відновлюється зображення регуляризованим лінійним перетворенням у ковзаючому вікні. Це перетворення можна записати так:

$$x^{(0)} = L_w(y - \bar{y}) + \bar{y}, \tag{2.35}$$

де $y - \bar{y}$ – вхідне пересемпльоване центроване зображення, розгорнуте у вектор, L_w – оператор регуляризації (2.30), модифікований для перетворення у ковзаючому вікні, $x^{(0)}$ – перше наближення зображення, розгорнуте у вектор.

Далі виконується ітераційне розв'язання рівнянь вигляду

$$A(x - \bar{x}) = y - \bar{y} \ . \tag{2.36}$$

Нехай $x^{(i)}$ – попереднє наближення x. На наступній ітерації виконуються:

1) Регуляризація зображення $x^{(i)}$, яка складається із забезпечення нерівностей (2.31) – (2.34) та застосування медіанного фільтру.

2) Усунення нев'язки $(z^{(i)} - \bar{x}) - (y - \bar{y})$:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} + L[y - \bar{y} - A(z^{(i)} - \bar{x})], \tag{2.37}$$

де $z^{(i)}$ – результат регуляризації зображення $x^{(i)}$.

Наведена ітераційна процедура розв’язує недовизначену систему лінійних рівнянь (2.36) та закінчується, коли нев’язка $\max[(z^{(i)} - \bar{x}) - (y - \bar{y})]$ стане меншою за наперед задану величину.

Висновки до другого розділу

1. Розглянуто метод розрахунку температури земних покривів за даними дистанційного зондування Землі, визначено критерії відбору зображень для його реалізації.

2. Обґрунтовано можливість обробки даних знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні паралельно із даними довгохвильового інфрачервоного діапазону, з метою розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів та підвищення деталізації результуючого зображення.

3. Розроблено метод розрахунку просторового розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів без вегетаційного покриття на основі бібліотеки спектрів відбиття, створеної для заданої території знімання.

4. Розроблено новий метод підвищення просторової розрізненності зображень розподілу інваріантної в часі величини на основі пари різночасових субпіксельно зміщених зображень. Метод рекомендовано для підвищення просторової розрізненності розподілу коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні.

Список використаних джерел

1. Попов М. О., Ліхоліт М. І., Станкевич С. А., Полежаєв В. В., Тягур В. М., Титаренко О. В. Перспективи використання інфрачервоного аерознімання для вирішення природоресурсних спеціальних задач. *Наукові аспекти геодезії, землеустрою та інформаційних технологій*: Праці науково-практичної конференції (Київ, 10-13 травня 2011). К.: Національний авіаційний університет, 2011. С. 33-39.
2. Gillespie A., Rokugawa S., Matsunaga T., Cothern J. S., Hook S., Kahle A. B. Temperature and emissivity separation algorithm for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998. Vol. 36. № 4. P. 1113-1126.
3. Landsat 8 (L8) data user's handbook: Version 2.0. U.S. Geological Survey. URL: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf. (Дата звернення 12.04.2017)
4. Станкевич С. А., Пилипчук В. В., Лубський М. С., Крилова Г. Б. Оцінка точності визначення температури штучних та природних земних поверхонь за результатами інфрачервоного космічного знімання. *Космічна наука і технологія*, 2016. Т. 101. № 4. С. 19-28.
5. Shaw G. A., Burke H. K. Spectral Imaging for Remote Sensing. *MIT Lincoln Laboratory Journal*, 2003. Vol. 14. № 1. P. 3-28.
6. Kim W., He T., Wang D., Cao C. Assessment of Long-Term Sensor Radiometric Degradation Using Time Series Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014. Vol. 52. № 5. P. 2960-2976.
7. Yang X., Lo C. P. Relative Radiometric Normalization Performance for Change Detection from Multi-Date Satellite Images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000. Vol. 66. № 8. P. 967-980.
8. 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 Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113. № 5. P. 893-903.

9. Tang H., Li Z.-L. Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications. Berlin: Springer-Verlag, 2014. 281 p.
10. Kiehl J. T., Trenberth E. K. Earth's Annual Global Mean Energy. *Budget Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997. Vol. 78. № 2. P. 197-208.
11. Yu X., Guo X., Wu Z. Land surface temperature retrieval from Landsat-8 TIRS - comparison between radiative transfer equation-based method, split window algorithm and single channel method. *Remote Sensing*, 2014. Vol. 6. № 10. P. 9829-9852.
12. Vidal A. Atmospheric and emissivity correction of land surface temperatures measured from satellite using ground measurements or satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 1991. Vol. 12. № 12. P. 2449-2460.
13. Barsi J. A., Barker J. L., Schott J. R. An atmospheric correction parameter calculator for a single thermal band Earth-sensing instrument. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARRS'03)*: Proceedings of the International conference (Toulouse, France, 21-25 July, 2003). IEEE, 2003. P. 3014-3016.
14. Yang H., Zhang L. F., Zhang X., Fang C., Tong Q. Algorithm of emissivity spectrum and temperature separation based on TASI data. *Journal of Remote Sensing*, 2011. Vol. 15. № 6. P. 1242-1254.
15. Баранов В. Л., Водоп'ян С. В., Грищук Р. В. Алгоритм автоматизованого оцінювання спектрального коефіцієнта теплового випромінювання. *Вісник ЖДТУ*, 2006. № 4(39). С. 77-83.
16. Barducci A., Pippi I. Temperature and emissivity retreieval from remotely sensed images using the "Grey body emissivity" method. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996. Vol. 34. № 3. P. 681-695.
17. Sobrino J. A., Raissouni N. Toward remote sensing methods for land cover dynamic monitoring: Application to Morocco. *International Journal of Remote Sensing*, 2000. № 21. P. 353-366.
18. Sobrino J. A., Jiménez-Muñoz J. C., Paolini L. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 2004. Vol. 90. P.434-440.

19. Jiménez-Muñoz J. C., Sobrino J. A., Gillespie A., Sabol D., Gustafson W. T. Improved land surface emissivities over agricultural areas using ASTER NDVI. *Remote Sensing of Environment*, 2006. Vol. 103. P. 474-487.
20. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Agriculture Handbook - United States Department of Agriculture. URL: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf (Дата звернення: 15.04.2017)
21. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Основы и методы дистанционных исследований в геологии (пер. с нем.). М.: Мир, 1988. 343 с.
22. Perez Hoyos I. C. Comparison between land surface temperature retrieval using classification based emissivity and NDVI based emissivity. *International Journal of Recent Development in Engineering and Technology*, 2014. Vol. 2. № 2. P. 26-30.
23. Blundell S., Blundell K. Concepts in thermal physics. Oxford University Press, 2006. 247 p.
24. 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 Sensing of Environment*, 2009. Vol. 113. № 5. P. 893-903.
25. Станкевич С. А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі. *Доповіді НАН України*, 2006. № 10. С. 136-139.
26. Кононов В. И., Станкевич С. А. Сравнительная оценка цифровых аерокосмических изображений высокого и низкого разрешения. *Ученые записки Таврического национального университета им. В. И. Вернадского*, 2004. Т. 17. № 2. С. 88-95
27. Кононов В. И. Связь информационных и вероятностных оценок систем формирования изображений (иконических систем). *Оптико-механическая промышленность*, 1991. № 11. С. 13-18.
28. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1977. 600 с.

29. Кононов В.И. Обоснование методики определения разрешения на местности аэрокосмических систем с дискретными фотоприемниками. *Космічна наука і технологія*, 2002. Т. 8. № 2-3. С. 91-102.
30. Станкевич С. А., Шолоник О. В. Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков. “Науки про Землю та космос - суспільству”: праці Першої наукової конференції (Київ, 25-27 червня 2007). Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 2007. С. 11-14
31. Stankevich S. A., Shklyar S. V., Podorvan V. N., Lubskyi N. S. Thermal infrared imagery informativity enhancement using sub-pixel co-registration. 2016 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT): Proceedings of the International conference (Rzeszów, Poland 5¬-7 July 2016). IEEE, 2016. P. 245-248
32. Сивяков И. Н. Расчет разрешения оптико-электронных систем. *Оптический журнал*, 1998. Т. 65. № 2. С. 60-63.
33. Колобродов В. Г., Лихоліт М. І., Тягур В. М. Мінімальна розділювана різниця температур тепловізора аерокосмічного базування. *Космічна наука і технологія*, 2014. Т. 20. № 1. С. 23-27.
34. Станкевич С.А. Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень. *Космічна наука і технологія*, 2005. Т. 11. № 3/4. С. 81-84.
35. Попов М. А., Станкевич С. А., Шкляр С. В. Алгоритм повышения разрешения субпиксельно смещенных изображений. *Математичні машини і системи*, 2015. № 1. С. 29-36.
36. Young S. S., Driggers R. G., Jacobs E. L. Signal Processing and Performance Analysis for Imaging Systems. Norwood: Artech House, 2008. 304 p.
37. System and method of super-resolution imaging from a sequence of translated and rotated low-resolution images: пат. US7856154 B2 Сполучені Штати Америки. МПК G06K 9/32. Young S. S.; заявл. 08.09.2009. Опубл. 21.12.2010.
38. Станкевич С.А., Шкляр С.В., Лубський М. С. Підвищення просторової розрізненності аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень

Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації, 2013. № 9(16). С. 110-117.

39. Bannore V. Iterative-Interpolation Super-Resolution Image Reconstruction: A Computationally Efficient Technique. Berlin: Springer, 2009. 113 p.
40. Грузман И. С., Киричук В. С., Косых В. П., Перетягин Г. И., Спектор А. А. Цифровая обработка изображений в информационных системах. Новосибирск: НГТУ, 2000. 156 с.

РОЗДІЛ 3
РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ВІДНОВЛЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ПІДВИЩЕНОЇ ІНФОРМАТИВНОСТІ

Методика відновлення зображень теплових полів підвищеної інформативності має складатися з ряду алгоритмів, в результаті використання яких отримуються зображення теплових полів підвищеної просторової розрізненості у порівнянні із вхідними даними знімання та із високою точністю визначення температури наземних поверхонь, значення яких завіряється шляхом підсупутникових вимірювань температури та коефіцієнта теплового випромінювання.

Розроблювані алгоритми дозволяють сформувати відповідні програмні модулі, що реалізують методику відновлення зображень теплових полів підвищеної інформативності.

3.1 Розробка алгоритмів відновлення теплового поля за даними космічного знімання у видимому, ближньому інфрачервоному та довгохвильовому інфрачервоному діапазонах

В основі методики відновлення теплового поля за даними космічного знімання лежить паралельна обробка даних знімання багатоспектральною системою та даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного спектру.

Дані видимого та ближнього інфрачервоного діапазону використовуються для обчислення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання покриттів і поверхонь сцени знімання. Порядок обробки даних складається з складається з декількох кроків, його може бути описано алгоритмом 3.1.

Алгоритм 3.1. Алгоритм розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання.

Крок 1. Відбір багатоспектральних зображень, які відповідають критеріям, описаним в п. 2.1.1.

Крок 2. Радіометричне калібрування та атмосферна корекція зображень;

Крок 3. Формування зображення розподілу вегетаційного індексу NDVI в межах сцени;

Крок 4. Встановлення порогових значень *NDVI* для поверхонь, повністю вкритих рослинністю та ділянок без рослинного покриву;

Крок 5. Відновлення квадратичної залежності коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* для поверхонь, вкритих рослинністю, як описано в п. 2.2.2.2;

Крок 6. Відбір з бази спектрів типових покриттів, відмінних від рослинності, тих, що присутні в межах досліджуваної сцени та будуть застосовуватися при обробці;

Крок 7. Розрахунок за відібраними спектрами хмари точок залежності коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* за межами їх розподілу для рослинних покривів, як описано в п. 2.2.2.3.

Крок 8. Визначення усереднених вузлових точок залежності коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* за межами їх розподілу для рослинних покривів;

Крок 9. Побудова апроксимуючої сплайн-інтерполяції залежності значення коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* для нерослинних поверхонь через одержані вузлові точки та крайні значення *NDVI* для рослинності.

Крок 10. Побудова повної функціональної залежності коефіцієнта теплового випромінювання від вегетаційного індексу *NDVI* для всього можливого діапазону [–1 .. 1].

Крок 11. Послідовний розрахунок розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання для всіх пікселів розподілу *NDVI* за побудованою на кроці 10 залежністю.

Перевагою даного алгоритму є те, що завдяки суміщенню на одній платформі сенсорних систем видимого, ближнього інфрачервоного діапазонів та довгохвильового інфрачервоного випромінювання реалізовується можливість точного, попіксельного суміщення отриманого зображення розподілу

коефіцієнта теплового випромінювання та даних сенсора довгохвильового інфрачервоного діапазону. Також за рахунок більш високої просторової розрізненності даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону отриманий розподіл коефіцієнта теплового випромінювання дозволяє значно підвищити інформативність та деталізацію результуючого теплового воля порівняно із вхідними даними.

Формування зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання необхідне для подальшого переходу від значень спектральної щільності енергетичної яскравості земної поверхні у довгохвильовій області інфрачервоного спектру до значень фізичної температури. Такий перехід реалізується алгоритмом 3.2.

Алгоритм 3.2. Розрахунок фізичної температури земних покривів та поверхонь за даними космічного знімання в інфрачервоному діапазоні.

Крок 1. Розрахунок значень спектральної щільності енергетичної яскравості на сенсорі, як описано в п. 2.2.1;

Крок 2. Визначення показників спектральної щільності енергетичної яскравості висхідного атмосфери в напрямку сенсора, нисхідного випромінювання в напрямку поверхні Землі, та показника спектрального коефіцієнта проникності атмосфери на основі параметрів знімання та погодних умов за допомогою спеціалізованого калькулятора атмосферних параметрів, як описано в п. 2.2.1.

Крок 3. Розрахунок скоригованого розподілу спектральної щільності енергетичної яскравості земної поверхні за моделлю радіаційного переносу (2.4) з отриманими на кроці 2 параметрами;

Крок 4. Розрахунок фізичної температури поверхонь території за оберненою формулою Планка (2.8) із залученням розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, отриманого при виконанні алгоритму 3.1.

Алгоритм 3.2 реалізовано як окремий програмний модуль мовою IDL до програмного забезпечення обробки даних дистанційного зондування ENVI.

Для перевірки точності алгоритмів розрахунку фізичної температури земних поверхонь та їх коефіцієнта теплового випромінювання необхідне виконання підсупутникових завіркових вимірювань, які виконуються за алгоритмом 3.3.

Алгоритм 3.3. Виконання завіркових польових вимірювань температур земних поверхонь та їх коефіцієнта теплового випромінювання.

Крок 1. Аналіз місцевості в межах території досліджень та відбір тестових ділянок, та за якими будуть вимірюватися значення фізичної температури земної поверхні та коефіцієнта теплового випромінювання.

Крок 2. Одержання графіку знімання супутниковою системою тестових ділянок та створення відповідного йому графіка виконання підсупутникових завіркових вимірювань;

Крок 3. Виконання підсупутникових завіркових вимірювань температури та коефіцієнта теплового випромінювання поверхонь тестових ділянок за графіком, створеним на кроці 2.

Крок 3.1. Вимірювання фізичної температури поверхні тестової ділянки за допомогою контактного польового термометра.

Крок 3.2. Вимірювання радіаційної температури поверхні тестової ділянки за допомогою інфрачервоного польового пірометра.

Крок 3.3. Визначення значення коефіцієнта теплового випромінювання поверхні тестової ділянки за результатами вимірювань фізичної та радіаційної температур шляхом підбору такого значення коефіцієнта теплового випромінювання, при якому радіаційна температура буде дорівнювати фізичній [1].

Крок 3.4. Повторення кроків 3.1 та 3.2, як мінімум, на п’яти різних точках тестової ділянки для одного типа покриття для створення репрезентативної вибірки вимірювань.

Крок 4. Проведення обробки даних дистанційного зондування, одержаних (квазі)синхронно із наземними завірковими вимірюваннями, та розрахунок

розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання та температурного поля за алгоритмами 3.1 та 3.2.

Крок 5. Оцінка точності визначення температури земних поверхонь та розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання за даними дистанційного зондування шляхом порівняння їх значень в точках тестових ділянок із значеннями, отриманими за результатами наземних завіркових вимірювань.

Результатом реалізації алгоритму 3.3 є середньоквадратичні похибки визначення фізичної температури земних покривів та коефіцієнтів теплового випромінювання за даними дистанційного зондування.

Послідовне виконання алгоритмів 3.1 та 3.2 дозволяють отримати зображення теплового поля з врахуванням впливу атмосфери та характеристик земних покривів, що впливають на їх термофізичні властивості.

3.2 Розробка алгоритмів відновлення зображень теплового поля підвищеної розрізненності та оцінки підвищення просторової розрізненності

В основі формування зображень теплового поля лежить залучення до алгоритму 3.2 зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання більш високої розрізненності, ніж власне інфрачервоні зображення довгохвильового діапазону, при цьому просторова розрізненність останніх залишається незмінною.

Для підвищення просторової розрізненності розподілу теплових полів застосовується спільна обробка кількох, як правило – двох, субпіксельно зміщених зображень єдиної фізичної природи, отриманих з мінімально можливим часовим інтервалом.

Субпіксельні зміщення одного зображення відносно іншого вважаються результатам паралельного перенесення, тому для підвищення просторової розрізненності достатньо попередньо визначити величину і напрям субпіксельного зміщення. Таке визначення реалізується алгоритмом 3.4.

Алгоритм 3.4. Алгоритм визначення субпіксельного зміщення вхідних зображень одне відносно одного.

Крок 1. Отримання пари зображень однієї і тієї же сцени із мінімальним часовим інтервалом знімання.

Крок 2. Виділення на кожному з вхідних зображень опорної ділянки з однорідною текстурою та чітким висококонтрастним контуром.

Крок 3. Встановлення кроку субпіксельної дискретизації зміщення, яке відповідає за точність його попередньої оцінки.

Крок 4. Переведення кожного із зображень опорної ділянки із просторової у частотну область за допомогою дискретного перетворення Фур'є (ДПФ).

Крок 5. Усунення впливу високочастотної стохастичної складової зображення для нівелювання її впливу на оцінку зміщення за допомогою формули 2.10.

Крок 6. Застосування рівності Парсеваля для оцінювання функції кореляції зображень одне з одним;

Крок 7. Розрахунок функції кореляції для кожної пари значень дискретного зміщення. Субпіксел, в якому функція кореляції набуває максимуму визначає дискретні значення зміщення одного зображення опорної ділянки відносно іншого.

Крок 8. Інтерполяція функції кореляції та визначення її максимуму в межах субпіксела, визначеного на кроці 7, для уточнення величини зміщення. Точка максимуму функції визначає уточнене значення субпіксельного зміщення одного зображення відносно іншого.

Крок 9. Повторення алгоритму для різних пар опорних ділянок в різних місцях сцени для формування вибірки значень зміщення. Усереднені значення вибірок зміщень по горизонтальній та вертикальній осях приймаються за значення зміщення всієї сцени відносно іншої.

Описаний алгоритм оцінки значень субпіксельного зміщення по двох осях реалізовано розрахунковим скриптом в обчислювальному середовищі SciLab

(Додаток Д). Результатом виконання скрипта є значення субпіксельного зміщення одного зображення відносно іншого по горизонтальній та вертикальній осях.

Після оцінки субпіксельного зміщення виконується відновлення зображення підвищеної розрізненності на основі пари вхідних різночасових зображень. Процедура отримання зображення підвищеної просторової розрізненності включає в себе черезрядкове черезпіксельне поєднання вхідних зображень в порядку, що визначається знаками субпіксельного зміщення по двох осях, причому лише половина пікселів поєднаного зображення визначається пікселами двох вхідних зображень, та наступне відновлення відсутніх пікселів результуючого зображення методом статистичної регуляризації з урахуванням шумів за алгоритмом 3.5.

Алгоритм 3.5. Алгоритм відновлення зображення підвищеної просторової розрізненності.

Крок 1. Підготовка субпіксельно зміщених одне відносно одного зображень однієї ділянки та однакового розміру.

Крок 2. Підготовка шумового зображення (описується нижче).

Крок 3. Черезрядкове черезпіксельне поєднання вхідних зображень низької розрізненності за знаками субпіксельного зміщення.

Крок 4. Знаходження середнього значення та цільової автоковаріаційної функції вихідного зображення:

Крок 4.1. Середнє значення розраховується усередненням вхідних зображень.

Крок 4.2. Автоковаріаційна функція оцінюється на основі припущення, що коваріація між просторово віддаленими пікселами зображення знижується за законом гаусоїди; параметри гаусоїди визначаються за черезстроковим зображенням.

Крок 5. Знаходження автоковаріаційної функції шумового зображення шляхом сканування його вікном та оцінки модуля функції у кожному положенні вікна. За шумову автоковаріаційну функцією приймається та, для якої модуль є

мінімальним.

Крок 6. Розкладання зображень на низькочастотну та високочастотну складові: $\begin{matrix} Y_1 = Y_1^{\text{lo}} + Y_1^{\text{hi}}, \\ Y_2 = Y_2^{\text{lo}} + Y_2^{\text{hi}}. \end{matrix}$ Низькочастотна складова отримується згладжуванням зображень методом ковзного середнього.

Крок 7. Поєднання низькочастотних складових зображень шляхом інтерполяції.

Крок 8. Обчислення оператора регуляризованого оберненого перетворення у вікні за формулою 2.18.

Крок 9. Обчислення початкового наближення $x^{(0)} = L\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$,

де y_1 та y_2 – фрагменти високочастотних складових зображень низької розрізненості Y_1^{hi} та Y_2^{hi}, розгорнуті у вектори, L – матриця перетворення регуляризованого збільшення розрізненності.

Крок 10. Регуляризація зображення за допомогою медіанного фільтру.

Крок 11. Імітація погіршення просторової розрізненності: $\begin{pmatrix} y_1^{rest} \\ y_2^{rest} \end{pmatrix} = Ax^{(k)}$, $k = 0$.

Крок 12. Розрахунок нев'язок між початковим наближенням та зображенням: $\Delta y_1 = y_1 - y_1^{\text{rest}}$ та $\Delta y_2 = y_2 - y_2^{rest}$.

Крок 13. Знаходження поправки: $\Delta x = L\begin{pmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \end{pmatrix}$, та врахування цієї поправки $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x$.

Крок 14. Якщо $k \geq K_{\max}$, перейти до кроку 15. Якщо $k < K_{\min}$ або якщо поправка почала збільшуватись (тобто якщо $||x^{(k+1)} - x^{(k)}|| > ||x^{(k)} - x^{(k-1)}||$), перейти до наступної ітерації та для цього збільшити k, покладаючи $k = k+1$, далі повторити кроки 12-13.

Крок 15. Формування високочастотної компоненти X^{hi} з елементів

вектору $x^{(k)}$.

Крок 16. Отримання зображення підвищеної просторової розрізненності шляхом об'єднання низькочастотних та високочастотних компонент.

У випадку калібрування сенсора на борту шумове зображення можливо отримати як зображення, що формується сенсором без подачі оптичного сигналу. В разі відсутності апаратно сформованого шумового зображення або роботи із штучно сформованим або нелінійно перетвореним зображенням, як, наприклад, у випадку розподілу теплових полів, шумове зображення також необхідно отримувати шляхом розрахунку. Найчастіше, для цього застосовується віднімання одного з вхідних зображень від іншого. При цьому детерміновані складові зображення знищуються, а шуми підсумовуються за законом складання дисперсій. Тому після віднімання вхідних зображень має здійснюватися злагодження, наприклад, за квадратним коренем, при цьому похибки калібрування все одно залишаються. Виходячи з цього, найбільш доцільним шляхом оцінювання автоковаріаційної функції шумового зображення є сканування вікном із пошуком мінімуму модуля автоковаріаційної матриці.

Алгоритм відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності із двох зображень низької розрізненності реалізовано як автономне програмне забезпечення.

Перевагою даного способу підвищення просторової розрізненності є наступні: апаратна незалежність, виражена у відсутності необхідності адаптувати знімальну систему до застосування даного методу та можливість застосування даних довгохвильового інфрачервоного випромінювання, отриманих будь-якою кадровою знімальною системою. Також особливістю даного способу є ітеративна реконструкція зображення, яка дозволяє усувати нев'язки відновлення зображення підвищеної розрізненності. На даний спосіб не накладається умова фіксованого субпіксельного зміщення між зображеннями: зміщення можуть бути довільним: методика включає в себе окремий алгоритм розрахунку значення зміщення по осях (алгоритм 3.4). Також описаний спосіб дозволяє працювати не лише безпосередньо з даними

космічного знімання, а і з синтезованими продуктами, результатами обчислювальних операцій над растровими даними, наприклад, зображення розподілів коефіцієнта теплового випромінювання, отриманими на основі обробки даних знімання в інших діапазонах, в тому числі видимому та ближньому інфрачервоному.

Системним обмеженням цього алгоритму є вимога радіометричної однаковості всіх вхідних зображень. Ця вимога автоматично задовольняється в разі одночасного, чи майже одночасного одержання вхідних зображень, але в разі значного інтервалу часу між їх реєстрацією з підвищенням розрізненності можуть виникнути серйозні проблеми. Тому для супутникової системи Landsat, повторний період знімання якої складає одиниці – десятки діб, застосування цього алгоритму можливо тільки для інваріантних в часі теплофізичних властивостей земної поверхні, перш за все – до коефіцієнта теплового випромінювання земних покриттів. Підвищення же розрізненності швидкозмінного температурного поля за алгоритмом 3.5 неможливо.

Для розрахунку температурного поля підвищеної просторової розрізненності отримане при виконанні алгоритму 3.5 зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання застосовується в алгоритмі 3.2 як спільне для кожного з пари різночасових зображень спектральної щільності енергетичної яскравості довгохвильового інфрачервоного діапазону. При цьому ступень підвищення розрізненності буде нижчою за таку безпосередньо в розподілі коефіцієнта теплового випромінювання.

Оцінка підвищення просторової розрізненності відновлених зображень відносно вхідних зображень низької розрізненності виконується шляхом аналізу їх функцій передачі модуляції (ФПМ) за алгоритмом 3.6.

Алгоритм 3.6. Алгоритм оцінки підвищення просторової розрізненності зображень.

Крок 1. Завантаження вхідного зображення низької просторової розрізненності.

Крок 2. Розрахунок імовірнісного просторового перетворення.

Крок 3. Відбір знайдених на зображенні пограничних кривих за порогом імовірності.

Крок 4. Генералізація відібраних пограничних кривих.

Крок 5. Оцінка експериментальної ФПМ зображення та розрахунок теоретичної ФПМ на основі відомих параметрів знімальної системи.

Крок 6. Повторення кроків 1-5 для іншого вхідного зображення, яке було використане для підвищення просторової розрізненності.

Крок 7. Повторення кроків 1-5 для результуючого зображення підвищеної розрізненності.

Крок 8. Порівняння значень просторових частот при одному значенні ФПМ для вхідних зображень, та зображення підвищеної розрізненності.

Відношення значення просторової частоти зображення підвищеної розрізненності до значення середньої просторової частоти вхідних зображень низької розрізненності приймається за показник підвищення просторової розрізненності.

Автоматичне визначення ФПМ цифрових зображень реалізоване спеціалізованим автономним програмним забезпеченням [2].

3.3 Розробка методики отримання зображень теплового поля на основі різночасових зображень коефіцієнта теплового випромінювання підвищеної розрізненності

Представлені вище алгоритми в сукупності дозволяють отримати зображення розподілу фізичної температури земної поверхні підвищеної розрізненності із застосуванням двох вхідних зображень спектральної щільності енергетичної яскравості випромінювання довгохвильового діапазону інфрачервоного спектру, які одержуються за даними дистанційного зондування. Також в ході виконання алгоритмів забезпечується підвищення просторової розрізненності результуючого зображення. Обробка зображень виконується виключно на програмному рівні без застосування будь яких апаратних методів.

Необхідна послідовність операцій обробки даних дистанційного зондування оформлена у вигляді представленої на рис. 3.1 схеми методики.

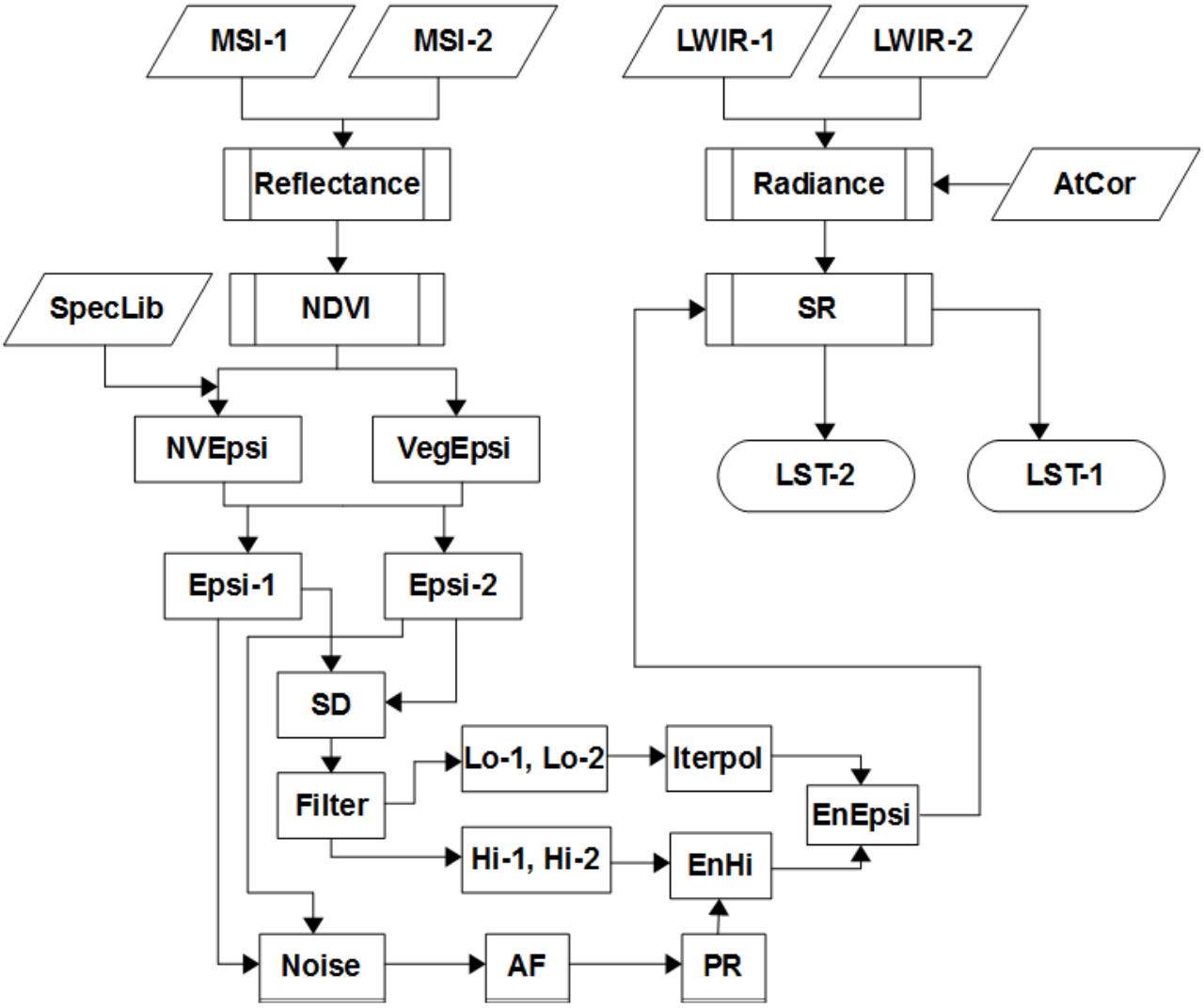


Рис. 3.1. Схема обробки даних космічного знімання для отримання зображення теплового поля підвищеної просторової розрізненності

Обробка даних дистанційного зондування виконується у два потоки: обробка різночасових даних багатоспектрального знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах (MSI-1, MSI-2), що перераховуються на значення спектрального відбиття земної поверхні та обробка зображення довгохвильової області інфрачервоного діапазону (LWIR-1, LWIR-2), які відкалібровано у значеннях спектральної щільності енергетичної яскравості на сенсорі.

Результатом обробки даних багатоспектрального знімання є зображення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання (Epsi-1, Epsi-2), який формується на основі його залежності від вегетаційного індексу *NDVI* відокремлено для поверхонь, вкритих рослинністю (VegEpsi) та для всіх інших типів покриттів (NVEpsi) з врахуванням даних спектральної бібліотеки типових покриттів сцени (SpecLib) за алгоритмом 3.1.

Підвищення просторової розрізненності виконується на основі пари зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання. Для цього за алгоритмом 3.4 визначається значення субпіксельного зміщення (SD), формується шумове зображення (Noise), переведення вхідних зображень та зображення шуму у частотну область дискретним перетворенням Фур'є, розкладання вхідних зображень на частотні низько- (Lo-1, Lo-2) та високочастотні компоненти (Hi-1, Hi-2), розрахунок автоковаріаційних функцій вхідних зображень та зображення шуму (AF), визначення на їх основі параметрів відновлення високочастотної компонент (PR) відновлення високочастотної компоненти підвищеної розрізненності (EnHi), відновлення низькочастотних компонент інтерполяцією (Interpol) та об'єднуються низько- та високочастотні компоненти (EnEpsi).

Для розрахунку температурного поля підвищеної розрізненності за даними дистанційного зондування у довгохвильовій області інфрачервоного спектру згідно алгоритму 3.2 виконується калібрування даних (Radiance), усунення впливу атмосфери на випромінювання шляхом застосування калькулятора атмосферних параметрів (AtCor) та перерахунок скоригованої спектральної щільності енергетичної яскравості поверхні (SR) за оберненим законом Планка у фізичну температуру (LST-1, LST-2) із застосуванням зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання підвищеної просторової розрізненності.

При необхідності за алгоритмом 3.6 можливо виконати оцінку досягнутого підвищення просторової розрізненності шляхом порівняння функцій передачі модуляції вхідних зображень та зображень підвищеної

просторової розрізненності.

3.4 Розробка методики підвищення просторової розрізненності різночасових зображень теплового поля

Підвищення просторової розрізненності зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання на основі його різночасових зображень можливе за рахунок його умовної інваріантності на протязі короткого проміжку часу, оскільки коефіцієнти теплового випромінювання характеризують відносно постійні теплофізичні властивості земного покриття, які майже не залежать від температури на момент знімання. Але підвищення просторової розрізненності зображень розподілу температур ускладнюється її високою динамічністю, що робить відновлення в такий же спосіб зображень температурного поля підвищеної розрізненності на основі різночасових зображень цілком некоректним.

Можливість підвищення просторової розрізненності пари субпіксельно зміщених зображень температур стає можливим завдяки розкладанню їх на частотні компоненти дискретним перетворенням Фур'є на основі припущення, що низькочастотна компонента відповідає за розподіл температури, середньочастотна – коефіцієнта теплового випромінювання, а високочастотна – відповідає дрібним деталям місцевості, які приймаються спільними для обох зображень. За рахунок підвищення саме високочастотної компоненти і виконується підвищення просторової розрізненності обох зображень теплового поля. Схему послідовності операцій показано на рис. 3.2.

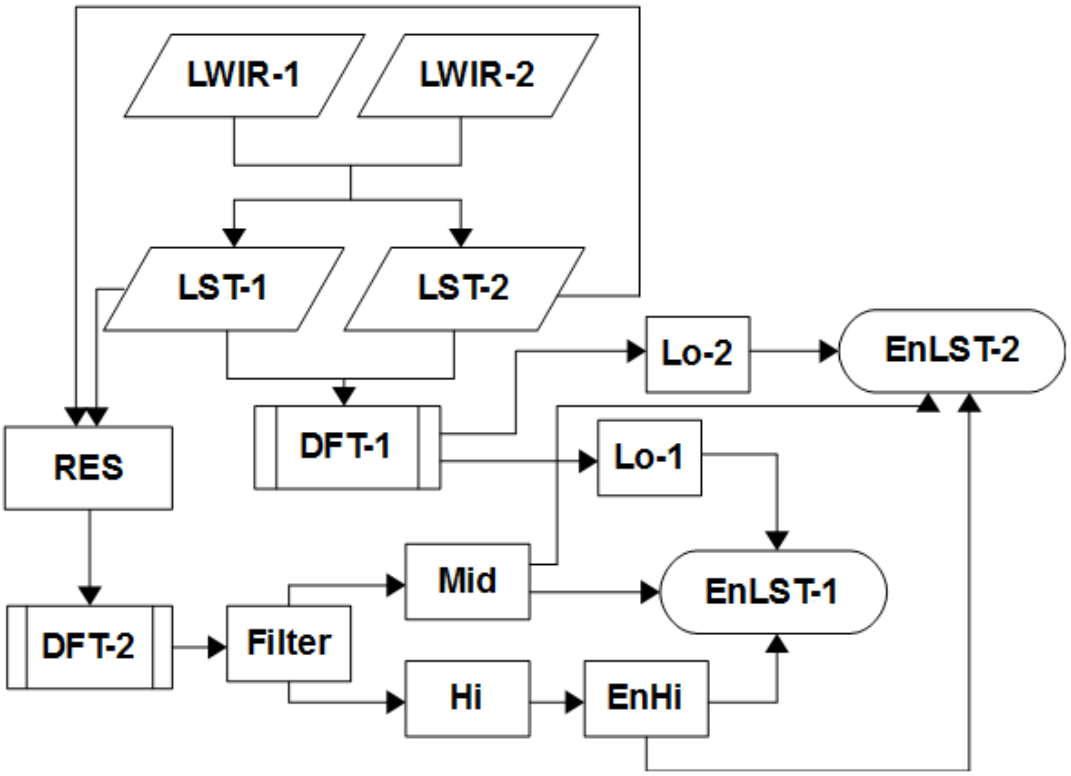


Рис. 3.2. Схема обробки даних космічного знімання для підвищення просторової розрізненності різночасових зображень температурних полів

Вхідні інфрачервоні зображення (LWIR-1, LWIR-2), перераховуються на температурні поля земної поверхні з урахуванням параметрів атмосфери та коефіцієнтів теплового випромінювання за алгоритмом 3.2 (LST-1, LST-2). Для них розраховуються субпіксельні зміщення за алгоритмом 3.4 та виконується ДПФ для отримання їх Фур'є-образів (DFT-1) з яких за допомогою фільтра низьких частот виділяються низькочастотні компоненти (Lo-1, Lo-2). Далі зображення температурного поля черезрядково поєднуються в пересемпльоване зображення (RES), яке також переводиться у частотну область (DFT-2). Цей спектр за допомогою смугового фільтра (Filter) розділяється на середньочастотну (Mid) та високочастотну компоненти (Hi). Просторова розрізненність високочастотних компонент підвищується за алгоритмом 3.5. Одержане спільне відновлення високочастотних компонент підвищеної розрізненності (EnHi), та середньочастотні компоненти додаються до окремих для кожного зображення низкочастотних компонент. Обернене перетворення

Фур'є кожного із отриманих сумарних зображень дозволяє одержати цільові температурні поля підвищеної розрізненності (EnLST-1, EnLST-2), що відповідають вхідним інфрачервоним зображенням.

Висновки до третього розділу

1. Розроблено алгоритм розрахунку розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання на основі його залежності від вегетаційного індексу *NDVI* як для поверхонь, вкритих рослинністю, так і для всіх інших типів поверхонь за допомогою обробки даних багатоспектрального знімання у червоній та ближній інфрачервоній області електромагнітного спектру.

2. Розроблено алгоритм підвищення просторової розрізненності пари субпіксельно зміщених зображень, розрахованих на основі обробки (квазі)інваріантних в часі даних дистанційного зондування та обґрунтована та обґрунтовано вибір конкретного способу підвищення просторової розрізненності.

3. Розроблено методику розрахунку теплового поля підвищеної просторової розрізненності на основі багатоспектральних даних дистанційного зондування у видимому, ближньому інфрачервоному та довгохвильовому інфрачервоному діапазонах на основі розроблених алгоритмів.

4. Розроблено методику підвищення просторової розрізненності різночасових зображень температурного поля в просторово-частотній області на основі розроблених алгоритмів.

Список використаних джерел

1. Zhang Z. M., Machin G. Overview of radiation thermometry. *Radiometric Temperature Measurements Fundamentals*. Amsterdam: Academic Press, 2010. P. 17-44.
2. Станкевич С. А., Шолонік О. В. Інструментарій оцінювання еквівалентної просторової розрізненності багато- та гіперспектральних цифрових аерокосмічних знімків. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, 2007. № 3(10). С.165-171.

РОЗДІЛ 4

ПЕРЕВІРКА МЕТОДУ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ПІДВИЩЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕННОСТІ ТА ІНФОРМАТИВНОСТІ ІНФРАЧЕРВОНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

В ході перевірки працездатності методу оброблено 12 пар різночасових зображень, отриманих сенсорами OLI та TIRS супутникової системи Landsat-8. Кількісна оцінка підвищення просторової розрізненності виконувалась шляхом порівняння функцій передачі модуляції (ФПМ) зображень до та після підвищення розрізненності. Було проведено такі порівняльні оцінки:

– підвищення просторової розрізненності зображення розподілу фізичної температури земної поверхні, отриманого за допомогою алгоритму 3.2 із застосуванням зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів, отриманого за допомогою алгоритму 3.1 порівняно із зображенням радіаційної температури;

– підвищення просторової розрізненності зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, отриманого на основі даної пари зображень за допомогою алгоритму 3.5 порівняно із зображенням розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання вхідних зображень;

– підвищення просторової розрізненності зображень теплового поля, в розрахунок якого включено зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання відновлених за допомогою алгоритму 3.5, порівняно із зображеннями теплового поля, розрахованих із застосуванням зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання низької просторової розрізненності;

– підвищення просторової розрізненності пар зображень теплового поля, відновленого за допомогою методу, описаного в п. 3.4.

Також паралельно із виконанням оцінок підвищення просторової розрізненності виконано розрахунок підвищення інформативності та приріст

показника *MRTD*, окрім випадку оцінки підвищення просторової розрізненності зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання.

4.1 Характеристика зображень

Оброблені зображення отримані за період 2014-2016 роки впродовж від початку вегетаційного періоду (березень) до періоду зниження вегетаційної активності (вересень). Обраний ряд зображень включає в себе різноманітні ландшафти: урбанізовані, індустріальні, сільськогосподарські, пустельні а також прибережні території із акваторіями, як річковими так і морськими, в тому числі акваторії із штучними насипними утвореннями. Оброблені зображення, які включають території наступних країн: Україна, Польща, Швеція, Данія, Об'єднані Арабські Емірати, Італія. Наведено характеристику пар зображень, для яких виконувалась розрахунок теплового поля, коефіцієнтів теплового випромінювання та підвищення просторової розрізненності (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1.

Характеристика оброблених зображень

Основний географічний об'єкт, Назва зображень	Дати знімання	Характеристика ландшафтів, зображених на знімках
м. Дубай, ОАЕ LC81600432016208 LC81600432016224	26 липня та 11 серпня 2016 р.	Значна площа однорідних поверхонь (акваторія Перської затоки та пустеля), велика кількість штучних насипних утворень, складна берегова лінія, міська забудова з високою неоднорідністю КТВ
м. Харків, Україна LC81770252014209	28 липня та 13 серпня	Міська забудова високої густини з високою неоднорідністю КТВ,

LC81770252014225	2014 р.	однорідні лісові масиви, сільськогосподарські території, переважно вкриті рослинністю
м. Харків, Україна LC81770252015084 LC81770252015100	25 березня та 10 квітня 2015 р.	Міська забудова високої густини з високою неоднорідністю КТВ, однорідні лісові масиви без листового покриву, сільськогосподарські території без рослинного покриву
м. Київ, Україна LC81810252016195 LC81810252016211	13 липня та 29 липня 2016 р.	Міська забудова високої густини з високою неоднорідністю КТВ, великі, однорідні лісові масиви, сільськогосподарські території, переважно вкриті рослинністю
м. Київ, Україна LC81820252015199 LC81820252015215	18 липня та 3 серпня 2015 р.	Міська забудова високої густини з високою неоднорідністю КТВ, великі, однорідні лісові масиви, сільськогосподарські території, переважно без рослинності
м. Запоріжжя, Україна LC81780272015219 LC81780272015235	7 серпня та 23 серпня 2015 р.	Урбанізовані та індустріальні ландшафти з високою неоднорідністю КТВ, акваторії водосховищ, в тому числі із густим рослинним покривом, сільськогосподарські території, переважно вкриті рослинністю
м. Кривий Ріг, Україна LC81790272016261 LC81790272016277	17 вересня та 3 жовтня 2016 р.	Урбанізовані ландшафти із високою концентрацією техногенних ландшафтів, сільськогосподарські території без рослинності, акваторія водосховища

м. Копенгаген, Данія, м. Мальме, Швеція LC81940212015235 LC81940212015251	23 серпня та 8 вересня 2015 р.	Акваторія Балтійського моря із проявами вегетаційної активності та складною береговою лінією, урбанізовані ландшафти із високою неоднорідністю КТВ, сільськогосподарські території переважно без рослинного покриву
м. Львів, Україна LC81850252015204 LC81850252015220	23 липня та 8 серпня 2015 р.	Міська забудова високої густини з високою неоднорідністю КТВ, великі, однорідні лісові масиви, сільськогосподарські території, вкриті рослинністю
м. Рящів, Польща LC81860252015227 LC81860252015243	15 серпня та 31 серпня 2015 р.	Малоповерхова міська забудова низької густини із високою неоднорідністю КТВ, великі, однорідні лісові масиви, неоднорідні сільськогосподарські території
м. Одеса, Україна LC81800282016268 LC81800282016284	25 вересня та 11 жовтня 2015 р.	Багатоповерхова та малоповерхова міська забудова високої густини із високою неоднорідністю КТВ, морська акваторія та сільськогосподарські території без рослинності
м. Рим, Італія LC81910312016185 LC81910312016201	3 липня та 19 липня 2016 р.	Багатоповерхова та малоповерхова міська забудова високої густини, сільськогосподарські території переважно без рослинності

Пари зображень, описані в таблиці 4.1, представлені у додатку Е.

4.2 Оцінювання функції передачі модуляції шляхом аналізу цифрових аерокосмічних зображень

Просторова розрізненність іконічних даних, які надаються знімальною системою, повністю визначається функцією передачі модуляції. Функція передачі модуляції знімальної системи – безрозмірна величина, що обчислюється як дійсний модуль комплексної оптичної передавальної функції (ОПФ) системи – відношення комплексного просторово-частотного спектру сигналу на виході системи до комплексного просторово-частотного спектру на її вході [1]. Фізично ФПМ являє собою коефіцієнт зміни амплітуди просторової синусоїди на різних просторових частотах при передачі її знімальною системою.

В умовах невизначеності властивостей знімальної системи ФПМ растрової системи дистанційного зондування може бути визначена експериментально по зображенню, отриманою даною системою як модуль комплексного перетворення Фур'є (ДПФ) від дискретної похідної нормованої перехідної характеристики нормованої перехідної характеристики (пограничної кривої) – зображення на знімку стрибка радіометричних характеристик оптичного сигналу, яке для панхроматичного зображення представлене стрибком інтенсивності сигналу [2].

Для побудови кривої ФПМ знімальної системи необхідно задати параметри оптично системи та коефіцієнт пропускання атмосфери для спектрального діапазону знімання даної системи [3]. Характеристики сенсора TIRS наведено в таблиці 4.2 [4].

Таблиця 4.2.

Параметри сенсора TIRS (супутникова система Landsat-8)

Характеристика	Значення
Коефіцієнт спектрального пропускання атмосфери	0,93
Висота знімання, км	705
Орбітальна швидкість, км/с	7,4

Фокусна відстань оптики, м	0,178
Час експонування, мс	3,49
Робоча довжина хвилі, мкм	10,8
Відносний отвір оптики, %	61
Половина кута огляду, град.	7,473
Коефіцієнт аберації оптики	0,001
Розмір фотоприймального елементу, мкм	25

У випадку моделювання ФПМ знімальної системи по зображенню із підвищеною просторовою дискретизацією у порівнянні із вхідними зображеннями, отриманими без субпіксельної обробки (наприклад, у випадку відновлення зображення підвищеної просторової розрізненності за алгоритмом 3.5, просторова дискретизація зображення підвищується вдвічі) показник розміру фотоприймального елементу необхідно у стільки ж разів зменшити у порівнянні із вхідними зображеннями низької розрізненності. Порівняння значень просторової частоти на одному рівні значення функції передачі модуляції дозволяє оцінити підвищення просторової розрізненності одного зображення відносно іншого [5]. Підвищення просторової розрізненності визначається як відношення показників просторової частоти для одного зображення до просторової частоти другого зображення при однаковому значенні ФПМ.

4.2.1 Програмне забезпечення для автоматичної оцінки ФПМ

Для оцінки ФПМ на основі вхідного зображення реалізовано відповідне програмне забезпечення. Алгоритм розрахунку ФПМ для кожного зображення наступний [6]:

1) завантаження вхідного зображення та виділення області інтересу;

2) імовірнісне перетворення зображення;

3) виділення пограничних кривих зображення та їх генералізація;

4) визначення експериментальної ФПМ як дискретного перетворення Фур’є від дискретної похідної генералізованої пограничної кривої;

5) розрахунок теоретичної функції передачі модуляції знімальної системи на основі її параметрів.

На рис. 4.1 показано інтерфейс програмного забезпечення для розрахунку ФПМ на основі космічного зображення [7].

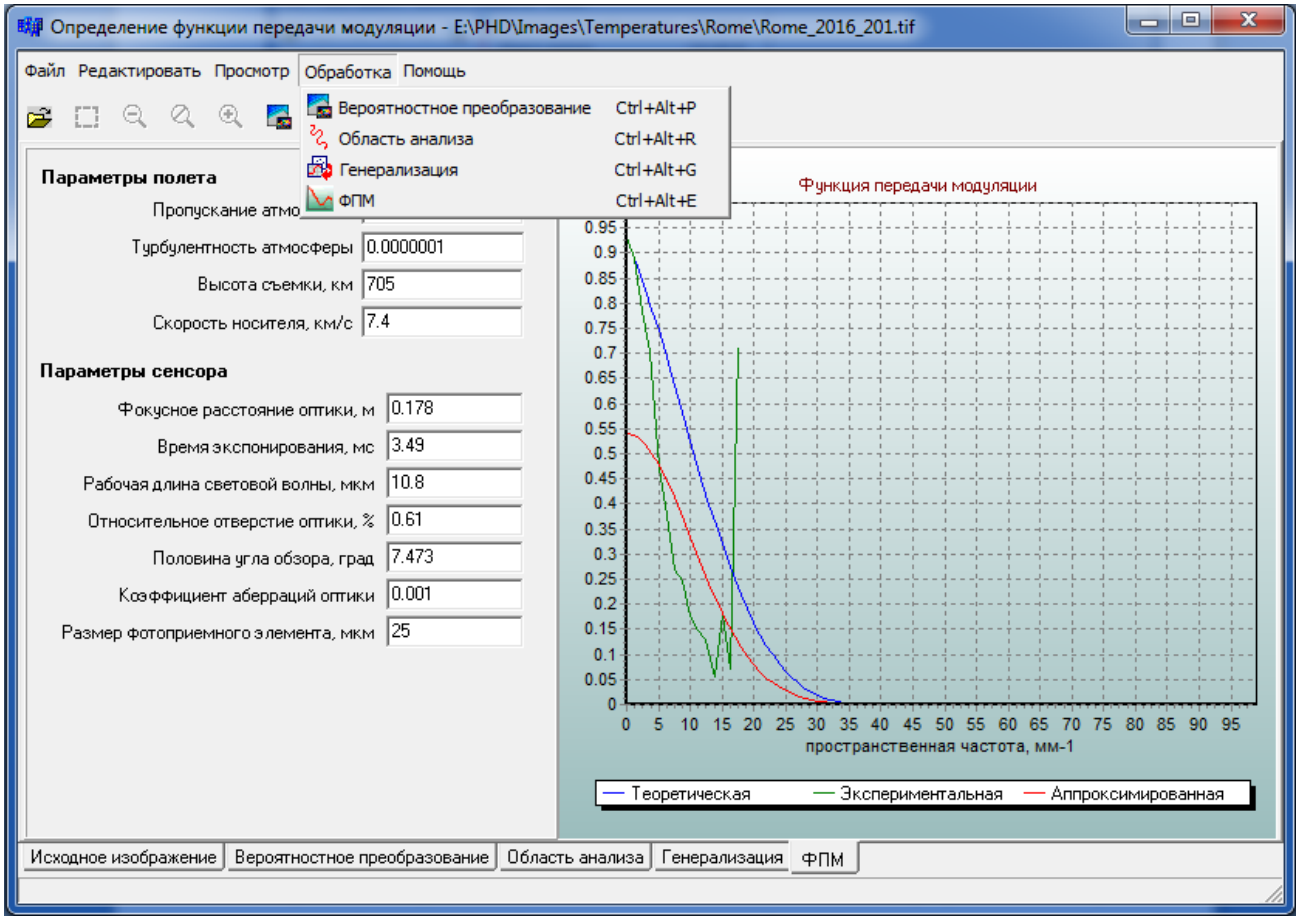


Рис. 4.1. Інтерфейс програмного забезпечення для розрахунку функції передачі модуляції на основі вхідного зображення земної поверхні

Після завантаження зображення можливий його перегляд, масштабування і графічне завдання області аналізу. Імовірнісне перетворення візуалізується інтенсивністю, пропорційною імовірності розділення б’єфів перехідної функції в кожній точці. Реалізовано графічне відтворення генералізованої перехідної функції, її дискретної похідної і нормованої ФПМ зображення. Вказування реального розміру використаного елемента дискретизації (одиничного детекторного елементу знімальної системи) дозволяє розрахувати реальне значення функції передачі модуляції та моделювати її у випадку

передискретизації зображення шляхом зміни цього параметру [8]. На всіх етапах розрахунків оператор може повернутися до попереднього кроку обробки для повторного здійснення обчислень в разі необхідності або завантаження нового зображення, що дозволяє неперервний розрахунок ФПМ для масиву зображень. Дане програмне забезпечення також дозволяє моделювати підвищення просторової дискретизації шляхом зміни розміру фотоприймального пристрою при обробці зображень підвищеної просторової розрізненності шляхом субпіксельної обробки.

4.2.2 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень теплового поля за рахунок залучення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання

Застосування зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів, отримане на основі даних сенсора OLI із просторовою розрізненністю 30 м дозволяє підкреслити значну кількість деталей місцевості та значно скоригувати зображення температурного поля, перераховане із значень спектральної щільності енергетичної яскравості довгохвильового інфрачервоного випромінювання, отриманих із даних сенсора TIRS із просторовою розрізненністю 100 м. Дані сенсора OLI мають просторову розрізненність 30 м, тобто в 3,3 рази вищу ніж зображення сенсора TIRS, однак дані TIRS інтерпольовані до 30 м, тому значення розміру фотоприймального елементу при розрахунку ФПМ в обох випадках має бути однаковим і складає 7,5 мкм.

Отже, для оцінки підвищення просторової розрізненності теплового поля проведено порівняння ФПМ розподілу радіаційної температури земної поверхні, розраховане лише із застосуванням даних сенсора TIRS, та ФПМ теплового поля, розрахованого за алгоритмом 3.2.

Визначення показників інформативності та *MRTD* виконувались формулами 2.9 та 2.14 відповідно.

Зведені дані з визначених значень просторової частоти (мм$^{-1}$), приросту інформативності та показника *MRTD* на рівні ФПМ=0,3 для порівнюваних зображень представлено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3.

Порівняння просторових частот ФПМ, отриманих на основі зображень розподілів радіаційної температури TIRS та фізичної температури TIRS+OLI та обчислення приросту інформативності та показника MRTD

Назва зображення	Просторова частота на рівні ФПМ=0,3 для зображення радіаційної температури TIRS	Просторова частота на рівні ФПМ=0,3 для зображення теплового поля TIRS+OLI	Відносний приріст просторової розрізненності, %	Відносний приріст інформативності, %	Відносний приріст показника *MRTD*, %
LC81600432016208	17	23,5	38,2	78,3	19,9
LC81600432016224	17	22,5	32,4	73,5	3,5
LC81770252014209	17	24	41,2	94,7	3,9
LC81770252014225	20	27	35	84,8	-6
LC81770252015084	20	24	20	25,9	63,3
LC81770252015100	21,5	23,5	9,3	3,4	67,1
LC81810252016195	21	26,5	26,2	23,2	48,4
LC81810252016211	20,5	28	36,6	52,0	95
LC81820252015199	21	26	23,8	11,3	54,1
LC81820252015215	21	26,5	26,2	11,9	78,5
LC81780272015219	19,5	24	23,1	56,9	-14,1
LC81780272015235	19	24	26,3	57,7	1,8
LC81790272016261	18,5	27	46	112,2	-2,6
LC81790272016277	19	27	42,1	100,6	-1,6
LC81940212015235	24	31	29,2	27,8	104
LC81940212015251	25,5	40,5	58,8	77,6	144,8
LC81850252015204	22	31	41	29,1	90,5
LC81850252015220	21	26	23,8	11,6	145,7
LC81860252015227	25	33	32	9,1	73,9
LC81860252015243	21	33	57,2	85,9	84,1
LC81800282016268	22,5	30	33,3	20,6	168,2
LC81800282016284	24	37,5	56,3	117,8	28,3

LC81910312016185	21	27,5	31	70,9	0,9
LC81910312016201	21	24	14,3	18,1	108,5

Відповідні табл. 4.3. графіки ФПМ наведено у додатку Є.

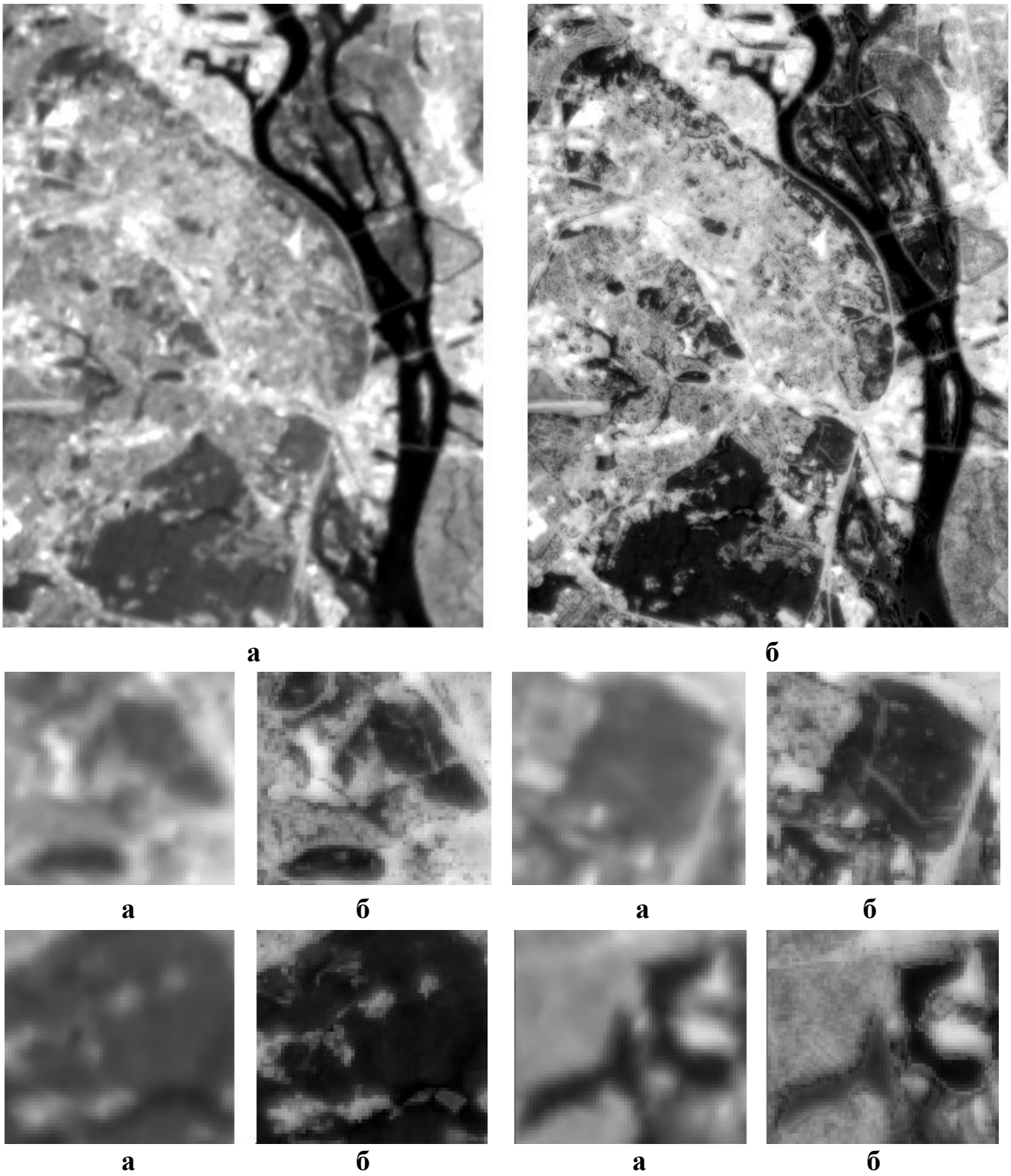


Рис. 4.2. Зображення частини Києва, та окремі ділянки зображення, отримані за даними супутника Landsat-8 (13 липня 2016 р.); а – вхідне зображення у діапазоні 10,3-11,3 мкм; б – зображення теплового поля

На рис. 4.2 для візуального порівняння просторової розрізненності представлені зображення розподілу радіаційної температури земної поверхні, розрахованої на основі 10 каналу даних супутника Landsat-8 (довжина хвилі 10,3-11,3 мкм) та зображення теплового поля із застосуванням розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, отриманого за алгоритмом 3.1.

Середнє значення відносного приросту просторової розрізненності зображення теплового поля, отриманого із використанням розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання, розрахованого за даними багатоспектрального знімання сенсором OLI відносно просторової розрізненності даних сенсору TIRS складає 33,5 %. Підвищення просторової розрізненності досягається тим, що окрім більш високої просторової розрізненності та внесення додаткових деталей зображення розподілу коефіцієнтів теплового також підсилює контрастність результуючого зображення.

Висока дисперсія розрахункових значень приросту інформативності та *MRTD* викликана різними температурними контрастами між опорними районами інтересу, фізичною невідповідністю значень радіаційної та фізичної температури та різницею температури, які вносяться розподілом коефіцієнтів теплового випромінювання. У чотирьох випадках спостерігається від'ємний приріст *MRTD*. Загалом середній приріст інформативності склав 52,3%, а показника *MRTD* – 56,7%.

4.2.3 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання із застосуванням субпіксельної обробки

Відновлення зображень підвищеної розрізненності за алгоритмом 3.5 застосовувалась для пар субпіксельно зміщених різночасових зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання із попередньою оцінкою субпіксельного зміщення за алгоритмом 3.4 (оцінювалось зміщення більш

пізнього зображення відносно раннього). Кількісні значення субпіксельного зміщення в частинах цілого піксела зображення низької просторової розрізненності для пар зображень представлено у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4.

Значення субпіксельних зміщень різночасових зображень

Назва пар зображень	Горизонтальне зміщення	Вертикальне зміщення
LC81600432016208 LC81600432016224	-0,05	0,03
LC81770252014209 LC81770252014225	0,06	0,09
LC81770252015084 LC81770252015100	-0,07	-0,02
LC81810252016195 LC81810252016211	0,04	0,05
LC81820252015199 LC81820252015215	-0,04	0,08
LC81780272015219 LC81780272015235	0,11	0,02
LC81790272016261 LC81790272016277	0,1	0,05
LC81940212015235 LC81940212015251	-0,08	0,15
LC81850252015204 LC81850252015220	-0,05	0,05
LC81860252015227 LC81860252015243	-0,03	-0,04
LC81800282016268 LC81800282016284	0,06	0,02
LC81910312016185 LC81910312016201	0,08	-0,04

Порівнювалися значення просторових частот вхідних зображень розподілів коефіцієнта теплового випромінювання, із зображенням підвищеної просторової розрізненності, отриманим за алгоритмом 3.5. Результати

порівняння наведено в таблиці 4.5. Оцінки одержано при значенні розміру фотоприймального елемента 25 мкм для зображення низько розрізненності та 12,5 для зображення підвищеної розрізненності.

Також виконано розрахунок підвищення інформативності за адаптованим до зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання рівнянням 2.9 а показник мінімальної розрізнювальної температури замінено на показник мінімального розрізнювального значення коефіцієнта теплового випромінювання, який розраховується по аналогії із температурою за рівнянням 2.14.

Таблиця 4.5.

Порівняння просторових частот ФПМ отриманих на основі зображень розподілів коефіцієнтів теплового випромінювання низької та підвищеної розрізненності та оцінка підвищення інформативності

Назва зображення	Просторова частота для вхідного зображення розподілу КТВ, мм$^{-1}$	Просторова частота для зображення підвищеної просторової розрізненності та значення ФПМ, мм$^{-1}$	Приріст просторової розрізненності, %	Відносний приріст інформативності, %	Відносний приріст мінімального розрізнювального КТВ, %
LC81600432016208	15	21 (0,4)	35,5	90,9	36,26
LC81600432016224	16				
LC81770252014209	10,5	18,5 (0,4)	76,2	211,28	-1,41
LC81770252014225	10,5				
LC81770252015084	9,5	13,5 (0,35)	46	120,8	22,8
LC81770252015100	9				
LC81810252016195	10	13 (0,45)	30	89,1	110,2
LC81810252016211	10				
LC81820252015199	9,5	14 (0,45)	47,4	101,6	-52,3
LC81820252015215	9,5				
LC81780272015219	10,5	14,5 (0,5)	34,9	94	53
LC81780272015235	11				
LC81790272016261	12	14,5 (0,4)	26	65,9	38,3
LC81790272016277	11				

LC81940212015235	11	15 (0,4)	33	82,6	10,8
LC81940212015251	11,5				
LC81850252015204	10	13 (0,4)	33	126,6	85,6
LC81850252015220	9,5				
LC81860252015227	11,5	16 (0,4)	36,2	82	-12,7
LC81860252015243	12				
LC81800282016268	10	14 (0,4)	30,2	78,2	43,6
LC81800282016284	11,5				
LC81910312016185	9,5	13,5 (0,4)	38,5	97,2	15,8
LC81910312016201	10				

Номінальний приріст лінійної просторової розрізненності складає 100 % (кожен піксел вхідного зображення розбивається на 4 субпіксели). Оцінка фактичного приросту просторової розрізненності виконано в діапазоні значень ФПМ, для якої приріст є найбільшим (діапазон від 0,35 до 0,5). Середнє значення приросту просторової розрізненності, отримане при обробці пар зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання за допомогою субпіксельної реєстрації складає 38,9 %. При цьому найбільше значення приросту складає 76,2 %. Такий показник підвищення досягається за рахунок мінімальної зміни розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання на досліджуваній території. Хоча показник коефіцієнта теплового випромінювання приймається за інваріантну величину, але з часом його змін уникнути неможливо, що негативно впливає на процес відновлення зображення та оцінку підвищення просторової розрізненності, що пояснює її високу дисперсію. Тим же пояснюється і висока дисперсія значень приростів інформативності та мінімального розрізнювального значення коефіцієнта теплового випромінювання. В середньому приріст інформативності склав 103,4 % а значення мінімального розрізнювального значення коефіцієнта теплового випромінювання – 29,2 %.

На рис. 4.3 представлена візуальна інтерпретація підвищення просторової розрізненності у вигляді порівняння ділянок поверхні із вхідних та результуючих зображень.

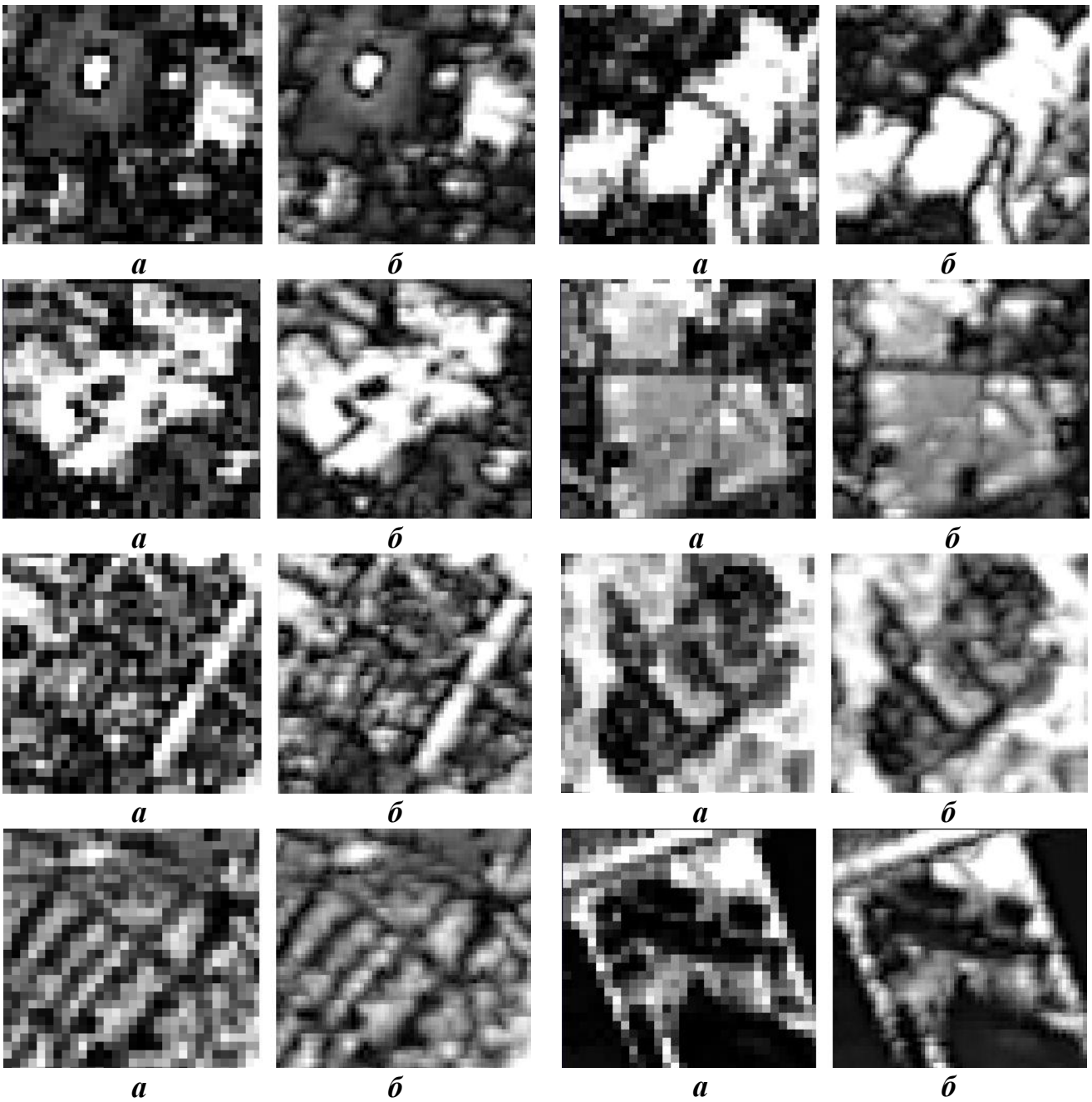


Рис. 4.3. Ділянки зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання: *а* – вхідного зображення; *б* – зображення підвищеної просторової розрізненності (м. Харків, 28 липня 2014 р.)

Функції передачі модуляції вхідних зображень та зображень підвищеної розрізненності переставлено у додатку Ж.

4.2.4 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності зображень теплового поля із застосуванням зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання підвищеної розрізненності

Для застосування зображення розподілу коефіцієнта теплового випромінювання у розрахунку теплового поля, необхідно передискретизувати зображення спектральної щільності енергетичної яскравості до відповідної просторової розрізненності та виконати алгоритм 3.2 так само, як і у випадку із зображеннями низької просторової розрізненності. Результати оцінювання підвищення просторової розрізненності зображення теплового поля наведено у таблиці 4.6. Оцінки виконано при значенні розміру фотоприймального елемента 25 мкм для зображення низько розрізненності та 12,5 для зображення підвищеної розрізненності при ФПМ = 0,3.

Таблиця 4.6.

Порівняння просторових частот ФПМ отриманих на основі зображень теплового поля низької та підвищеної просторової розрізненності та оцінка підвищення інформативності

Назва зображення	Просторова частота зображення теплового поля низької просторової розрізненності, мм$^{-1}$	Просторова частота зображення теплового поля підвищеної просторової розрізненності та значення ФПМ, мм$^{-1}$	Приріст просторової розрізненності, %	Відносний приріст інформативності, %	Відносний приріст показника *MRTD*, %
LC81600432016208	7	13	85,7	233,5	-3,8
LC81600432016224	6,5	12	84,6	193,3	52
LC81770252014209	7	12,5	78,6	241,9	-26,6
LC81770252014225	7,5	13	73,3	230,8	-30,7
LC81770252015084	6,5	11	69,2	184,6	0,53
LC81770252015100	7	11,5	64,3	196,5	-8,5
LC81810252016195	6,5	12	84,6	253	-30,7

LC81810252016211	6	11,5	91,7	327,5	-17,7
LC81820252015199	7	12	71,4	178,3	-1,6
LC81820252015215	7	12	71,4	190,8	43
LC81780272015219	6	11,5	91,7	246,5	-0,55
LC81780272015235	6	11,5	91,7	225,3	38,2
LC81790272016261	7	12,5	78,6	199,3	27
LC81790272016277	7	12,5	78,6	220,3	-6,67
LC81940212015235	7,5	14,5	93,3	265	13,1
LC81940212015251	11,5	18	56,5	216	-50
LC81850252015204	9	13	44,4	106,5	33,5
LC81850252015220	7,5	12,5	66,7	144,4	32,5
LC81860252015227	7	13	85,7	230,5	-0,7
LC81860252015243	8	14	75	265,5	-25,7
LC81800282016268	7,5	13,5	80	200,5	32,2
LC81800282016284	9,5	14,5	52	129,1	-5,9
LC81910312016185	7	13	85,7	220	18,4
LC81910312016201	7	13	85,7	264,3	14,8

При оцінці підвищення просторової розрізненності зображень теплового поля виявлена відсутність прямої залежності між ним та приростом просторової розрізненності зображень розподілу коефіцієнта теплового випромінювання, отриманих за допомогою алгоритму 3.5. Основний вплив на підвищення просторової розрізненності здійснює збільшення контрастності зображення розподілу спектральної щільності енергетичної яскравості, яке використовується при розрахунку теплового поля, що має інтерпольовану до 30 м просторову розрізненність 100 м. Середнє підвищення просторової розрізненості зображень теплового поля складає 69 %.

Розрахункове підвищення інформативності склало в середньому 215,1 %, в той час як показник приросту *MRTD* для різних пар зображень коливався в діапазоні -50..52 та в середньому склав 4 %.

Приклади зображень теплового поля низької та підвищеної просторової розрізненності наведено на рис. 4.4. Усі оцінені функції передачі модуляції представлені у додатку З.

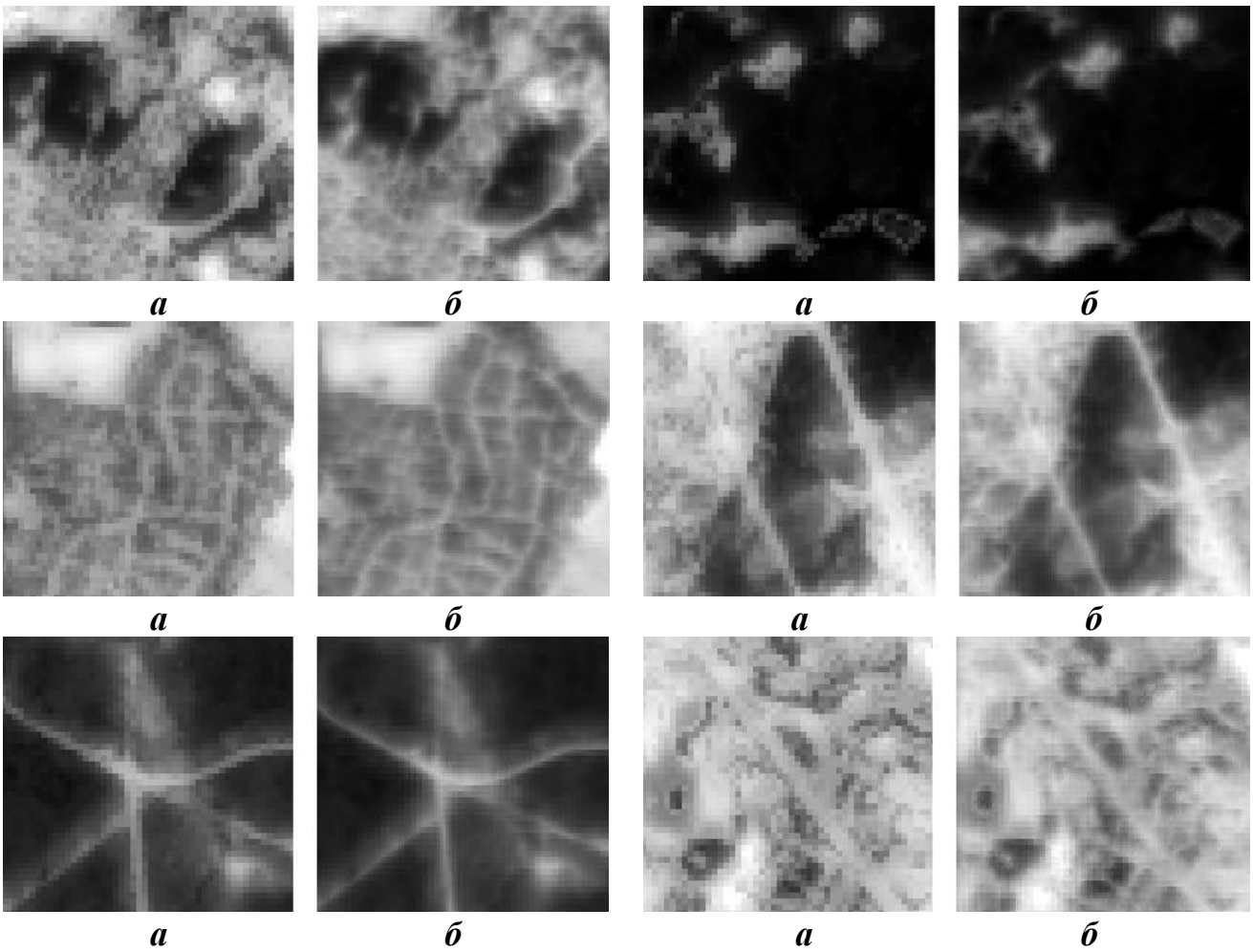


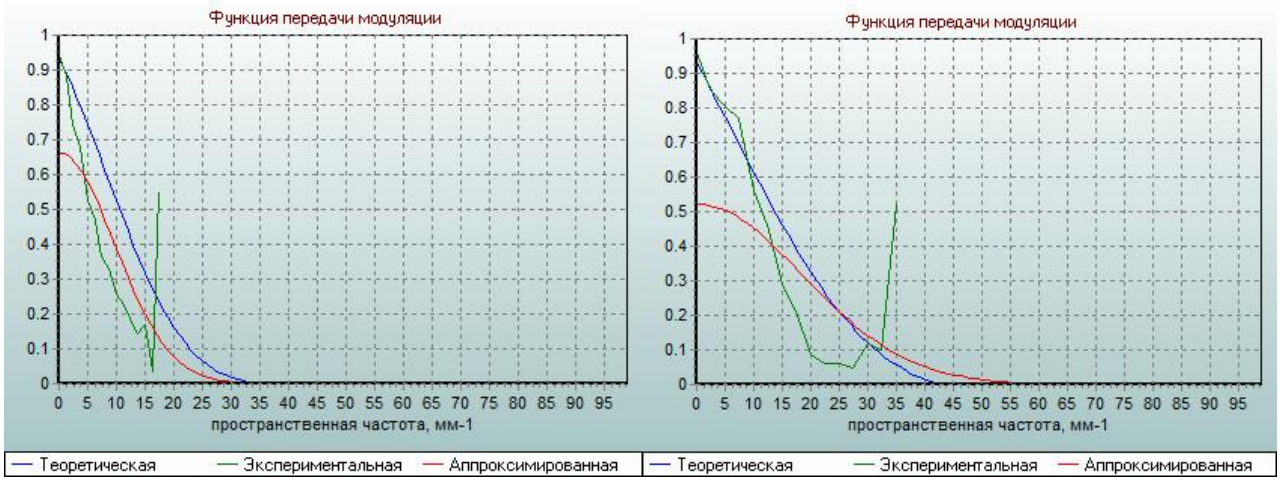
Рис. 4.4. Ділянки зображення теплового поля: *а* – низької просторової розрізненності; *б* – підвищеної просторової розрізненості (м. Київ, 29 липня 2016 р.)

4.2.5 Оцінка підвищення просторової розрізненності та інформативності різночасових зображень теплового поля при обробці окремих їх частотних компонент

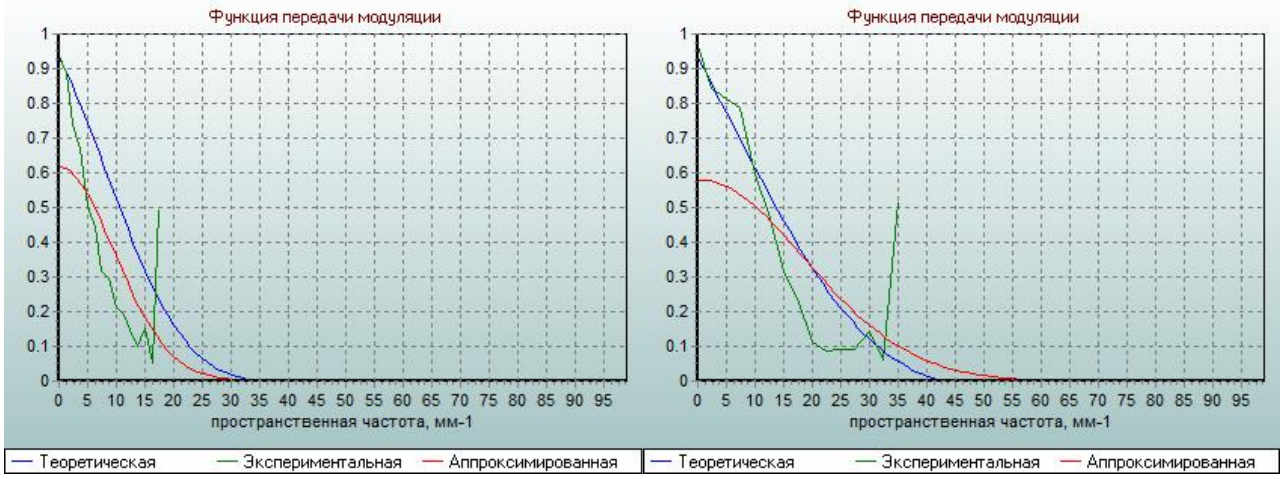
Вимога часової інваріантності заважає безпосередньому підвищенню просторової розрізненності температурних полів в той же самий спосіб, як і розподілів коефіцієнтів теплового випромінювання. Але можливе підвищення просторової розрізненності окремої частотної компоненти, отриманої із зображення, розрахованого за алгоритмом 3.2. Сама процедура підвищення просторової розрізненності описана у п. 3.4, і вона виконується лише для високочастотної компоненти, що вважається інваріантною для пари зображень,

оскільки її фізичний зміст полягає в описі дрібних деталей місцевості, які за часовий проміжок між отриманням зображень вважаються незмінними.

Оцінку підвищення просторової розрізненності проведено для однієї пари зображень (територія м. Києва, за 13 та 29 липня 2016 р.). Графіки ФПМ зображень низької та підвищеної просторової розрізненності показано на рис. 4.5.



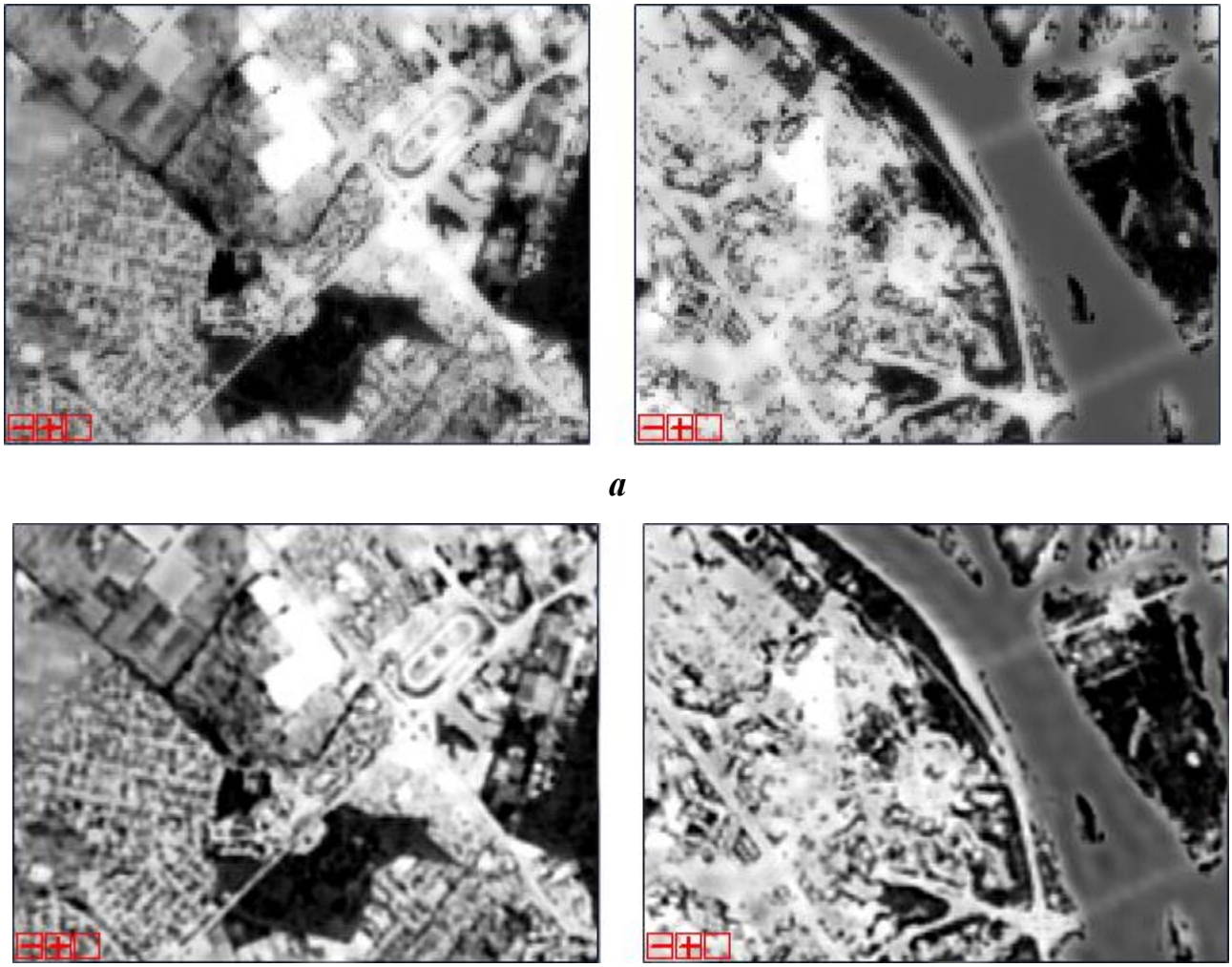
а ***б***



а ***б***

Рис. 4.5. ФПМ зображень теплового поля: *а* – низької просторової розрізненності; *б* – підвищеної просторової розрізненості шляхом субпіксельної обробки високочастотної компоненти (м. Київ, 13 та 29 липня 2016 р.)

Оцінка виконана на рівні ФПМ = 0,3. Для зображень низької просторової розрізненності просторова частота дорівнюють 9 та 8, а просторова частота на цьому ж рівні для зображень підвищеної просторової розрізненності дорівнюють 15 та 15,5 відповідно. Таким чином, середнє підвищення просторової розрізненності складає 76,5 %. На рис. 4.6 представлено результати обробки високочастотної компоненти зображень у порівнянні із вхідними зображеннями теплового поля низької просторової розрізненності.



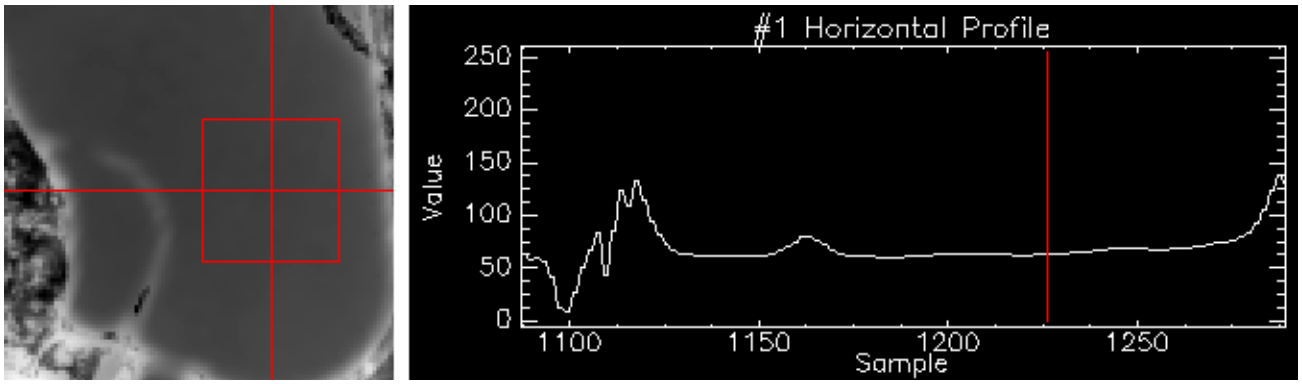
а

б

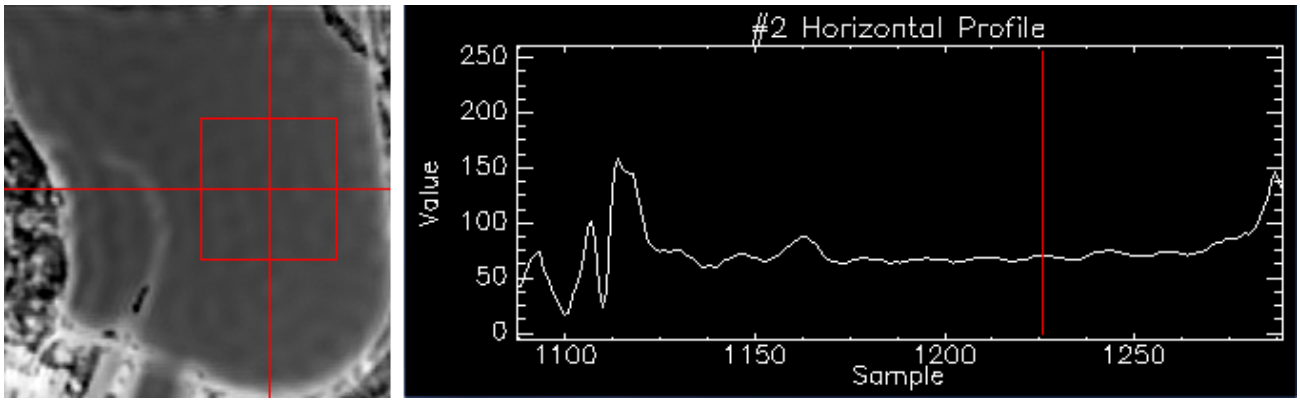
Рис. 4.6. Зображення теплового поля: *а* – низької просторової розрізненності; *б* – підвищеної просторової розрізненості (м. Київ, 13 липня 2016 р.)

Також виконана оцінка приросту інформативності та показника *MRTD* для даної пари зображень. Середнє розрахункове значення приросту інформативності склало 106,5 %, а показника *MRTD* – 85,9 %.

Даний спосіб підвищення просторової розрізненності має недолік – через передискретизацію та наступне підвищення різкості зображення підвищеної розрізненності на великих гомогенних ділянках (найчастіше це водні поверхні) підсилюються шуми. На рис. 4.7 представлено фрагменти зображень – вхідного зображення низької просторової розрізненності та результуючого підвищеної розрізненності, а також горизонтальні профілі даних на гомогенній ділянці (Київське водосховище).



а



б

Рис. 4.7. Зображення теплового поля та горизонтальні профілі даних: *а* – низької просторової розрізненності; *б* – підвищеної просторової розрізненості (м. Київ, 13 липня 2016 р.)

Компенсацію даного недоліку може бути здійснено застосуванням до зображення підвищеної розрізненності маски, отриманої із зображення низької розрізненності, яка включає в себе гомогенні ділянки, з характерними шумами. Оскільки підвищення розрізненності гомогенних ділянок дуже слабко впливає на їх приріст деталізації через відносну однорідність, такий підхід не чинить негативного впливу на загальний приріст розрізненності результуючого зображення.

4.3 Рекомендації з впровадження розробленої методики

В умовах відсутності широкого доступу до даних космічного знімання у довгохвильовій інфрачервоній області електромагнітного спектру із просторовою розрізненністю менше 100 м, розроблена методика дозволяє значно підвищити просторову розрізненність результуючих зображень теплового поля, особливо в умовах обробки даних із високою просторовою неоднорідністю, наприклад, міського середовища і дозволяє вирішувати широкий спектр задач.

Розроблену методика впроваджено в рамках виконання завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013–2017 рр. та використовувалося в 2016 році при виконанні складових частин дослідно-конструкторських робіт (СЧ ДКР) “Розроблення алгоритмів і відповідного програмного забезпечення субпіксельної обробки кадрів підстилаючої поверхні Землі, що формуються СДІЧ”, і “Розробка програмного модуля підвищення просторової розрізненності первинних інформаційних матеріалів”.

Практичне застосування розробленої методики рекомендується здійснювати для пар інфрачервоних зображень одної ділянки місцевості, одержаних як можна ближче за часом, причому спільну субпіксельну обробку можна застосовувати лише або до просторових розподілів коефіцієнтів

теплового випромінювання, або до відокремлених високочастотних компонент температурних полів.

Подальші дослідження варто спрямувати на удосконалення розроблених алгоритмів з метою придушення шумів, що є наслідками передискретизації та наступного підвищення різкості, а також на розробку методів і алгоритмів отримання температурних полів земної поверхні в умовах відсутності додаткових даних знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах [9].

Висновки до четвертого розділу

1. Розроблену методику перевірено на 24 зображеннях, отриманих супутниковою системою Landsat-8 шляхом порівняльних оцінок функції передачі модуляції вхідних і результуючих зображень теплових полів. Доведено її працездатність та корисність при аналізі даних супутникового знімання в довгохвильовому інфрачервоному діапазоні.

2. Підвищення просторової розрізненності, при застосування зображення розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання земних покривів, отриманих при обробці багатоспектральних даних сенсора OLI, які мають фактичну просторову розрізненність в 3,3 рази вищу за дані сенсора TIRS в середньому 33,5 %. Підвищення досягається внесенням додаткових деталей у зображення завдяки отриманню розподілу коефіцієнта теплового випромінювання більшої просторової розрізненності. Слід зазначити, що дана оцінка є заниженою у порівнянні із реальним підвищенням розрізненності через низьку чутливість програмного забезпечення для моделювання ФПМ до високочастотних компонент. Середній приріст інформативності склав 52,3%, а показника *MRTD* – 56,7%.

3. Застосування ітераційної гауссівської регуляризації для підвищення просторової розрізненності різночасових пар зображень коефіцієнта теплового випромінювання дозволяє підвищити просторову розрізненність результуючого

зображення в середньому на 38,9 %. Приріст інформативності склав 103,4 % а значення мінімального розрізнювального значення коефіцієнта теплового випромінювання – 29,2 %. Застосування цих зображень для розрахунку теплового поля замість зображень низької просторової розрізненності дозволяє додатково підвищити просторову розрізненність зображення теплового поля в середньому на 69 %, інформативність на 215,1 %, в той час як приріст *MRTD* практично відсутній.

4. Обробка окремо виділеної високочастотної компоненти пар різночасових зображень теплового поля дозволяє підвищити їх просторову розрізненність в середньому на 76,5 % а розрахункове значення приросту інформативності склало 106,5 %, а показника *MRTD* – 85,9 %.

Список використаних джерел

1. Кононов В. И., Федоровский А. Д., Дубинский Г. П. Оптические системы построения изображений. Киев: Техніка, 1981. 134 с.
2. Станкевич С. А. Статистичний підхід до визначення порогової модуляції цифрових аерокосмічних зображень. *Космічна наука і технологія*, 2005. Т. 11. № 3/4. С. 81-84.
3. Попов М. А., Станкевич С. А., Тягур В. М., Шкляр С. В., Подорван В. Н., Добровольская К. В., Лубский Н. С. Повышение пространственного разрешения путём субпиксельной обработки изображений. *“Проблеми телекомуникацій-2014” (ПТ-2014)*: Матеріали Восьмої Міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 22-25 квітня 2014). Київ: ІТС НТУУ “КПІ”, 2014. С.57-60.
4. Reuter D. C., Richardson C., Irons J., et al. The Thermal Infrared Sensor on the Landsat Data Continuity Mission. *IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium*: Proceedings of the international conference (Honolulu, USA, 25-30 July, 2010). IEEE, 2010. p. 417-420.
5. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Лубський М. С. Підвищення просторової розрізненності аерознімання на основі субпіксельної реєстрації зображень *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, 2013. № 9(16). С. 110-117.
6. Станкевич С. А., Шкляр С. В. Удосконалений алгоритм визначення перехідної функції на цифровому аерокосмічному зображенні. *Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского*, 2005. Т.18(57). № 2. С.97-102.
7. Станкевич С. А., Шолоник О. В. Адаптивное многомерное вероятностное преобразование многоспектральных цифровых аэрокосмических снимков. *“Науки про Землю та космос – суспільству”*: праці Першої наукової конференції (Київ, 25-27 червня 2007). Київ: ЦАКДЗ ІГН НАН України, 2007. С. 11-14

8. Станкевич С.А., Шолонік О.В. Інструментарій оцінювання еквівалентної просторової розрізненності багато- та гіперспектральних цифрових аерокосмічних знімків. *Збірник наукових праць Державного науково-дослідного інституту авіації*, 2007. № 3(10). С. 165-171.
9. Lyalko V. I., Popov M. A., Stankevich S. A., Shklyr S. V., Podorvan V. N., Likholit N. I., Tyagur V. M., Dobrovolska C. V. Prototype of satellite infrared spectroradiometer with superresolution. *Journal of Information, Control and Management Systems*, 2014. Vol. 12. № 2. P.153-164.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукову задачу підвищення інформативності результатів обробки даних дистанційного зондування Землі у довгохвильовому інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру шляхом підвищення просторової розрізненності розподілів теплового поля досліджуваної території, що описується температурою та коефіцієнтом теплового випромінювання земної поверхні. Дана задача успішно вирішена, мету дисертаційного дослідження досягнуто, на основі отриманих результатів зроблено наступні висновки:

1. Виконано порівняльний аналіз існуючих знімальних систем дистанційного зондування Землі довгохвильового інфрачервоного діапазону 8-14 мкм. Наразі у вільному доступі є дані лише одного сенсора TIRS, розміщеного на супутнику Landsat-8, що забезпечує просторову розрізненність 100 м на місцевості, інтерпольовану до 30 м.

2. Проведено огляд відомих методів оцінки температури та коефіцієнта теплового випромінювання за даними знімання в інфрачервоному діапазоні. Відзначено можливість отримання просторового розподілу коефіцієнта теплового випромінювання за допомогою обробки даних видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, які мають порівняно вищу просторову розрізненність, ніж дані довгохвильового інфрачервоного діапазону.

3. Проведено аналіз сучасних методів відновлення зображень підвищеної просторової розрізненності за кількома субпіксельно зміщеними зображеннями нижчої просторової розрізненності. Як найбільш перспективний визначено метод ітераційної гаусівської регуляризації в скануючому вікні.

4. Визначено основні завдання дисертаційної роботи які включають в себе розробку нових та вдосконалення існуючих методик визначення температури та їх коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні за даними дистанційного зондування, двоетапного підвищення їх просторової розрізненності та кількісної оцінки одержуваних результатів.

5. Обґрунтовано можливість застосування даних знімання видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, одержуваних супутниковим сенсором OLI для отримання розподілу коефіцієнта теплового випромінювання більш високої просторової розрізненності, ніж дані довгохвильового інфрачервоного діапазону, продемонстровано можливість підвищення просторової розрізненності склало 33,5 % у порівнянні із даними знімання сенсором TIRS. При цьому досягнуто підвищення інформативності на 52,3%, а показника *MRTD* – на 56,7%.

Обґрунтовано та описано методику спільної обробки даних видимого, ближнього інфрачервоного та довгохвильового інфрачервоного випромінювання з метою підвищення деталізації теплового поля земної поверхні.

6. Удосконалено метод розрахунку просторового розподілу коефіцієнтів теплового випромінювання нерослинних земних покривів та штучних поверхонь шляхом відновлення регресійної залежності між спектральними коефіцієнтами відбиття та теплового випромінювання на основі бібліотеки типових спектрів, характерних для заданої території.

7. Розроблено алгоритми розрахунку субпіксельного зміщення та підвищення просторової розрізненності зображень розподілу інваріантної в часі величини – коефіцієнта теплового випромінювання, і неінваріантної – температури земної поверхні на основі пари різночасових субпіксельно зміщених зображень шляхом ітераційної субпіксельної обробки в скануючому вікні.

8. Всі розроблені алгоритми увійшли до складу нової двоетапної методики підвищення просторової розрізненності різночасових розподілів теплового поля території дослідження на основі субпіксельної обробки окремих частотних компонент зображення.

9. Розроблена методика тестувалося на 12 зображеннях супутникової системи Landsat-8 із різноманітними ландшафтами, серед яких урбанізовані, індустріальні, сільськогосподарські, пустельні, а також прибережні території із

акваторіями, як річковими так і морськими, знятих протягом 2014–2016 років. Досягнуте підвищення реальної просторової розрізненності оцінювалося порівнянням функцій передачі модуляції вхідних та вихідних зображень, що оцінювалися автоматично за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Підвищення склало в середньому 38,9 % для розподілів коефіцієнта теплового випромінювання, при цьому приріст інформативності склав 103,4 %, а величина мінімального розрізнювального значення коефіцієнта теплового випромінювання – 29,2 %. Підвищення просторової розрізненності для розподілів температури земної поверхні склало 76,5 %, підвищення інформативності – 215,1 % без суттєвого приросту мінімальної розрізнювальної температури.

10. Розроблену методику впроваджено в рамках виконання завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013-2017 рр., що підтверджується відповідними актами, та рекомендовано для створення високодеталізованих карт теплового поля в умовах наявності даних знімання у діапазоні 8-14 мкм із недостатньою просторовою розрізненністю.

Розроблена в ході виконання роботи методика є ефективним інструментом картування теплового поля територій із високою гетерогенністю покривів та ландшафтів (наприклад, урбанізоване середовище) в умовах наявності вхідних даних теплового знімання із низькою просторовою розрізненністю. Особливо актуальною дана методика є на сьогодні, оскільки зараз існує суттєвий брак функціонуючих систем дистанційного зондування в діапазоні 8-14 мкм.

Таким чином, в дисертаційній роботі розроблено комплексну двоетапну методику підвищення інформативності даних знімання у довгохвильовій області інфрачервоного випромінювання, в якій на першому етапі застосовується вдосконалена технологія розрахунку просторового розподілу коефіцієнта теплового випромінювання на основі даних видимого та ближнього інфрачервоного випромінювання більш високої розрізненності, а на другому етапі виконується підвищення просторової розрізненності на основі

субпіксельної обробки окремих частотних компонент пар різночасових зображень.

Подальші дослідження варто спрямувати на вдосконалення розробленої методики за рахунок покращення алгоритмів субпіксельної обробки з метою придушення шумів, що є наслідками передискретизації та наступного підвищення різкості, а також на розробку нових більш ефективних методів отримання розподілів теплового поля підвищеної розрізненності в разі відсутності додаткових даних знімання у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах.

Додаток А

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
КАЗЕННЕ ПІДПРИЄМСТВО
СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЛАДОБУДУВАННЯ «АРСЕНАЛ»
КП СПБ «АРСЕНАЛ»

вул. Московська, 8, м. Київ, Україна, 01010, тел./факс (044) 288-94-29, тел. 253-00-62
E-mail: info@arsenalcdb.com.ua
Код ЄДРПОУ 14307357

08.06.2015 № 976/70-12 на № _____ від _____

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Директор – головний конструктор
КП СПБ "Арсенал",
член-кореспондент НАН України
М.І. Пихоліт
"____" _____ 2015 р.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень аспіранта Наукового Центру аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України **Лубського Миколи Сергійовича**

Комісія в складі: голова – кандидат технічних наук, Тягур В.М., члени комісії – Добровольска К.В., склала цей акт про те, що наукові положення і результати, одержані Лубським М.С., а саме

- модель визначення термодинамічної температури та зональних коефіцієнтів теплового випромінювання земної поверхні за матеріалами інфрачервоного знімання;
- модель урахування впливу атмосфери при інфрачервоному зніманні

були використані в науково-дослідній роботі "Фізична модель інфрачервоного спектрорадіометра з підвищенням просторової розрізненності за допомогою субпіксельного оброблення зображень", що виконувалась в рамках завдань, поставлених Державною цільовою науково-технічною космічною програмою України на 2013-2017 рр.

Голова комісії Тягур В.М.

Члени комісії Добровольска К.В.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Тимчасово виконуючий обов'язки
командира військової частини А1906

В.В.РУДЕНКО

"23" 4 2016 р.

АКТ

впровадження результатів наукових досліджень аспіранта Наукового центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України **Лубського Миколи Сергійовича**

Комісія в складі: голова – заступник командира військової частини А1906 з наукової роботи кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Сащук І.М., члени комісії – начальник науково-дослідного управління кандидат технічних наук, доцент Бовкун О.М., начальник науково-дослідного відділу Кондратов О.М. склала цей акт про те, що наукові положення і результати, одержані Лубським М.С., а саме – алгоритм підвищення просторової розрізненності даних інфрачервоного космічного знімання – були використані при виконанні складової частини науково-дослідної роботи "Программный модуль повышения пространственного разрешения первичных информационных материалов", шифр "Гром-2-Сигнатура" в 2016 році.

Цей акт не є підставою для фінансових розрахунків.

Голова комісії І.М. Сащук

Члени комісії О.М. Бовкун

О.М. Кондратов

Додаток Б

Скрипт для програмного середовища SciLab (версія 6.0.0) для формування спектрів випромінювальної здатності земних покривів із спектрів, отриманих із бази ASTER Spectral Library

```
// Spectrum sorting & filtering
// SciLab 6.0.0 script (C) 2002-2017
clear();

Y=read('Oxidized_Galvanized_Steel_Metal2.dat',-1,2);  // raw
spectrum
Z=gsort(Y,'lr','i');  // sorted spectrum
[F,K]=unique(Z(:,1));  // unique wavelenghts
M=diff(K)-1;  // non-unique samples number
for i=1:size(M,1),
   if (M(i)>0) then
      U(i)=mean(Z(i:(i+M(i)),2));  // non-unique samples averaging
   else
      U(i)=Z(i,2);  // unique samples translation
   end;
end;
U($+1)=Z(K($),2);

dat=mopen('OXIDIZED_GALVANIZED_STEEL_METAL.DAT','wt');
for i=1:size(F,1),
mfprintf(dat,'%.4f %.6f\n',F(i),U(i));
end;
mclose(dat);

clf(); plot(F,U,'-g');
```

Додаток В

Скрипт для програмного середовища SciLab (версія 6.0.0) для розрахунку залежності коефіцієнтів теплового випромінювання типових поверхонь та покривів від вегетаційного індексу NDVI

```
// NDVI => land surface emissivity (LSE) relationship estimation
// SciLab 6.0.0 script (C) 2006-2017
clear();

function [ndvi,epsi1,epsi2]=NDVILSE(A,B,X,Y)
   D=splin(Y(:,1),Y(:,2),"natural");  // interpolating cubic spline
   R=interp(A(:,1),Y(:,1),Y(:,2),D,"linear");  // red band
interpolated reflectance
   N=interp(B(:,1),Y(:,1),Y(:,2),D,"linear");  // NIR band
interpolated reflectance
   T=interp(X(:,1),Y(:,1),Y(:,2),D,"linear");  // TIR band
interpolated reflectance
   E=1-T/100;  // TIR band interpolated emissivity
// clf(); plot(X(:,1),E,'-g',X(:,1),X(:,2),'-r',X(:,1),X(:,3),'-
m');
   red=sum(A(:,2)/sum(A(:,2)).*R);  // red band integral
reflectance
   nir=sum(B(:,2)/sum(B(:,2)).*N);  // NIR band integral
reflectance
   ndvi=(nir-red)/(nir+red);  // OLI bands NDVI
   epsi1=sum(X(:,2)/sum(X(:,2)).*E);  // TIRS band 10 integral
emissivity
   epsi2=sum(X(:,3)/sum(X(:,3)).*E);  // TIRS band 11 integral
emissivity
endfunction

mprintf('\n   NDVI and land surface emissivity speclib
estimation\n');
A=read('E:\PHD\NDVI-LSE\L8-OLI-Red.dat',-1,2);  // red band
spectral response
B=read('E:\PHD\NDVI-LSE\L8-OLI-NIR.dat',-1,2);  // NIR band
spectral response
X=read('E:\PHD\NDVI-LSE\L8-TIRS.dat',-1,3);  // TIR bands spectral
responses
S=mgetl('E:\PHD\NDVI-LSE\EMISSLIB.LST');  // emissivity spectra
files list
n=size(S,1);  // number of emissivity spectra
mprintf('   %u land surface spectra used for estimation\n',n);

progress=waitbar('spectra estimating : '+string(n));
lst=mopen('NDVI-LSE-Estimation.csv','wt');
for i=1:n,
   Y=read(S(i),-1,2);  // current reflectance spectrum
   [ndvi(i),epsi1(i),epsi2(i)]=NDVILSE(A,B,X,Y);
```

```
   mfprintf(lst,'%.6f %.8f %.8f\n',ndvi(i),epsi1(i),epsi2(i));
   waitbar(i/n,'spectra estimating : '+string(n-i),progress);
end;
mclose(lst); close(progress);
mprintf('   NDVI and land surface emissivity of %u spectra
estimated\n',n);

clf(); plot(ndvi,epsi1,'sg',ndvi,epsi2,'dc');  // NDVI-LSE
relationship visualizing
low=find(ndvi<0.34);  // low NDVI estimated emissivity, mean =
0.0091313, 0.8740463
high=find(ndvi>0.9);  // high NDVI estimated emissivity, mean =
0.9817490, 0.9842091
plot([mean(ndvi(low)),1],[mean(epsi1(low)),mean(epsi1(high))+0.005]
,'+r',[mean(ndvi(low)),1],[mean(epsi2(low)),mean(epsi2(high))+0.005
],'xm');
```

Додаток Г

Скрипт для програмного середовища SciLab (версія 6.0.0) для розрахунку розподілу коефіцієнта теплового випромінювання на основі вхідного зображення розподілу вегетаційного індексу NDVI

```
// L8 NDVI to LSE recalculating by relationship approximation
// SciLab 6.0.0 script (C) 2006-2017
clear();

mprintf('\n   Landsat-8/OLI NDVI to land surface emissivity
approximating\n');
l=2100; n=2800;  // image size, lines, samples
ndvi=read('L8-OLI-NDVI-KR-2016-09-17.dat',l,n);  // OLI bands 4, 5
NDVI transform
mprintf('   2 bands of %u x %u size image was loaded\n',l,n);
threshv=evstr(x_mdialog('NDVI and land surface emissivity threshold
values',['non-vegetated area NDVI';'full-covered area NDVI';'non-
vegetated area emissivity';'vegetation emissivity';'surface
roughness emissivity']+' :',[' 0.14';' 0.86';' 0.9';' 0.985';'
0.005']));
if isempty(threshv) then halt('   NDVI and LSE threshold values are
not defined\n'); abort; end;
K10=[-1,0.98;0.057596,0.955701;threshv(1),threshv(3)+threshv(5)];
// TIRS band 10 low NDVI approximating knots
K11=[-1,0.98;0.057596,0.944584;threshv(1),threshv(3)+threshv(5)];
// TIRS band 11 low NDVI approximating knots
C10=splin(K10(:,1),K10(:,2),"clamped",[0;0]);  // TIRS band 10 low
NDVI interpolating clamped spline
C11=splin(K11(:,1),K11(:,2),"clamped",[0;0]);  // TIRS band 11 low
NDVI interpolating clamped spline
D10=splin([threshv(2);1],[threshv(4);0.981749]+threshv(5),"clamped"
,[2*(threshv(4)-threshv(3))/(threshv(2)-threshv(1));0]);  // TIRS
band 1 high NDVI interpolating clamped spline
D11=splin([threshv(2);1],[threshv(4);0.9842091]+threshv(5),"clamped
",[2*(threshv(4)-threshv(3))/(threshv(2)-threshv(1));0]);  // TIRS
band 2 high NDVI interpolating clamped spline
mprintf('   approximating relationships parameters was defined\n');

mprintf('   NDVI to LSE calculation ...');
progress=waitbar('NDVI lines processing : '+string(l));
for i=1:l, for j=1:n,
   if ndvi(i,j)<threshv(1) then
      epsi10(i,j)=interp(ndvi(i,j),K10(:,1),K10(:,2),C10);  // TIRS
band 10 low NDVI interpolated emissivity
      epsi11(i,j)=interp(ndvi(i,j),K11(:,1),K11(:,2),C11);  // TIRS
band 11 low NDVI interpolated emissivity
   elseif ndvi(i,j)<=threshv(2) then
      epsilon=(threshv(4)-threshv(3))/(threshv(2)-
threshv(1))^2*(ndvi(i,j))^2-2*(threshv(4)-
threshv(3))*threshv(1)/(threshv(2)-
```

```
threshv(1))^2*ndvi(i,j)+(threshv(4)-
threshv(3))*(threshv(1))^2/(threshv(2)-
threshv(1))^2+threshv(3)+threshv(5);
      epsi10(i,j)=epsilon; epsi11(i,j)=epsilon;
   else

epsi10(i,j)=interp(ndvi(i,j),[threshv(2);1],[threshv(4);0.981749]+t
hreshv(5),D10);  // TIRS band 1 high NDVI interpolated emissivity

epsi11(i,j)=interp(ndvi(i,j),[threshv(2);1],[threshv(4);0.9842091]+
threshv(5),D11);  // TIRS band 2 high NDVI interpolated emissivity
   end;
end; waitbar(i/l,'NDVI lines processing : '+string(l-i),progress);
end;
close(progress);
mprintf(' complete\n');

dat10=mopen('L8-OLI-LSE10-KR-2016-09-17.dat','wt');
dat11=mopen('L8-OLI-LSE11-KR-2016-09-17.dat','wt');
for i=1:l, for j=1:n,
   mfprintf(dat10,'%10.6f',epsi10(i,j));
mfprintf(dat11,'%10.6f',epsi11(i,j));
end; mfprintf(dat10,'\n'); mfprintf(dat11,'\n'); end;
mclose(dat10); mclose(dat11);
mprintf('   Landsat-8/OLI LSE output complete\n');
```

Додаток Д

Скрипт для програмного середовища SciLab (версія 6.0.0) для обчислення субпіксельного зміщення між зображеннями

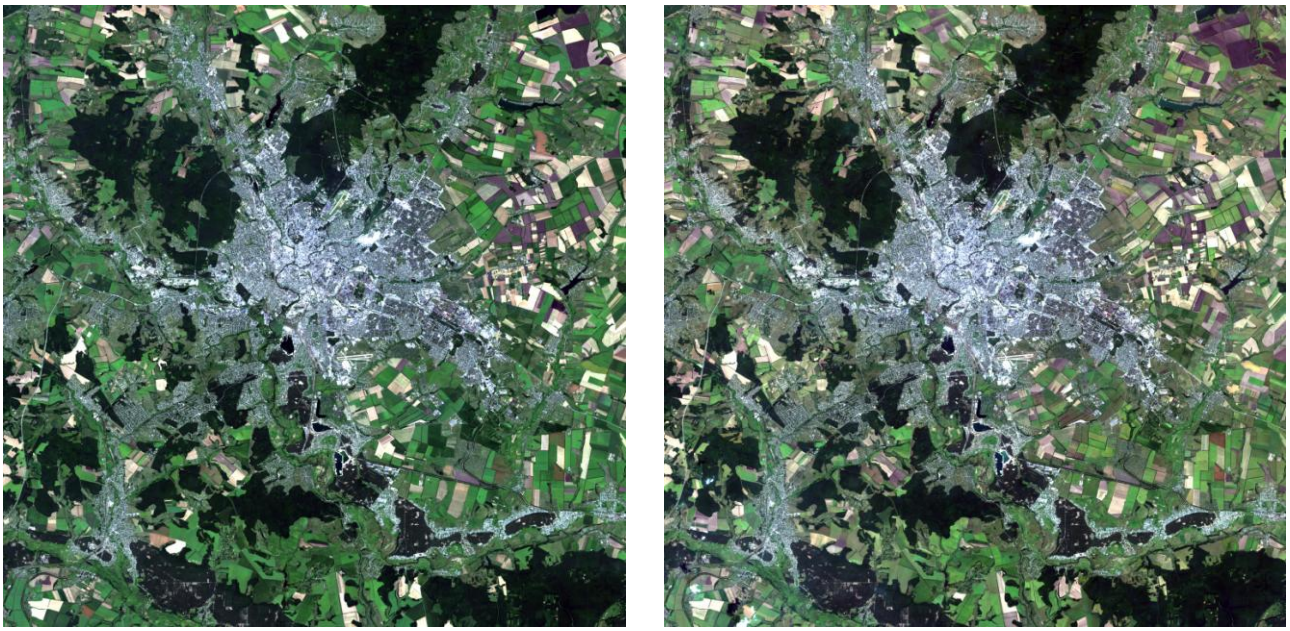
```
function [dx, dy] = align_Young_MV3(Y1, Y2)
[m, n] = size(Y1);
[m2, n2] = size(Y2);
assert_checktrue((m==m2) & (n==n2));
COEFSR = [50, 50];

FT1 = SWFT(Y1);
FT2 = SWFT(Y2);
FT = FT1 .* conj(FT2);
half_m = ceil(m/2);
half_n = ceil(n/2);
arr_m = [0:(half_m-1), (half_m-m):(-1)]' / m;
arr_n = [0:(half_n-1), (half_n-n):(-1)]  / n;

maxabs = - %inf;
//for sdx = (0 : (COEFSR(1)-1)) / COEFSR(1);
for sdx = ((1-COEFSR(1)) : 0) / COEFSR(1);
    mul1 = exp(2 * %i * %pi * sdx * arr_m);
    FT1 = FT .* mul1(:, ones(1,n));
    for sdy = (0 : (COEFSR(2)-1)) / COEFSR(2);
//  for sdy = ((1-COEFSR(2)) : 0) / COEFSR(2);
        mul2 = exp(2 * %i * %pi * sdy * arr_n);
        FT2 = FT1 .* mul2(ones(m,1), :);

        EHR = ifft(FT2);
        //mprintf("max_imag %10.7f\n", ...
        //  max(abs(imag(EHR(:)))));
        EHR = real(EHR);
        //mprintf("%7.4f %7.4f  %10.7f\n", sdx, sdy, max(EHR(:)));
            [mE, nE] = size(EHR);
        [maxpsus, im] = max(EHR(:));
        if maxpsus > maxabs,
            [ix, iy] = ind2sub([mE, nE],im);
            if 2*ix<=mE,
                dx = (ix-1) + sdx;
            else
                dx = (ix - 1 - mE) + sdx;
            end
            if 2*iy<=nE,
                dy = (iy-1) + sdy;
            else
                dy = (iy - 1 - nE) + sdy;
            end
            maxabs = maxpsus;
        end
    end
```

```
end

[dx, dy] = fmaxsearchFour( FT , dx, dy);
endfunction

function FT = SWFT(Y)
[m, n] = size(Y);
FT = fft(Y);
wifi = transfer_window_fiter(m,1);
FT = FT .* wifi(:, ones(1, n));
wifi = transfer_window_fiter(n,1);
FT = FT .* wifi(:, ones(1, m)).';
endfunction

function wifi = transfer_window_fiter(n, k)
wifi = min(1, max(2 - 4*(0:(n*k-1))/n, 0));
wifi = max(wifi, wifi([1, (n*k) : (-1) : 2]));
wifi = wifi(:);
endfunction

function [ x, y ] = fmaxsearchFour( FT , x, y)
//Search sum(F .*  exp(2i*pi*(x*t1+y*t2)) for maximum

[m, n] = size(FT);
half_m = ceil(m/2);
half_n = ceil(n/2);
arr_m = [0:(half_m-1), (half_m-m):(-1)]' / m;
arr_n = [0:(half_n-1), (half_n-n):(-1)]  / n;
//oo = optimset('Hessian', 'user-supplied', ...
//    'GradObj', 'on');
z0 = [x; y];
//z = fminunc(@QGH, z0, oo);
[minQ, z] = optim(QGH_fmaxsearchFour, z0, "qn");
x = z(1);
y = z(2);
endfunction
    function [Q, G, ind] = QGH_fmaxsearchFour(z, ind)
        M = FT .* exp(2 * %i * %pi * ...
          (z(1)*arr_m(:, ones(1,n)) + z(2)*arr_n(ones(m,1),:)));
        reM = real(M);
        imM = imag(M);
        Q = - sum(reM(:));
        G1 = 2*%pi*sum( arr_m' * imM  );
        G2 = 2*%pi*sum( imM * arr_n');
        G = [G1; G2];
        //if nargout>=3,
        //    H1 = sum( (arr_m.^2)' * reM  );
        //    H2 = arr_m' * reM * arr_n';
        //    H3 = sum(  reM * (arr_n.^2)' );
        //    H = 4 * %pi^2 * [H1, H2; H2, H3];
        //end
        ind = 1;
    endfunction
```

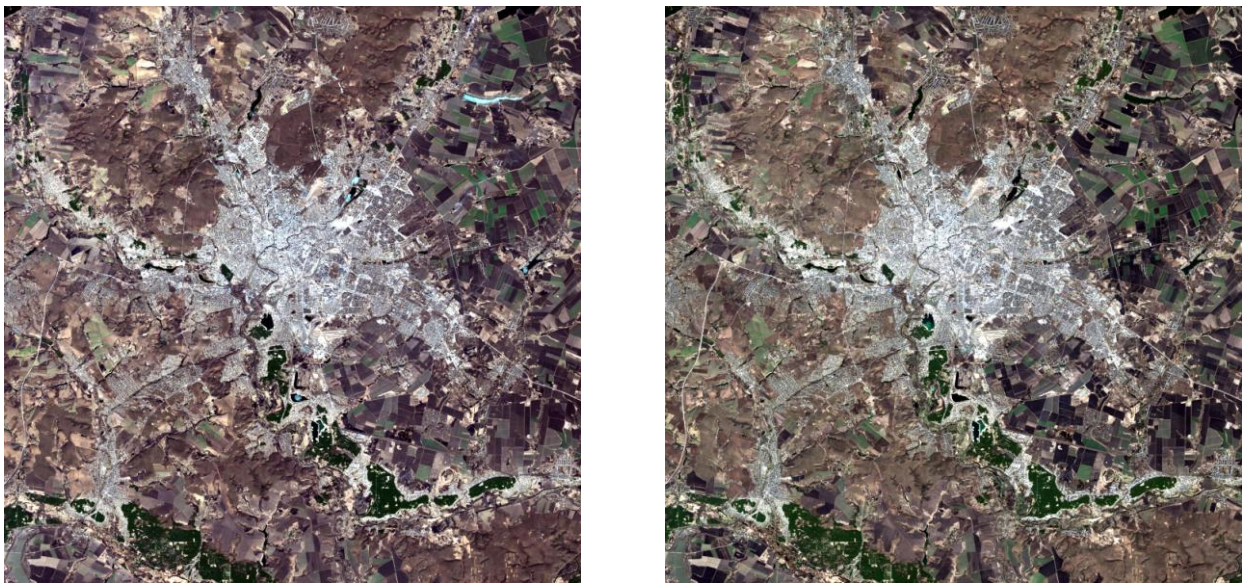
Додаток Е

Зображення територій, які використовувались для обробки

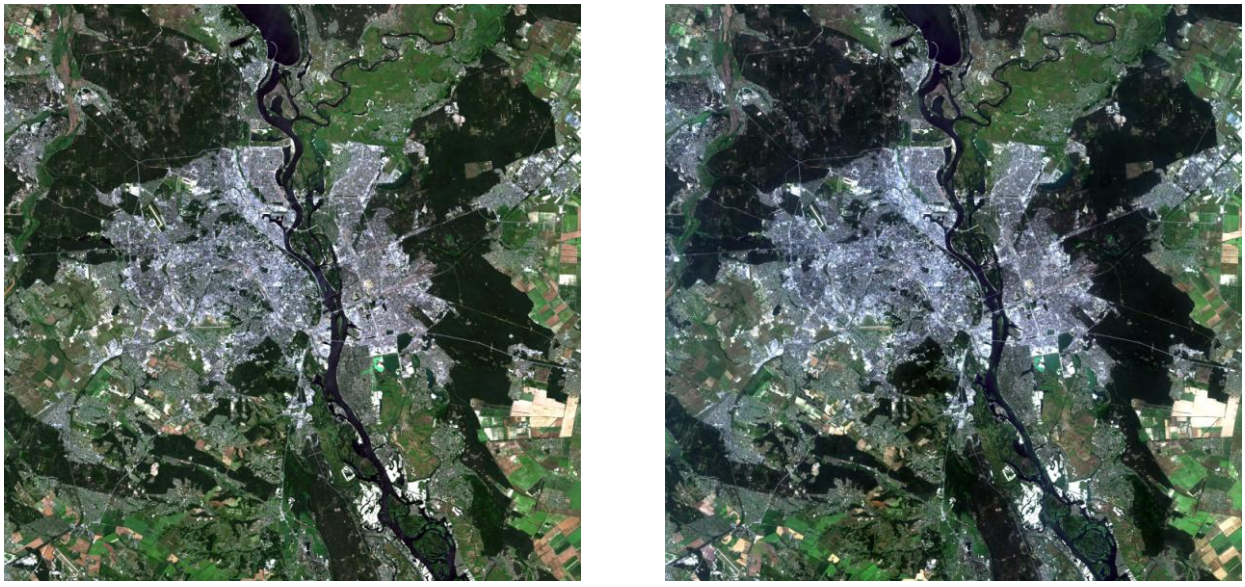
м. Дубай, ОАЕ. 26 липня та 11 серпня 2016 р.



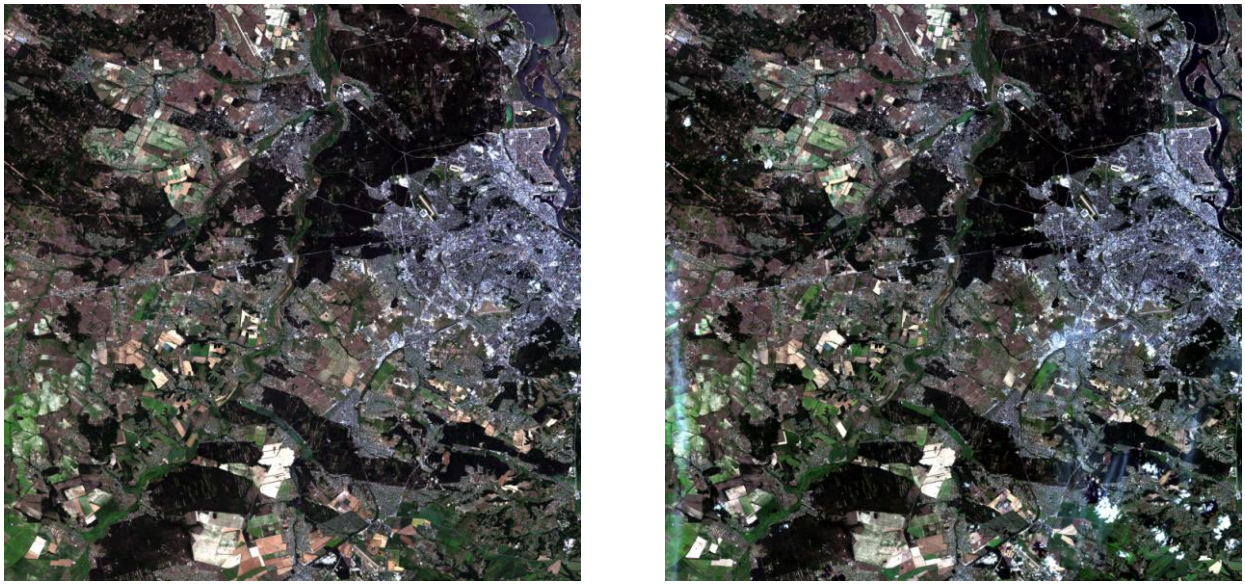
м. Харків, Україна. 28 липня та 13 серпня 2014 р.



м. Харків, Україна. 25 березня та 10 квітня 2015 р.

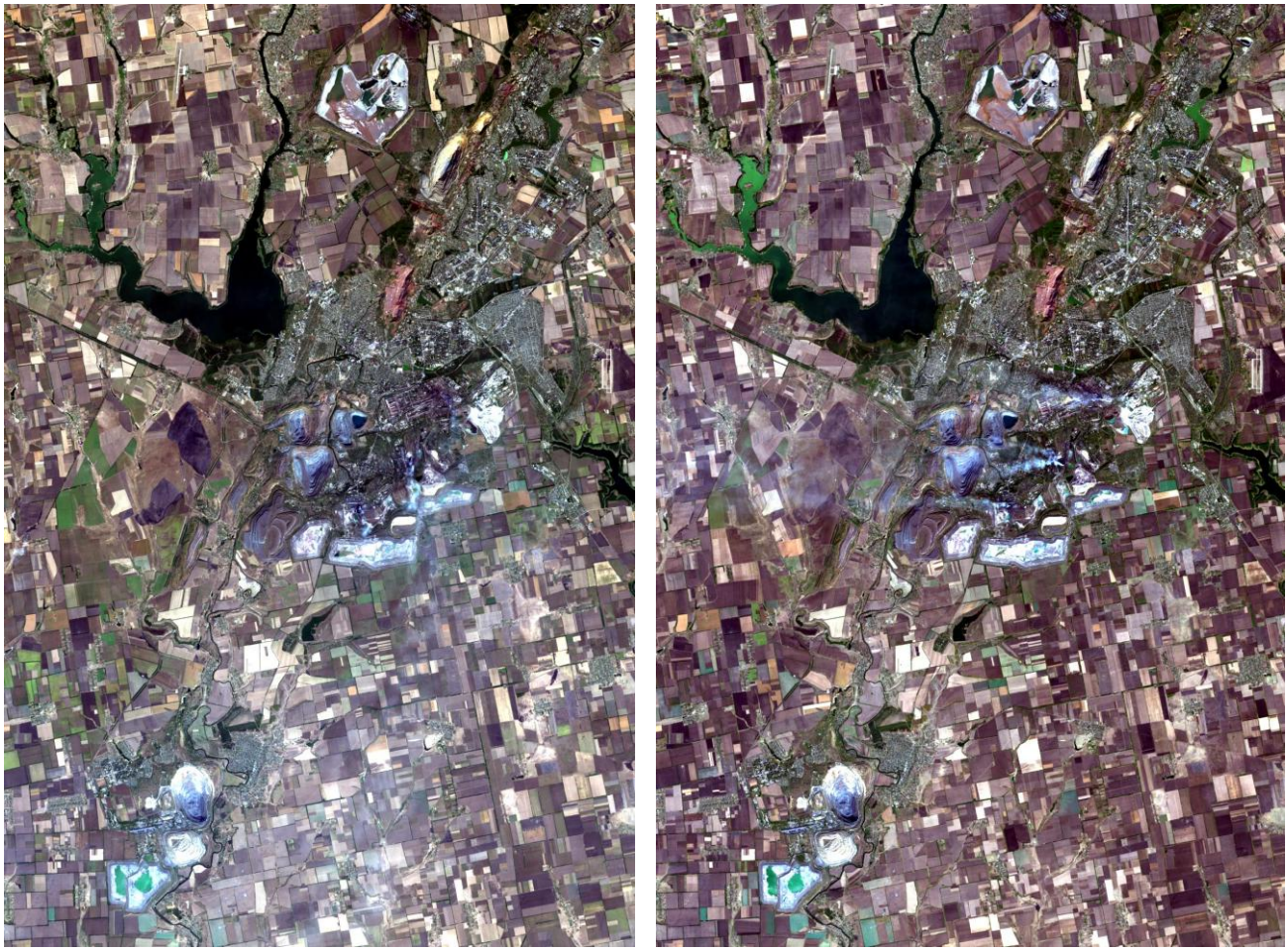


м. Київ, Україна. 13 липня та 29 липня 2016 р.



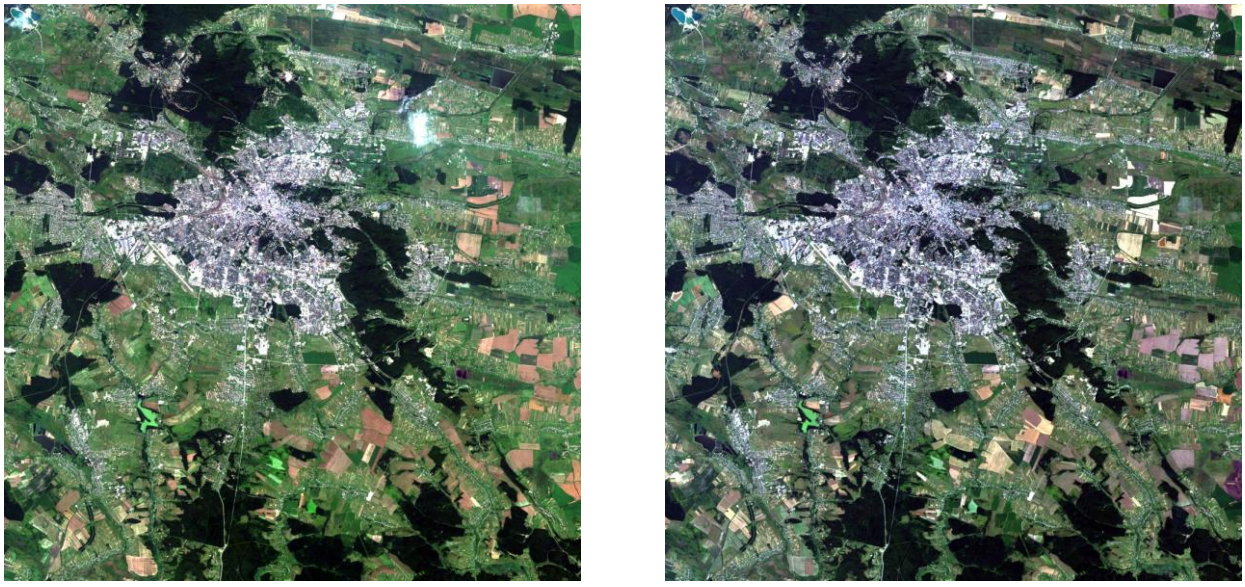
м. Київ, Україна. 18 липня та 3 серпня 2015 р.

м. Запоріжжя, Україна. 7 серпня та 23 серпня 2015 р.

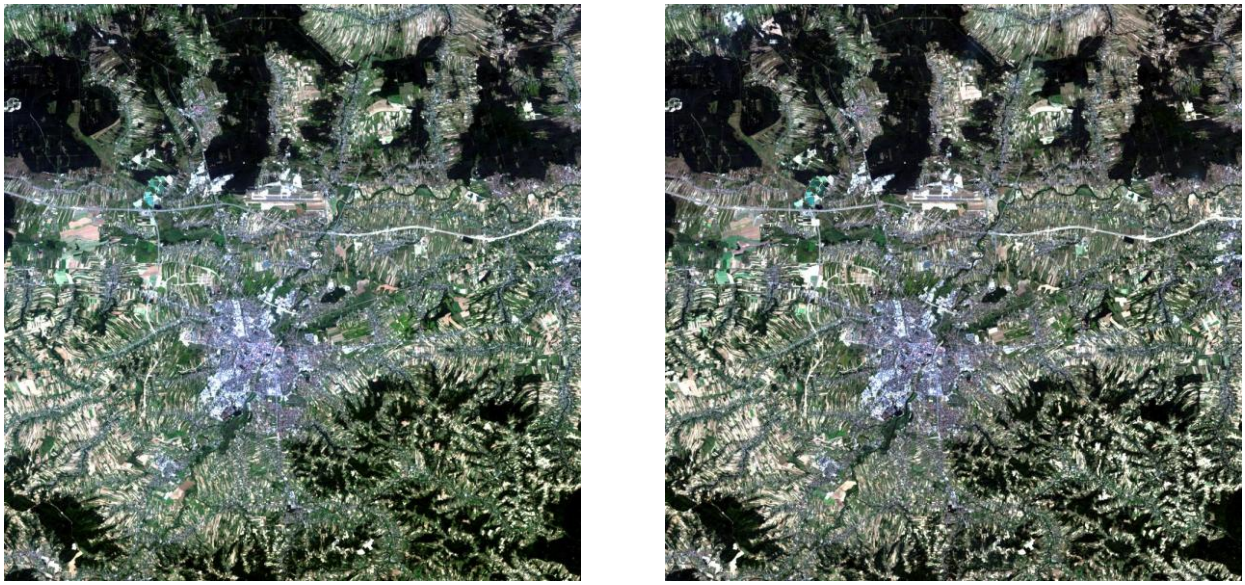


м. Кривий Ріг, Україна. 17 вересня та 3 жовтня 2016 р.

м. Копенгаген, Данія, м. Мальме, Швеція. 23 серпня та 8 вересня 2015 р.



м. Львів, Україна. 23 липня та 8 серпня 2015 р.



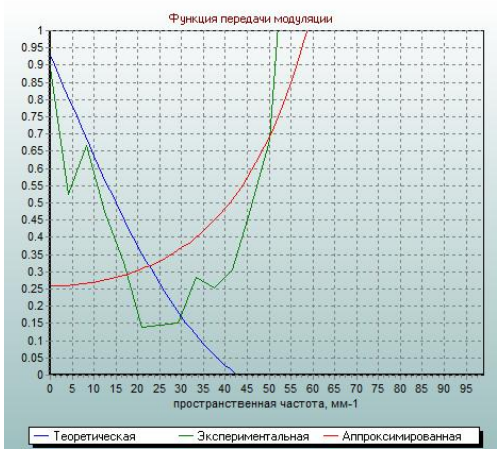
м. Рящів, Польща. 15 серпня та 31 серпня 2015 р.

м. Одеса, Україна. 25 вересня та 11 жовтня 2015 р.

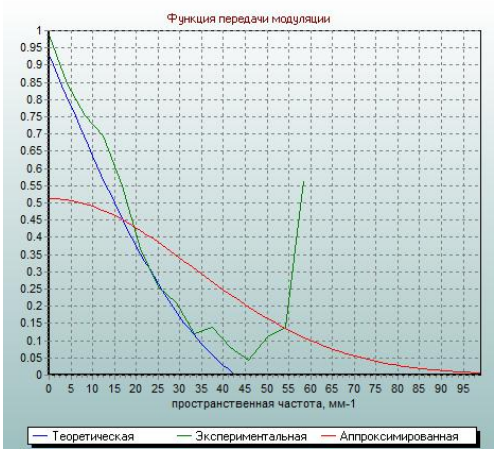
м. Рим, Італія. 3 липня та 19 липня 2016 р.

Додаток Є

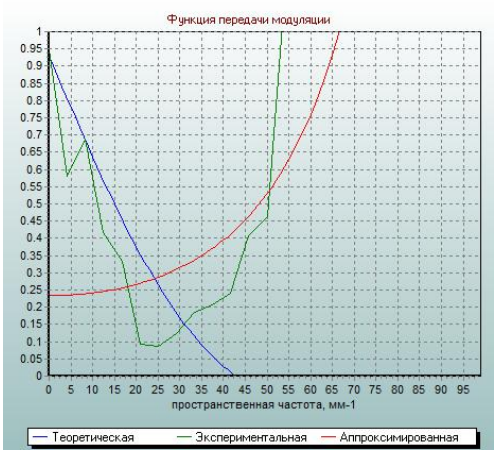
Порівняння просторових частот ФПМ, отриманих на основі зображень розподілів радіаційної температури TIRS та фізичної температури TIRS+OLI



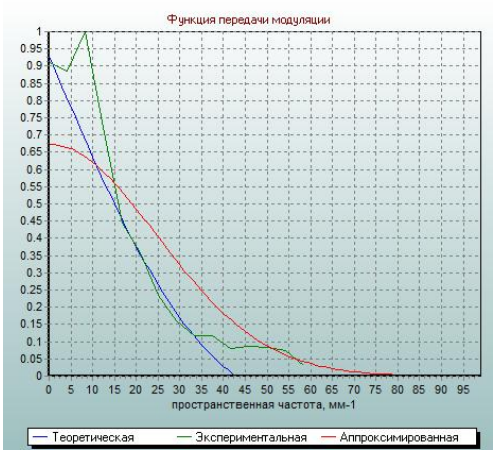
LC81600432016208 TIRS



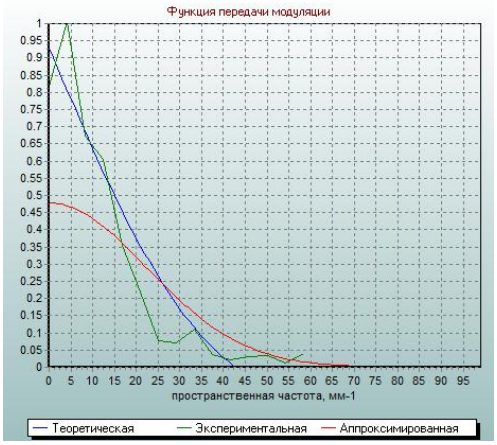
LC81600432016208 TIRS+OLI



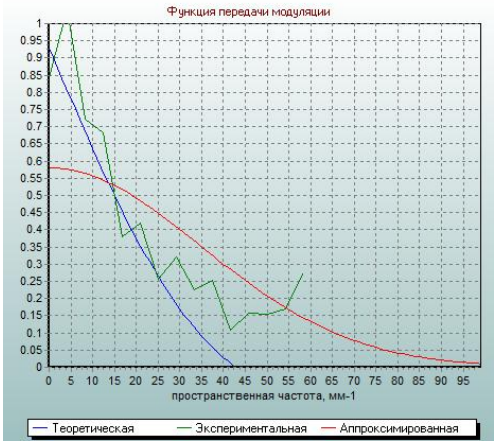
LC81600432016224 TIRS



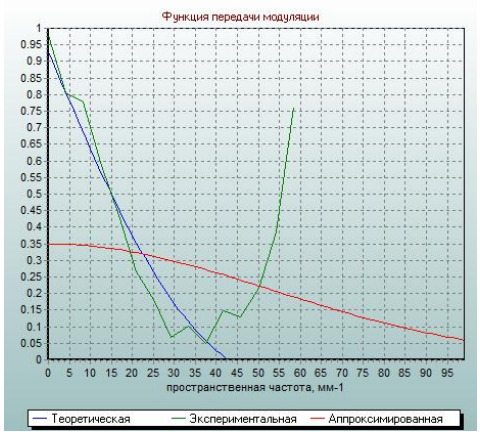
LC81600432016224 TIRS+OLI



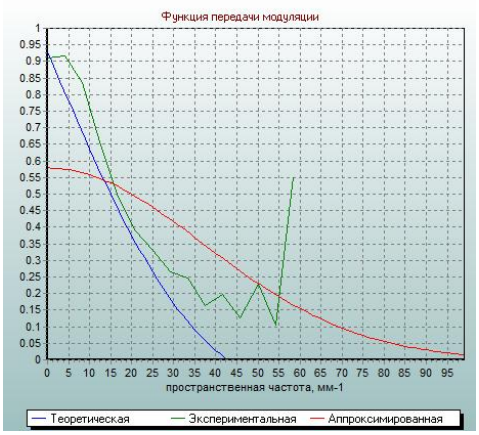
LC81770252014209 TIRS



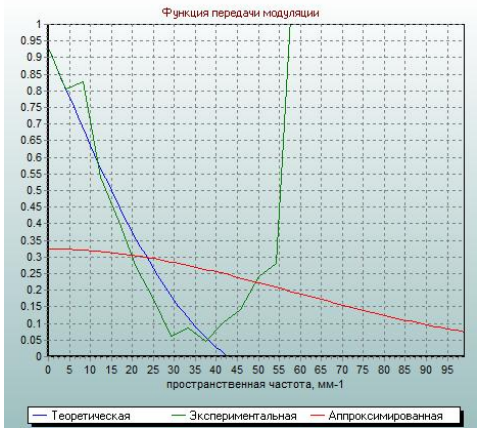
LC81770252014209 TIRS+OLI



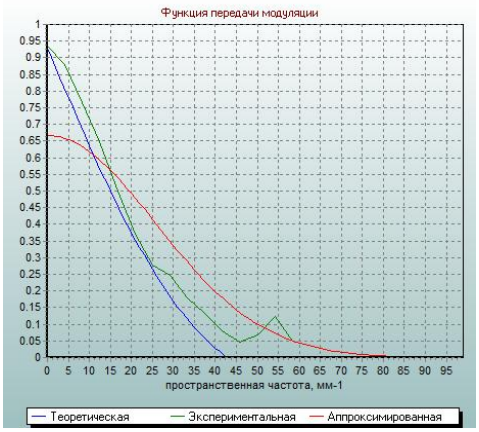
LC81770252014225 TIRS



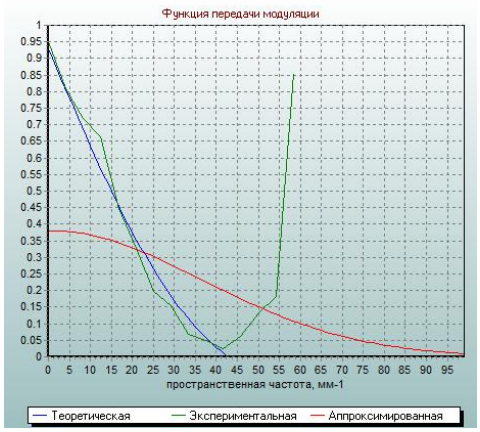
LC81770252014225 TIRS+OLI



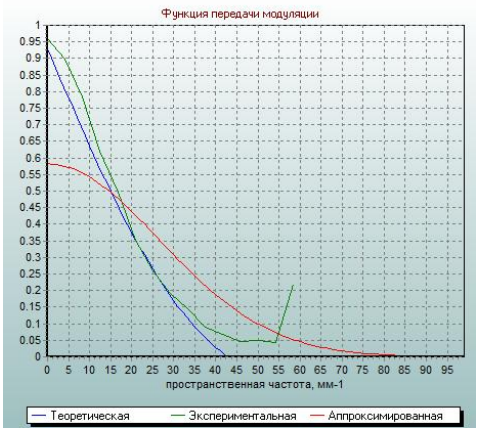
LC81770252015084 TIRS



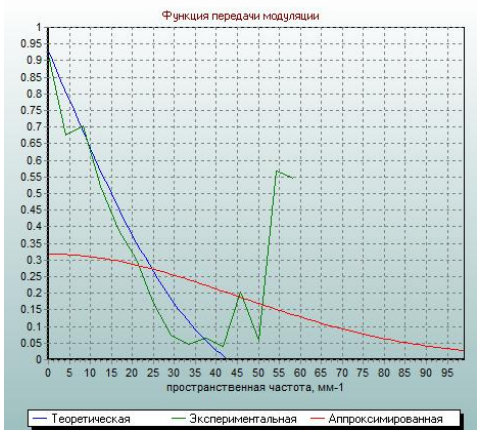
LC81770252015084 TIRS+OLI



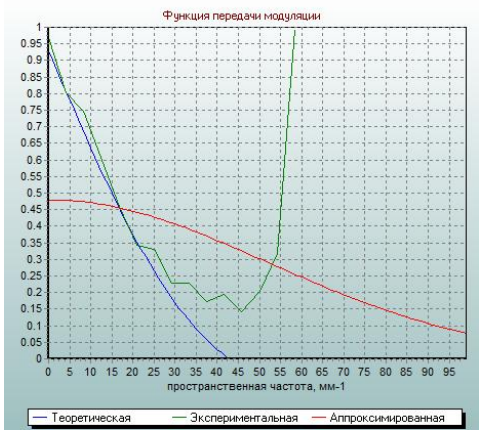
LC81770252015100 TIRS



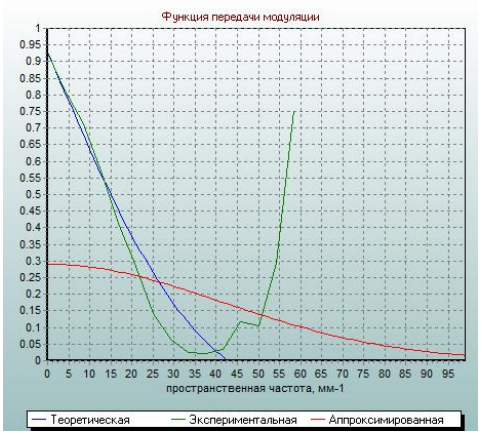
LC81770252015100 TIRS+OLI



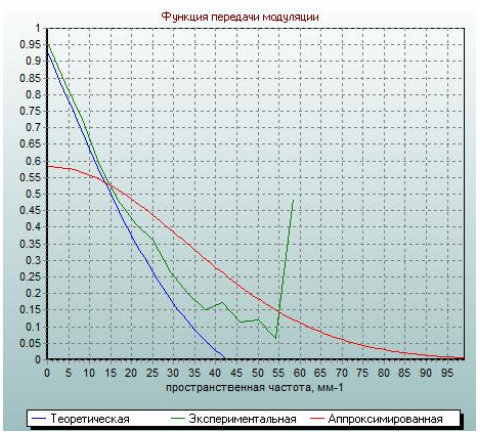
LC81810252016195 TIRS



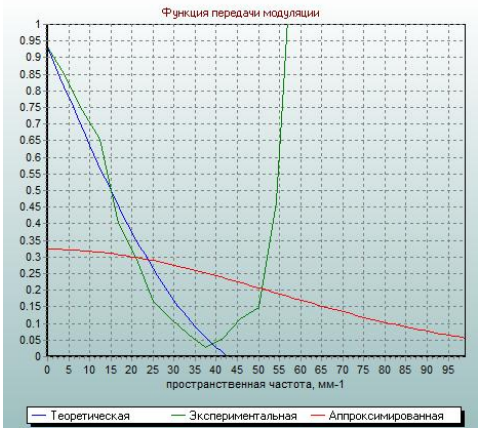
LC81810252016195 TIRS+OLI



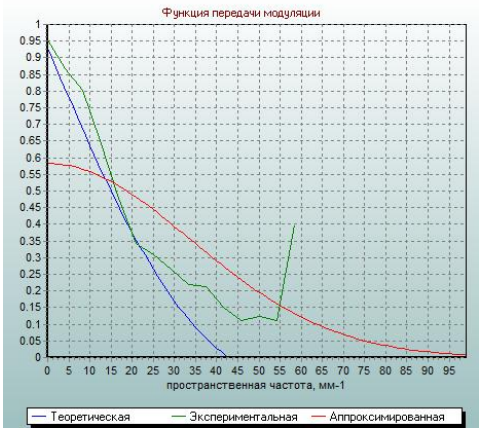
LC81810252016211 TIRS



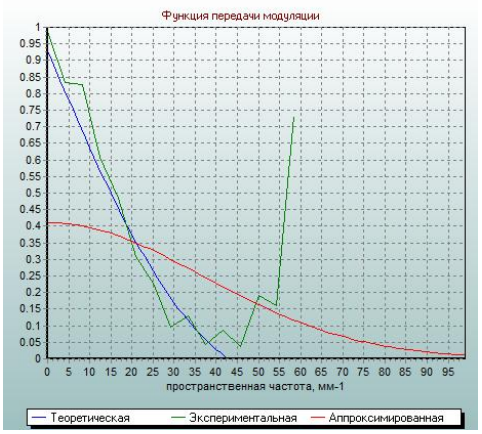
LC81810252016211 TIRS+OLI



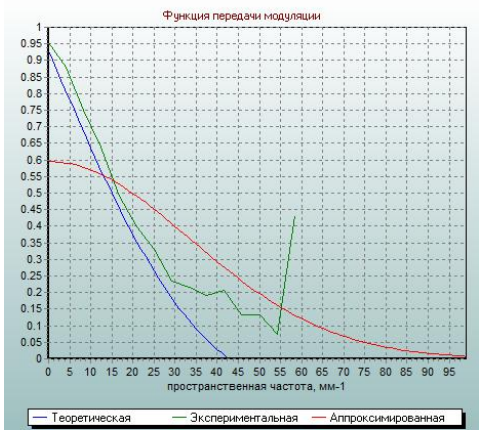
LC81820252015199 TIRS



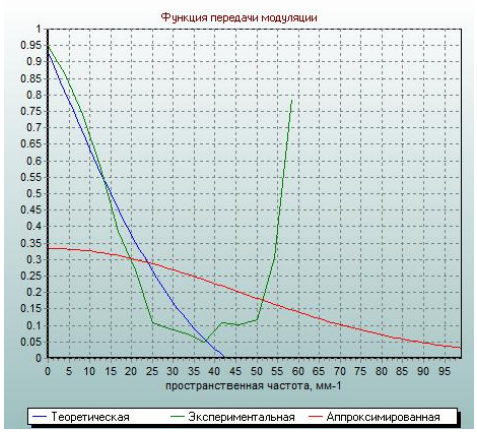
LC81820252015199 TIRS+OLI



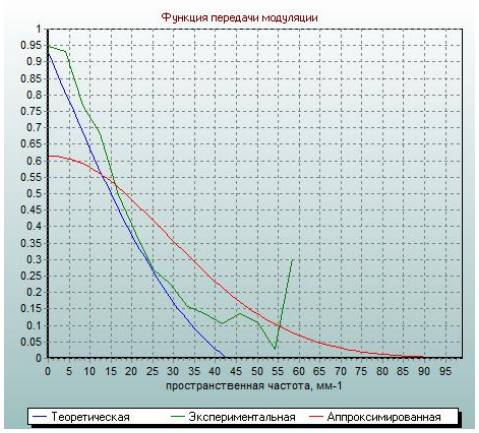
LC81820252015215 TIRS



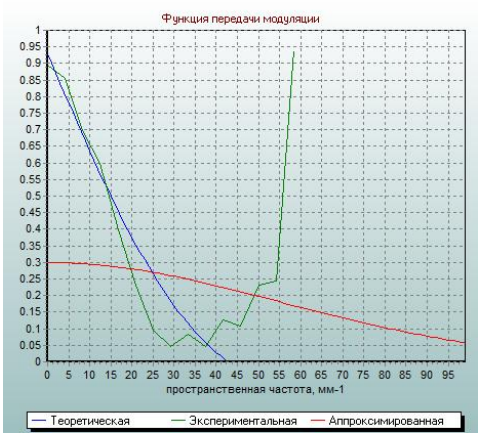
LC81820252015215 TIRS+OLI



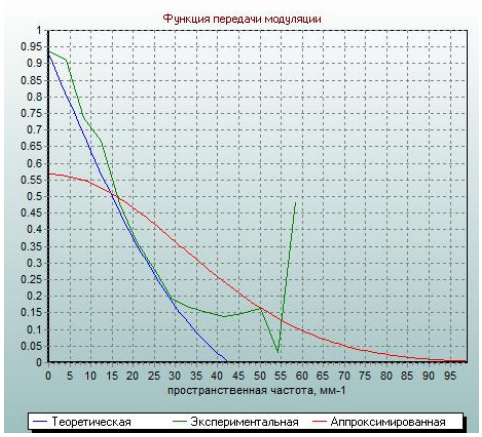
LC81780272015219 TIRS



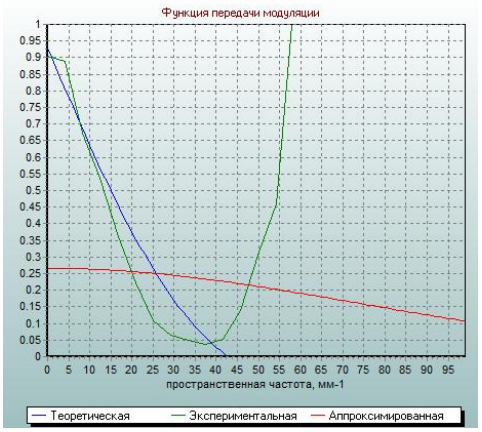
LC81780272015219 TIRS+OLI



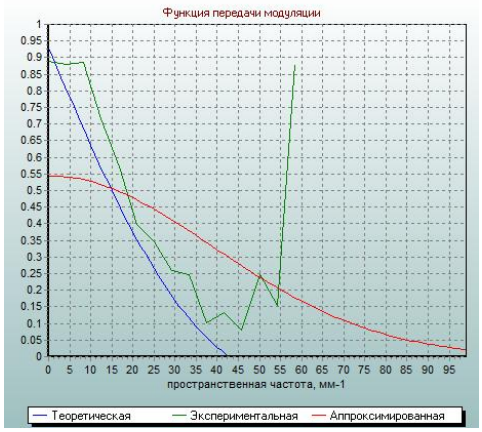
LC81780272015235 TIRS



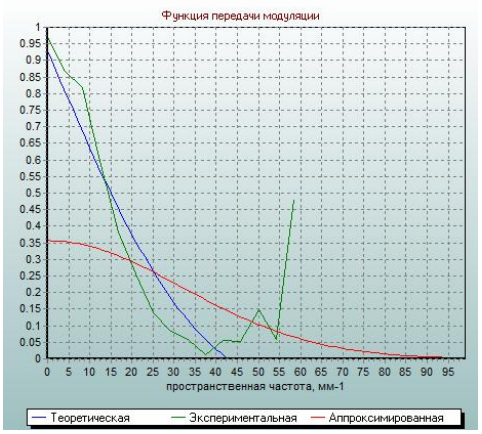
LC81780272015235 TIRS+OLI



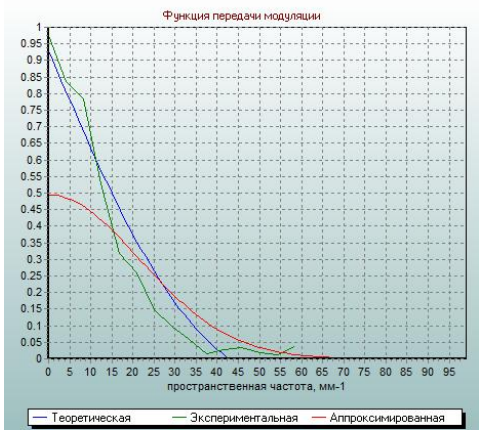
LC81790272016261 TIRS



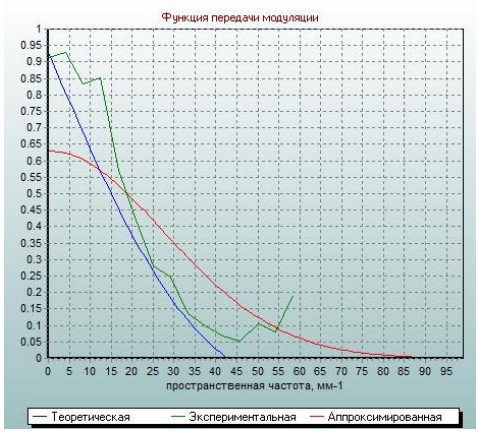
LC81790272016261 TIRS+OLI



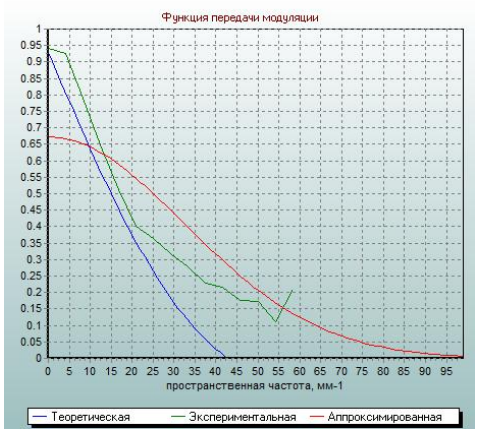
LC81790272016277 TIRS



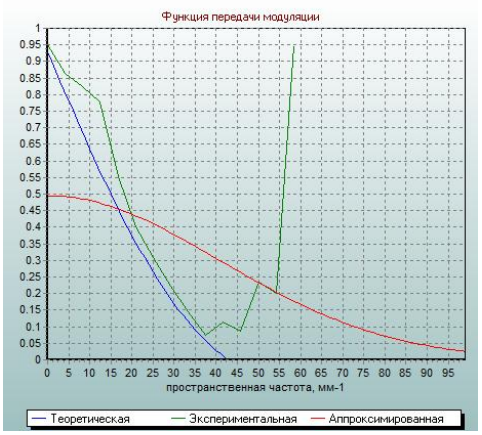
LC81790272016277 TIRS+OLI



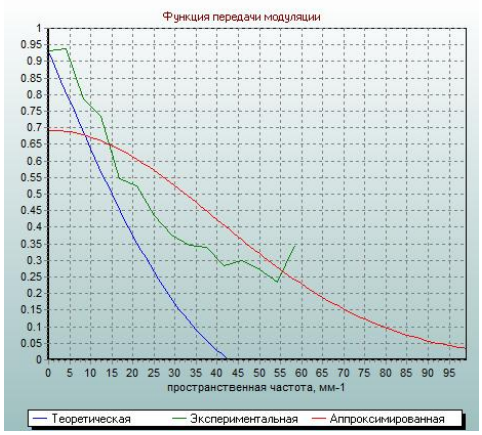
LC81940212015235 TIRS



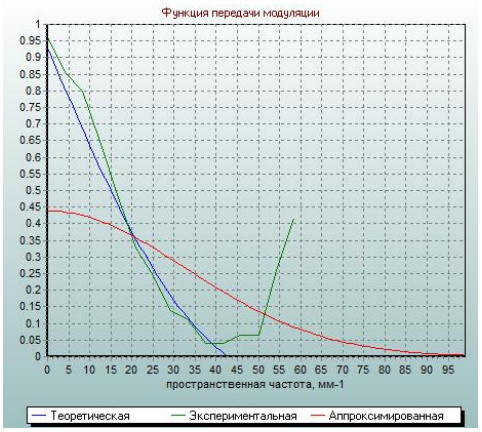
LC81940212015235 TIRS+OLI



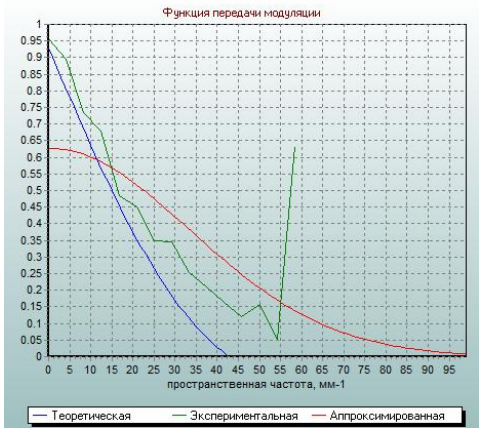
LC81940212015251 TIRS



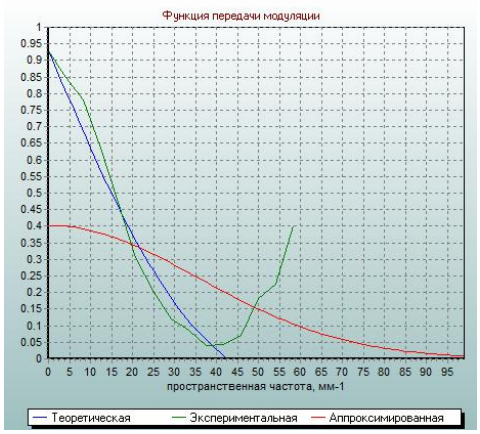
LC81940212015251 TIRS+OLI



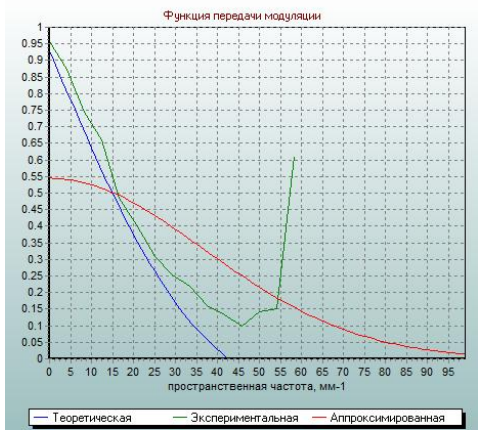
LC81850252015204 TIRS



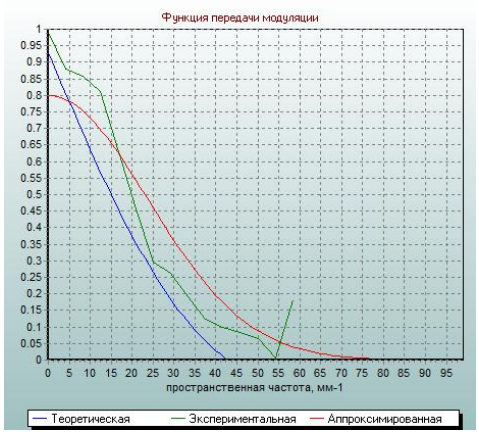
LC81850252015204 TIRS+OLI



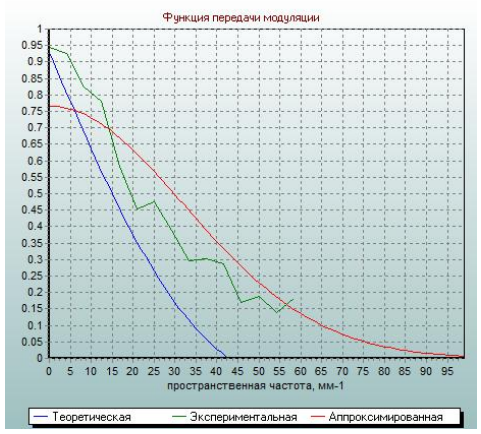
LC81850252015220 TIRS



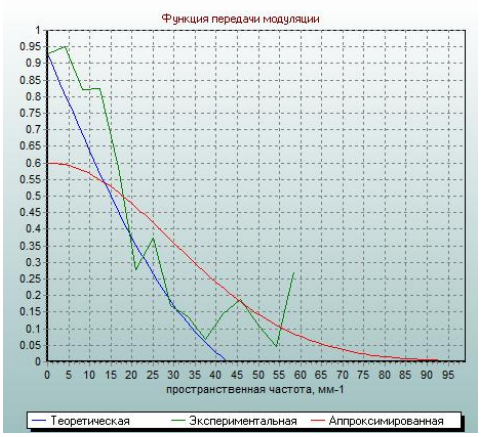
LC81850252015220 TIRS+OLI



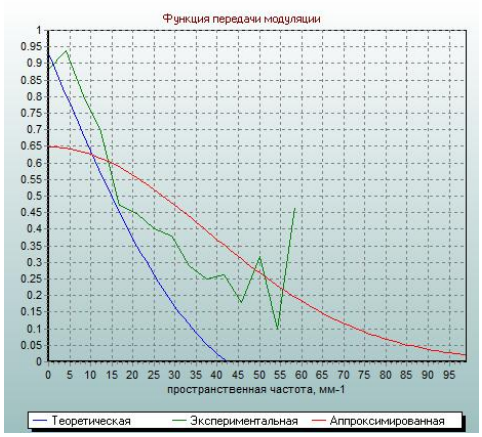
LC81860252015227 TIRS



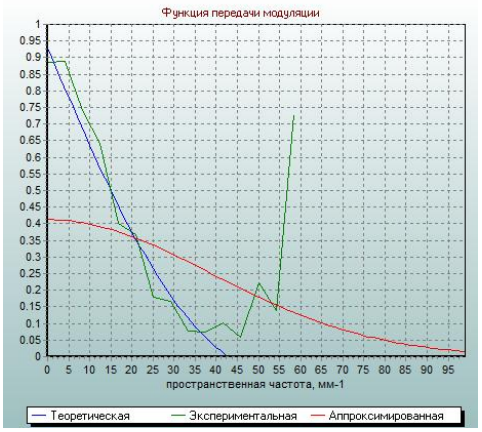
LC81860252015227 TIRS+OLI



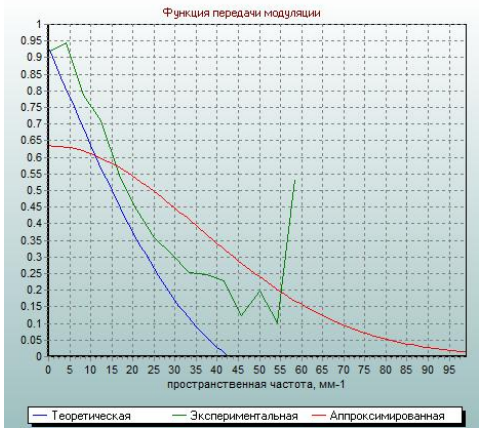
LC81860252015243 TIRS



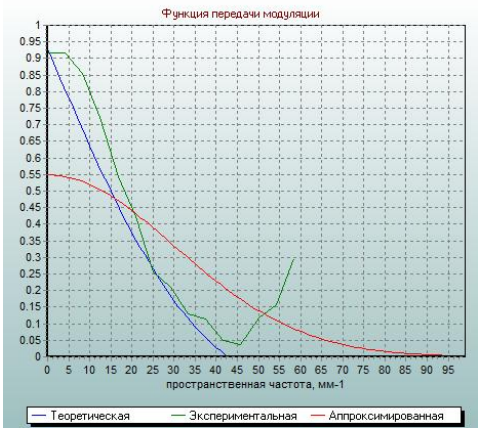
LC81860252015243 TIRS+OLI



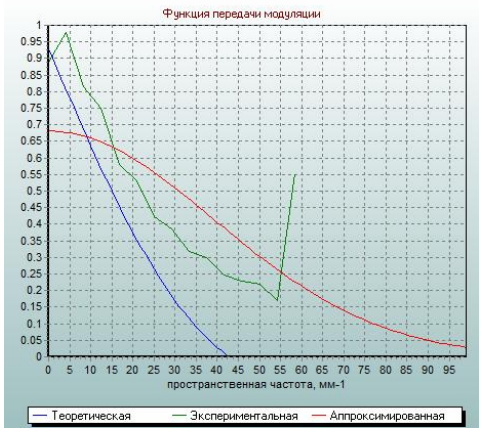
LC81800282016268 TIRS



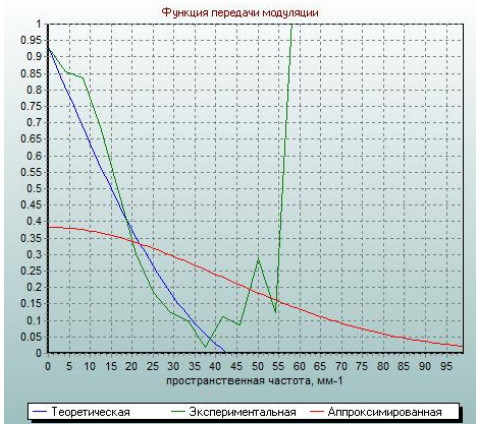
LC81800282016268 TIRS+OLI



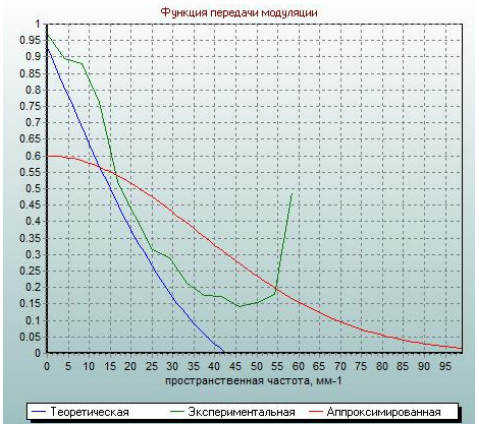
LC81800282016284 TIRS



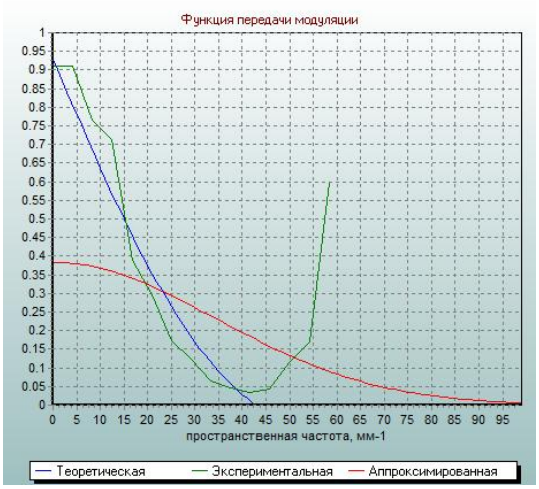
LC81800282016284 TIRS+OLI



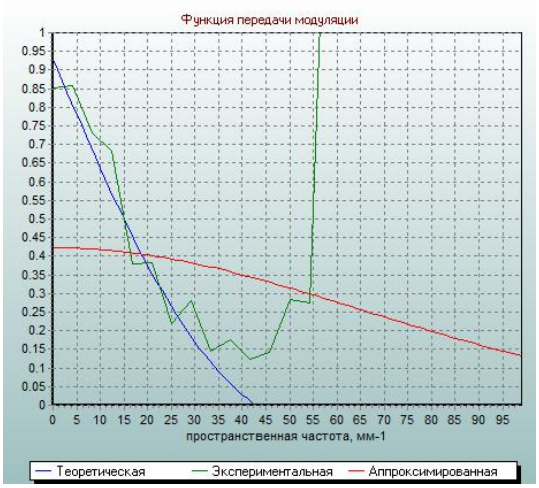
LC81910312016185 TIRS



LC81910312016185 TIRS+OLI



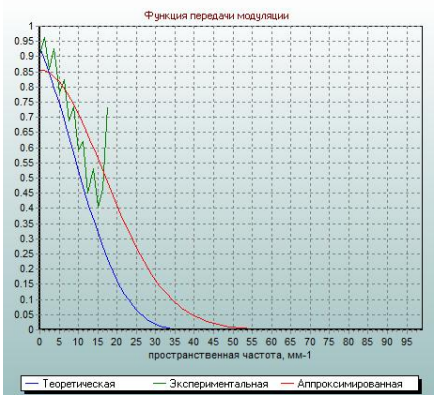
LC81910312016201 TIRS



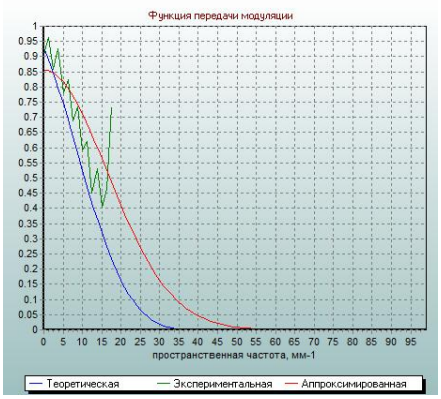
LC81910312016201 TIRS+OLI

Додаток Ж

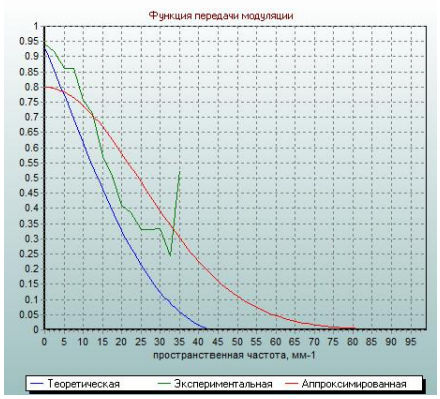
Порівняння ФПМ, отриманих на основі вхідних зображень розподілів коефіцієнтів теплового випромінювання та зображень підвищеної розрізненності



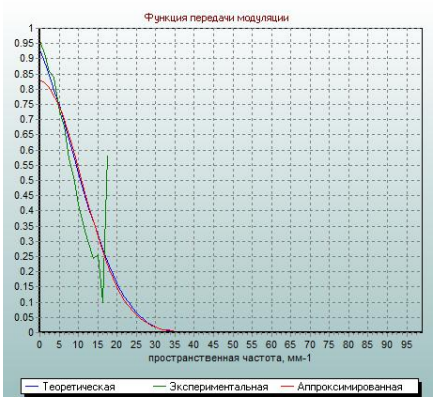
LC81600432016208



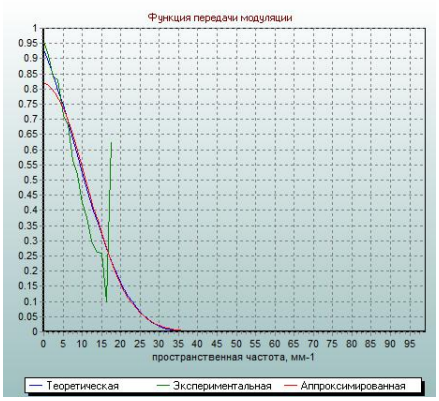
LC81600432016224



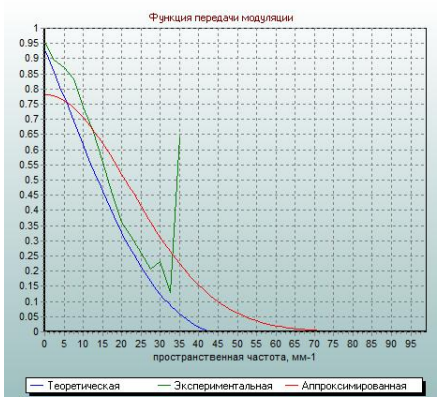
Enhanced



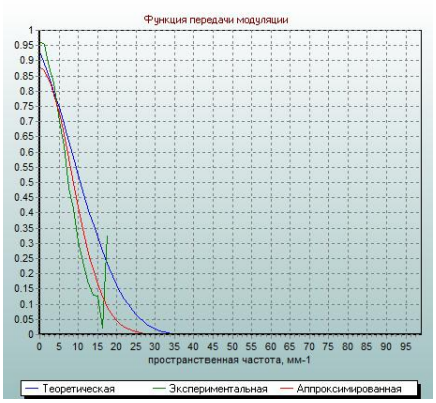
LC81770252014209



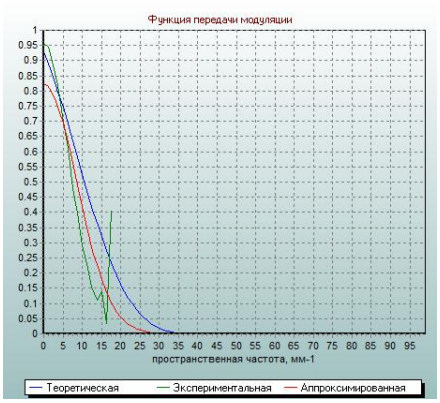
LC81770252014225



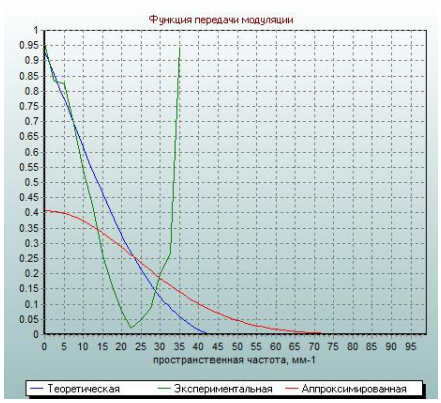
Enhanced



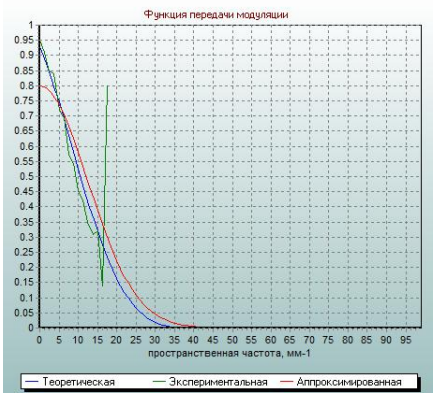
LC81770252015084



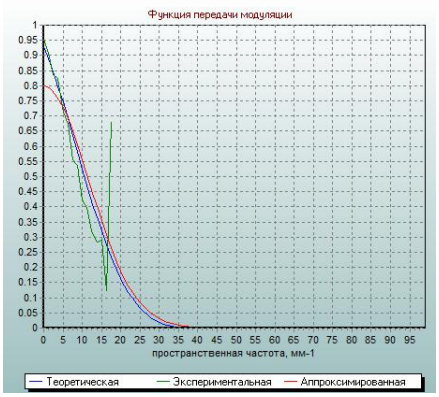
LC81770252015100



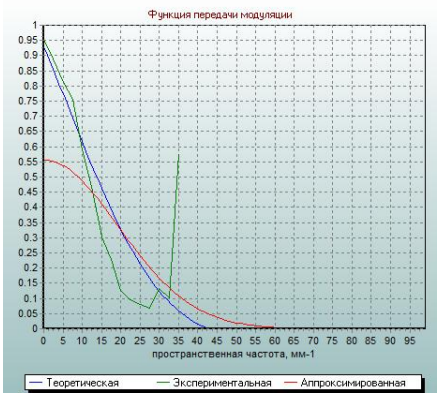
Enhanced



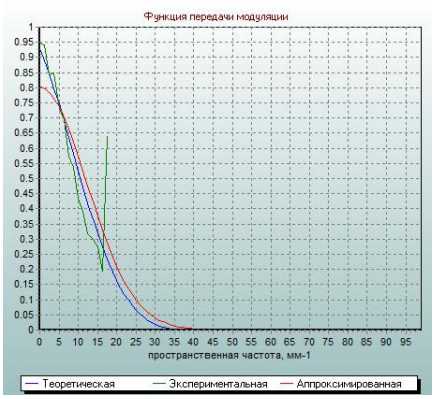
LC81810252016195



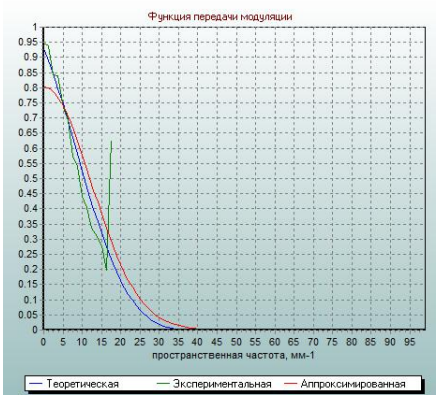
LC81810252016211



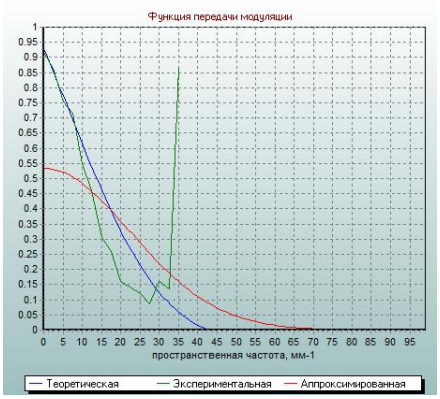
Enhanced



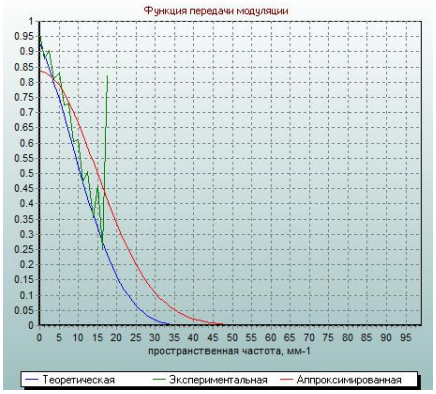
LC81820252015199



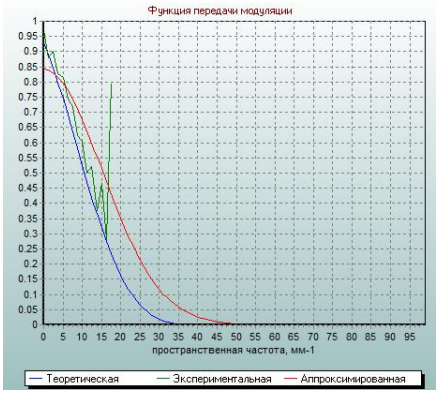
LC81820252015215



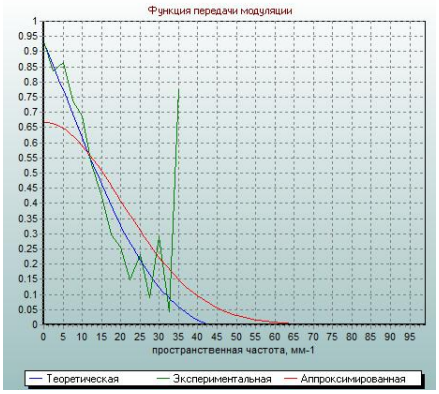
Enhanced



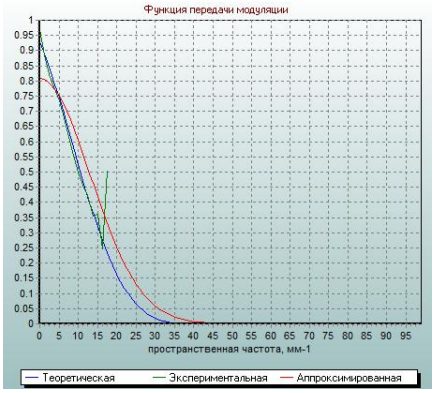
LC81780272015219



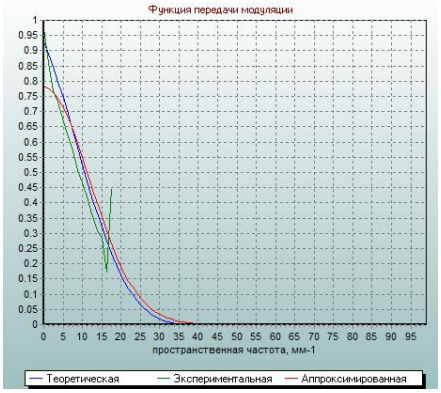
LC81780272015235



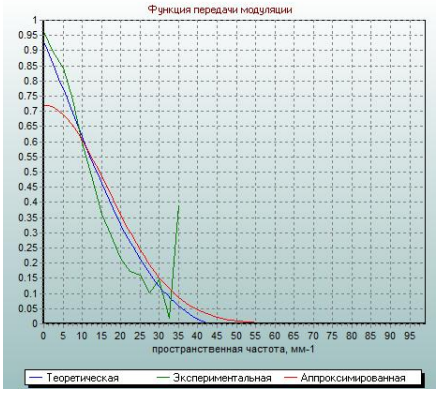
Enhanced



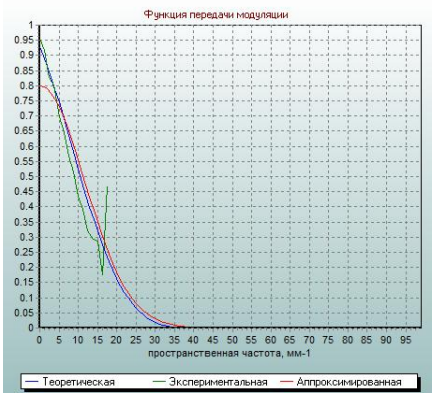
LC81790272016261



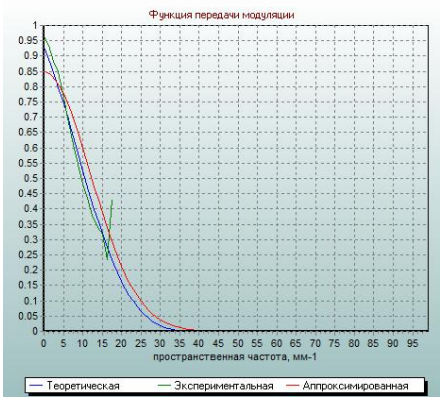
LC81790272016277



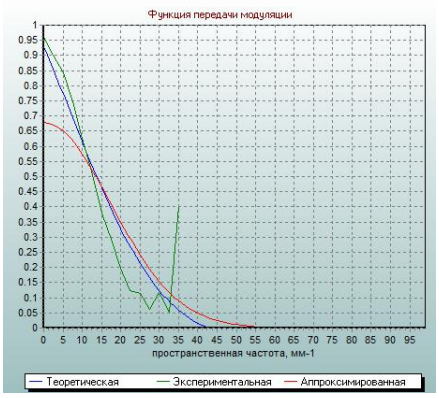
Enhanced



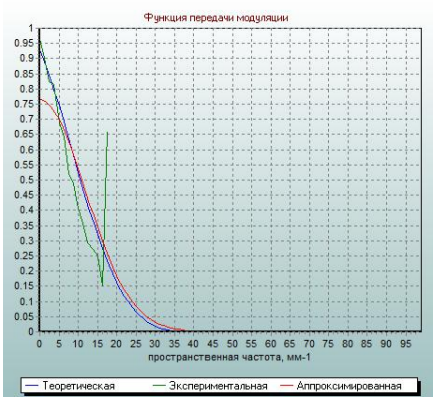
LC81940212015235



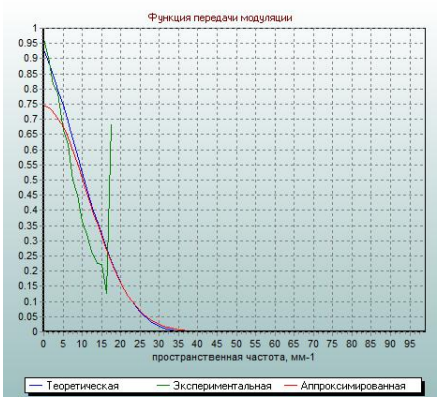
LC81940212015251



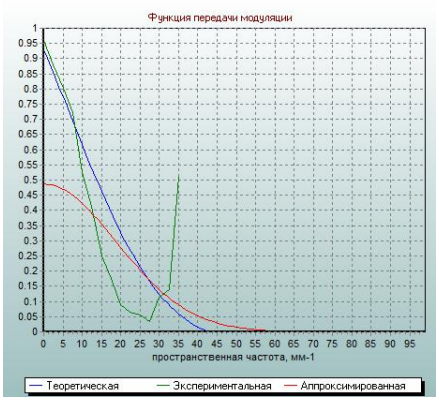
Enhanced



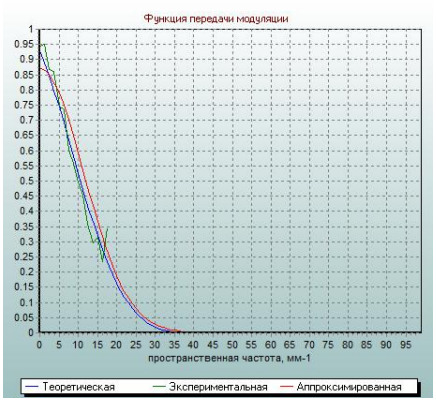
LC81850252015204



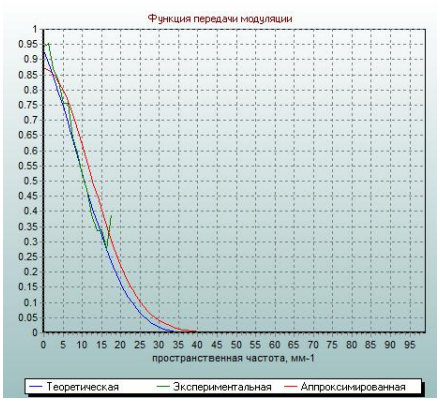
LC81850252015220



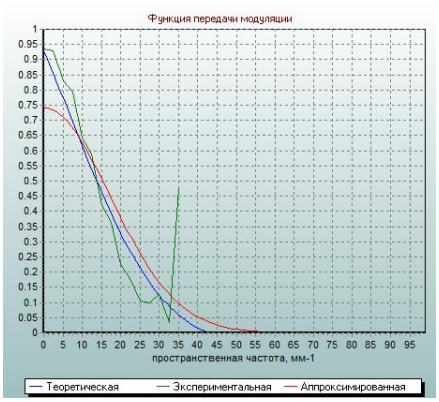
Enhanced



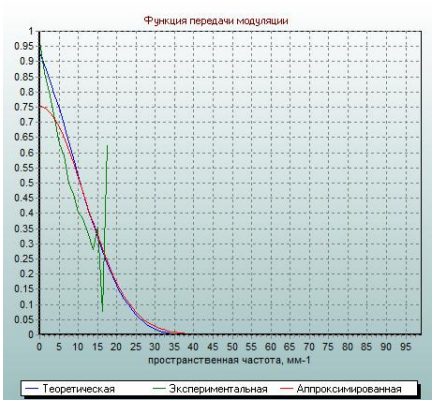
LC81860252015227



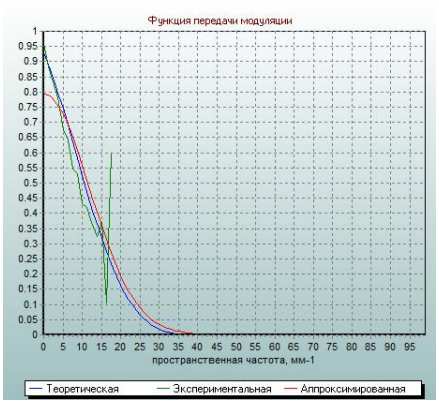
LC81860252015243



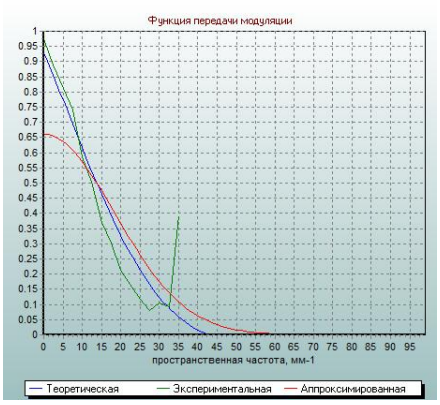
Enhanced



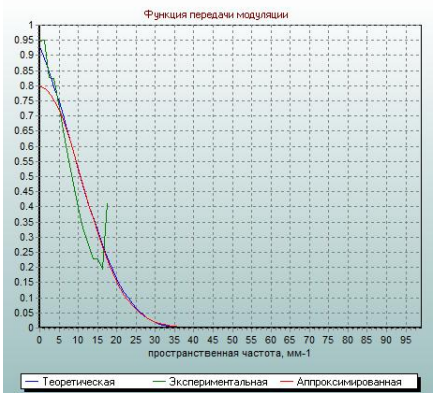
LC81800282016268



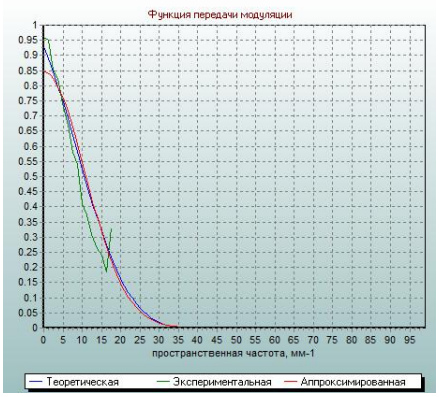
LC81800282016284



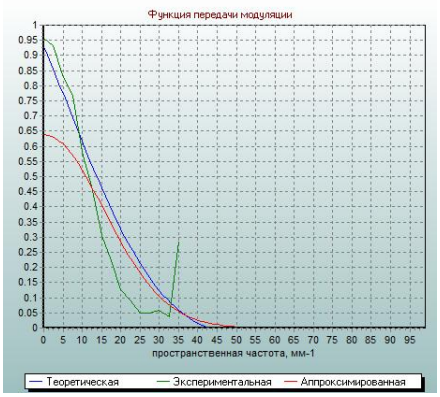
Enhanced



LC81910312016185



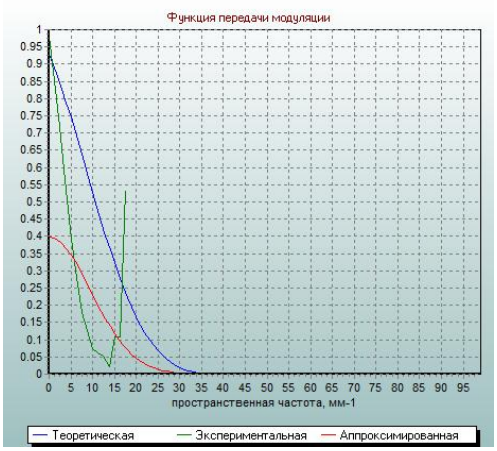
LC81910312016201



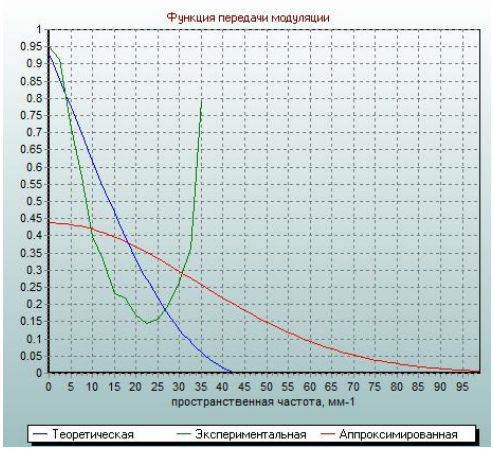
Enhanced

Додаток З

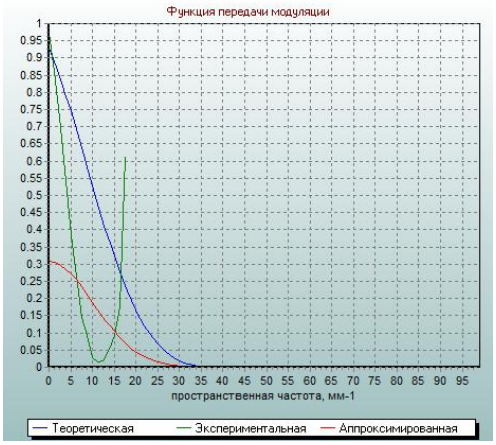
Порівняння ФПМ, отриманих на основі зображень теплового поля низької та підвищеної просторової розрізненності



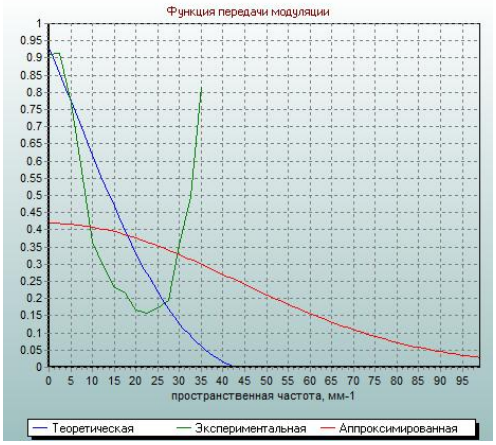
LC81600432016208 Low



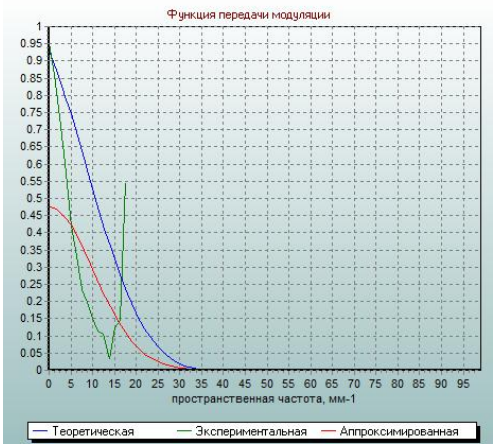
LC81600432016208 Enhanced



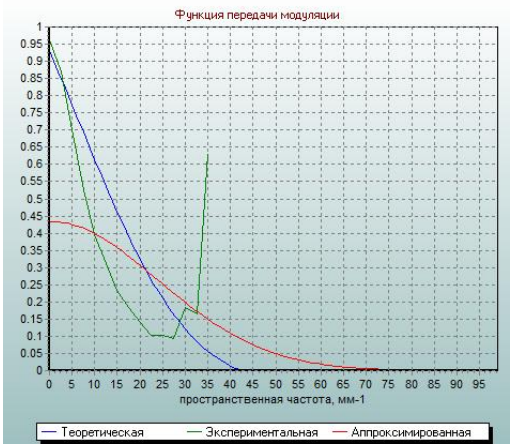
LC81600432016224 Low



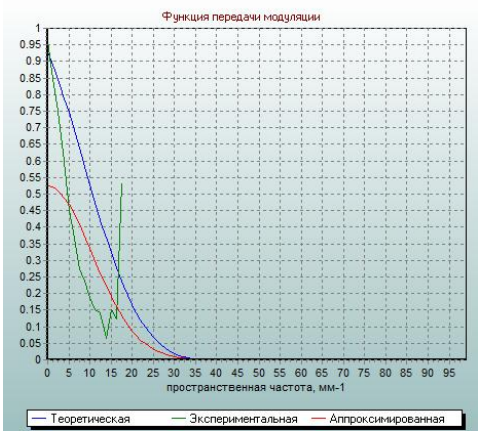
LC81600432016224 Enhanced



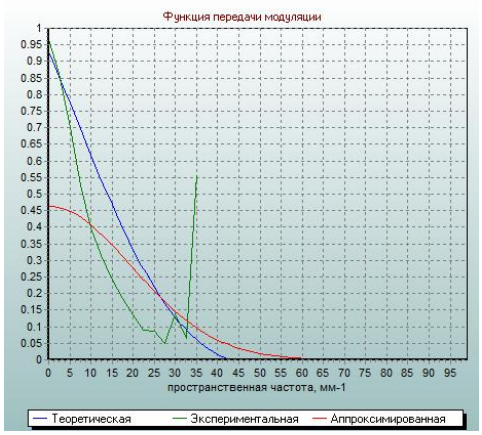
LC81770252014209 Low



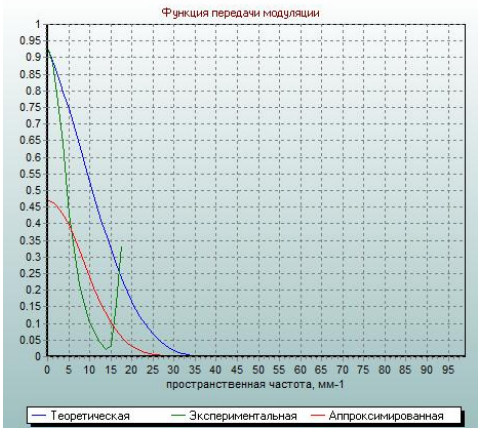
LC81770252014209 Enhanced



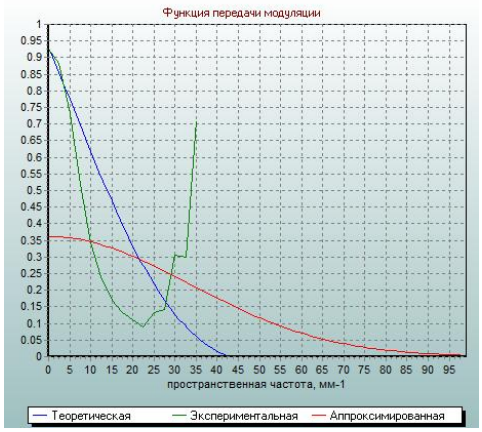
LC81770252014225 Low



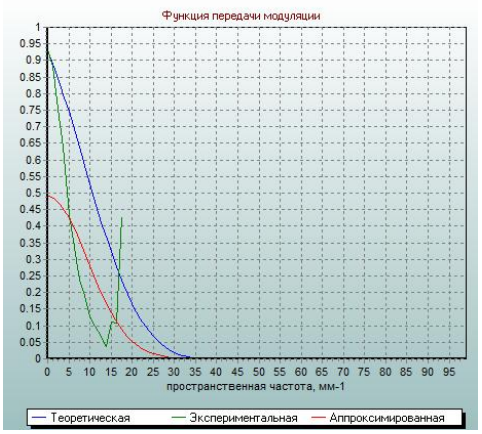
LC81770252014225 Enhanced



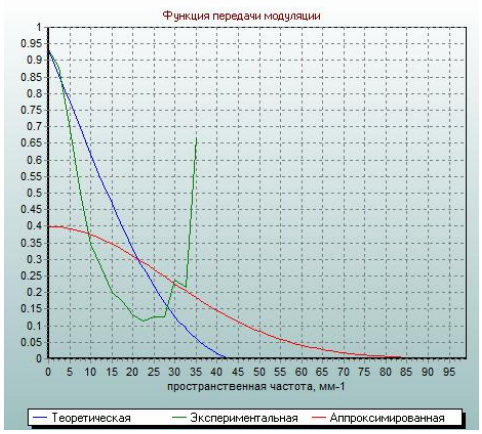
LC81770252015084 Low



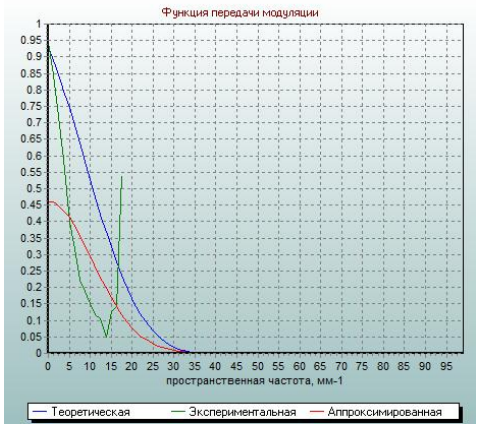
LC81770252015084 Enhanced



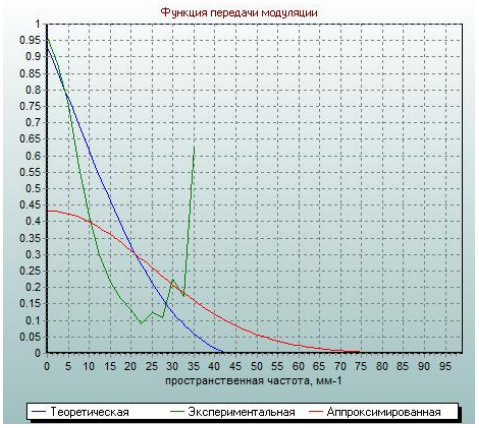
LC81770252015100 Low



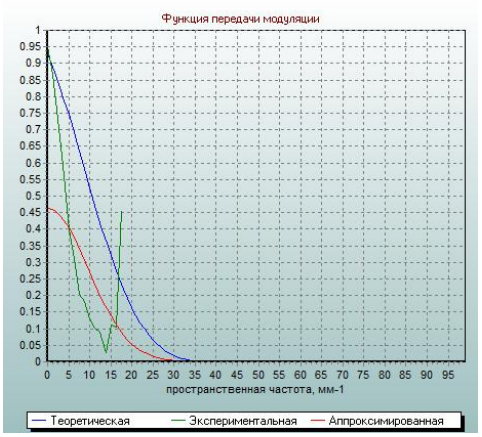
LC81770252015100 Enhanced



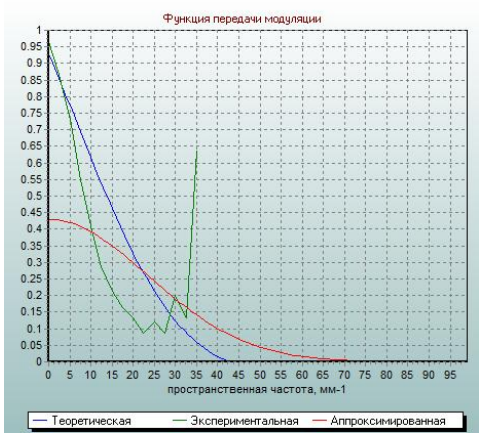
LC81810252016195 Low



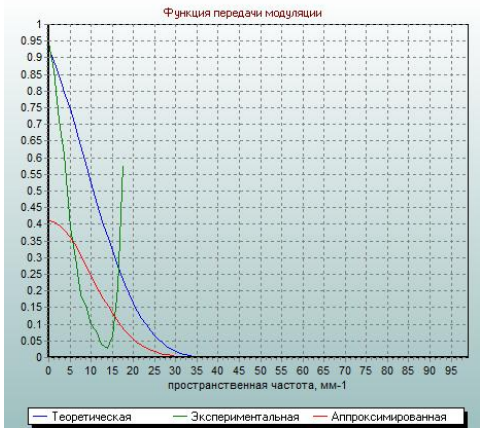
LC81810252016195 Enhanced



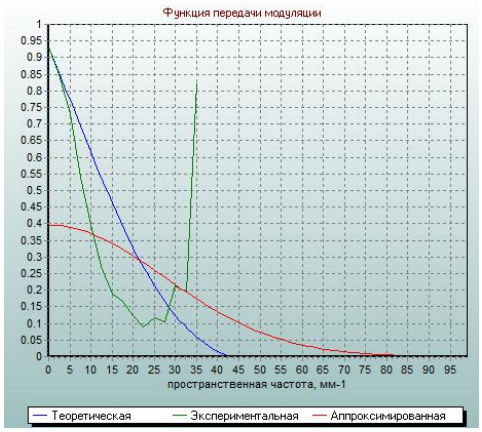
LC81810252016211 Low



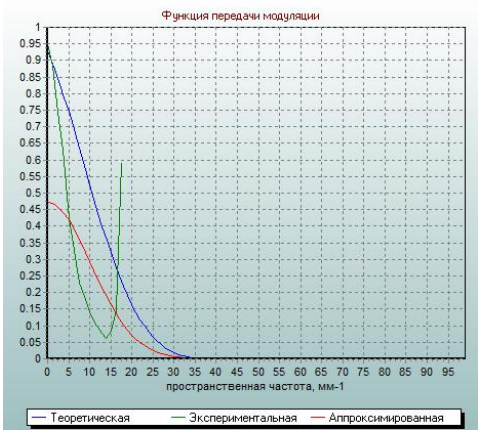
LC81810252016211 Enhanced



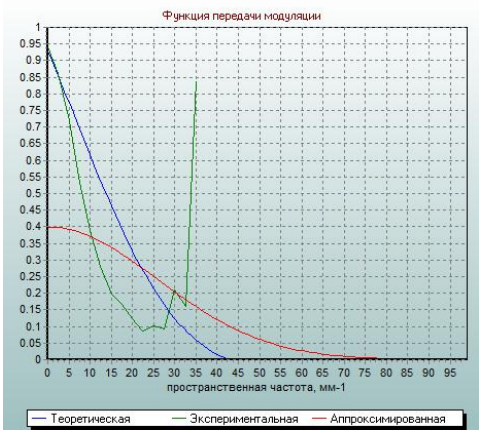
LC81820252015199 Low



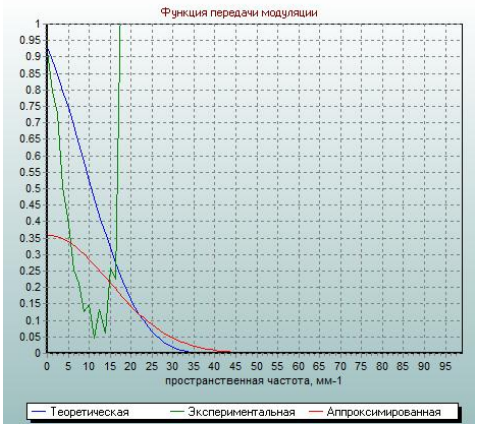
LC81820252015199 Enhanced



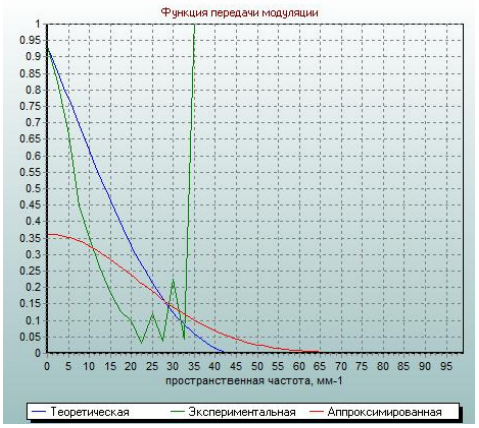
LC81820252015215 Low



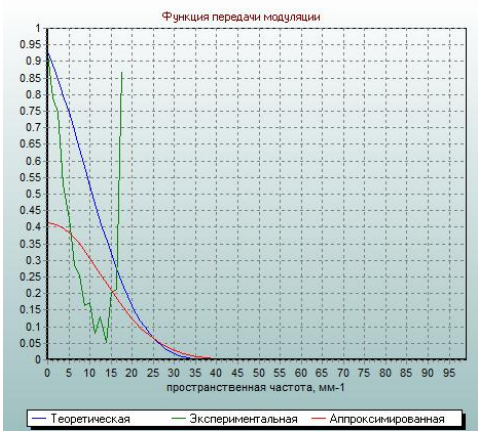
LC81820252015215 Enhanced



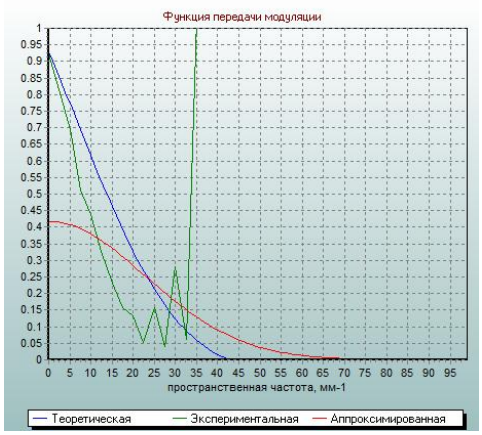
LC81780272015219 Low



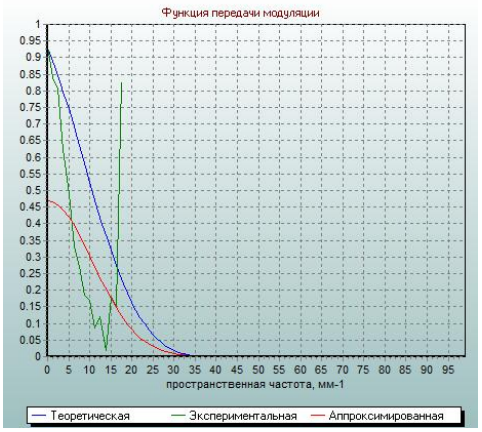
LC81780272015219 Enhanced



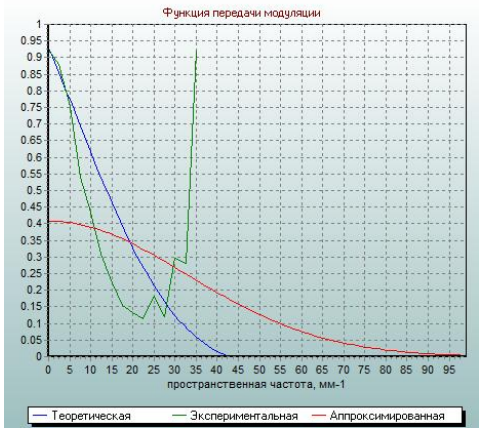
LC81780272015235 Low



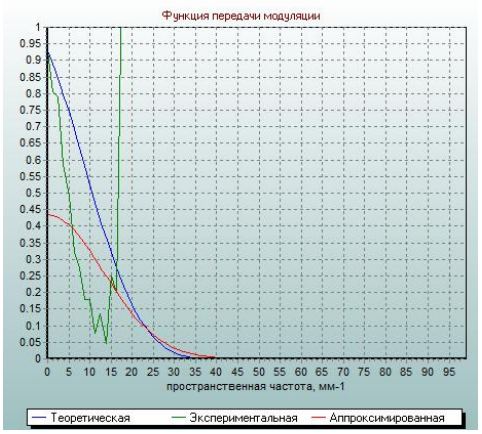
LC81780272015235 Enhanced



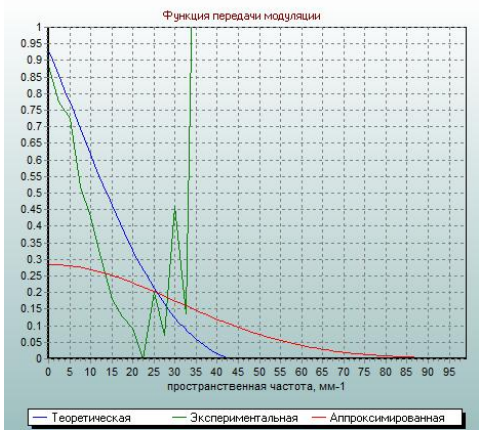
LC81790272016261 Low



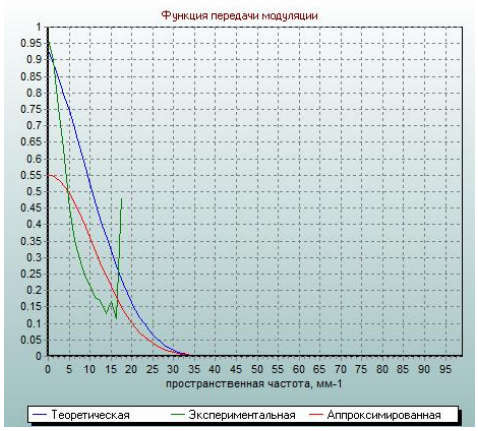
LC81790272016261 Enhanced



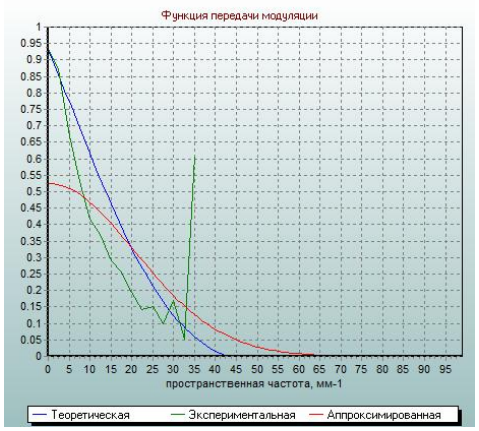
LC81790272016277 Low



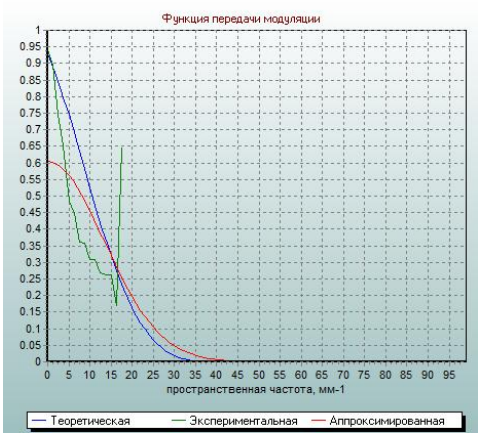
LC81790272016277 Enhanced



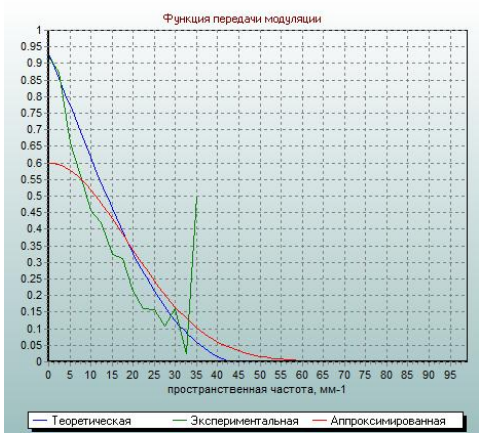
LC81940212015235 Low



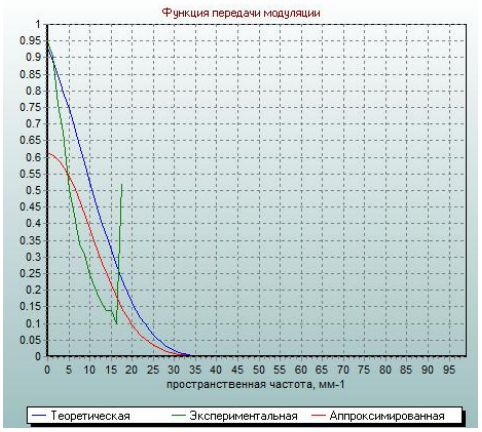
LC81940212015235 Enhanced



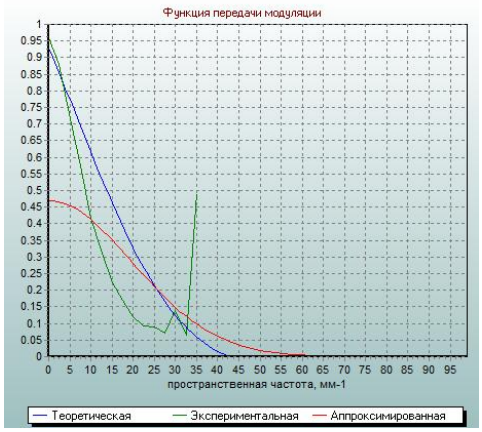
LC81940212015251 Low



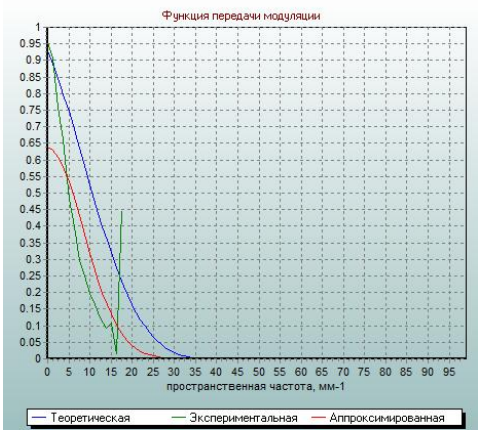
LC81940212015251 Enhanced



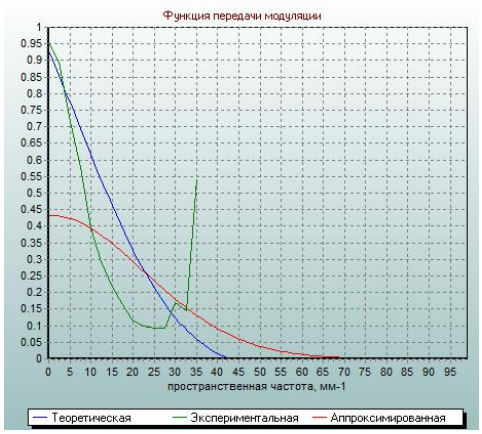
LC81850252015204 Low



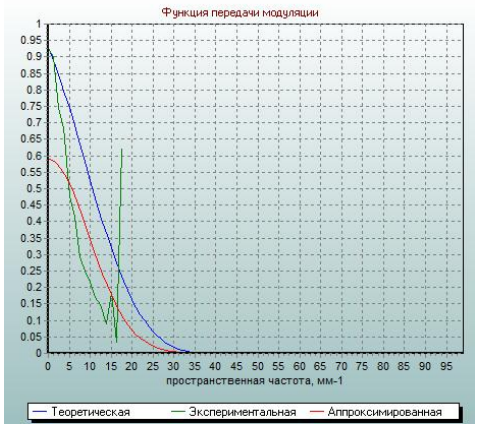
LC81850252015204 Enhanced



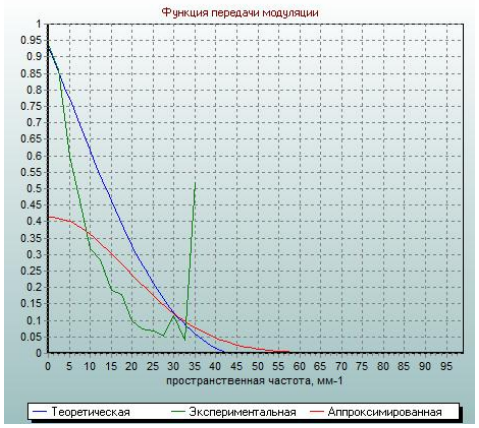
LC81850252015220 Low



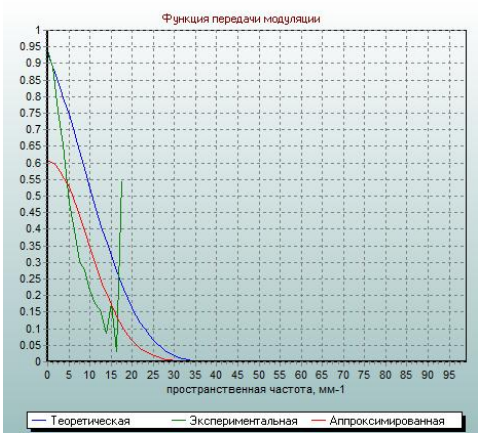
LC81850252015220 Enhanced



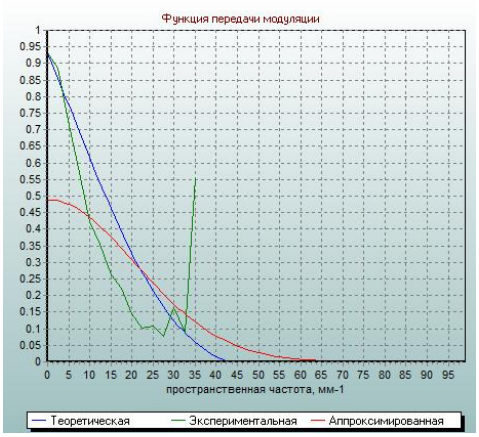
LC81860252015227 Low



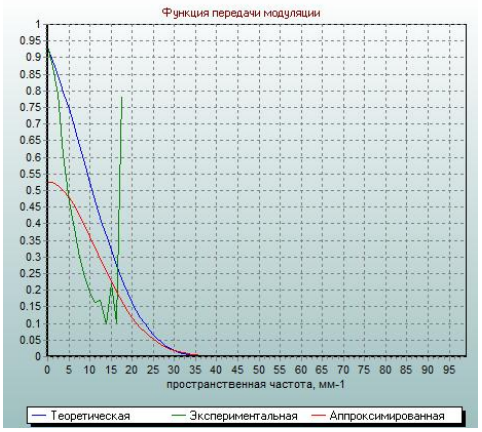
LC81860252015227 Enhanced



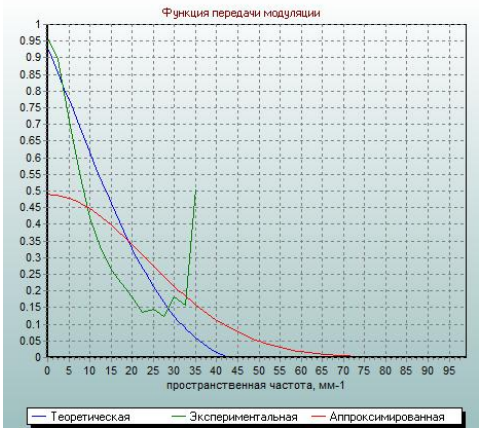
LC81860252015243 Low



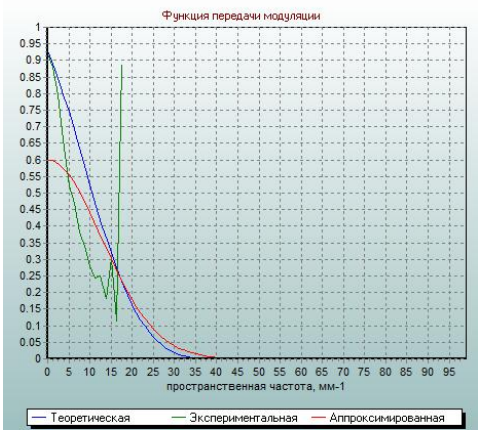
LC81860252015243 Enhanced



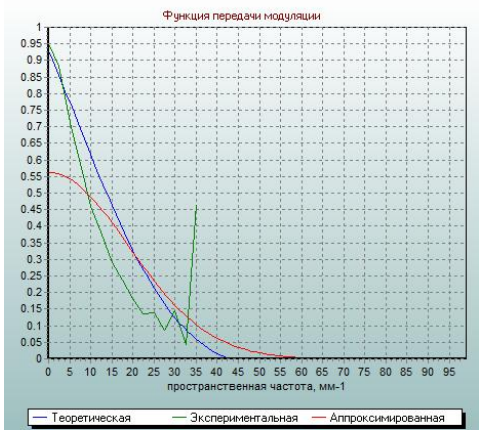
LC81800282016268 Low



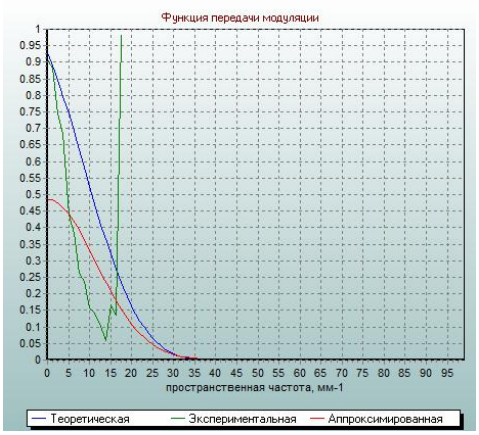
LC81800282016268 Enhanced



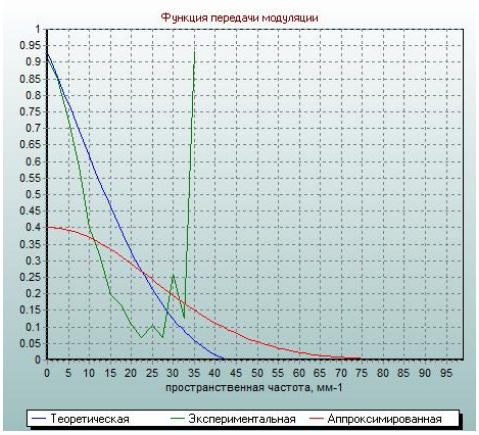
LC81800282016284 Low



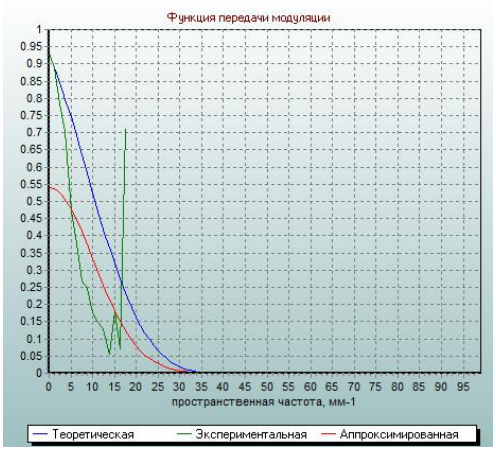
LC81800282016284 Enhanced



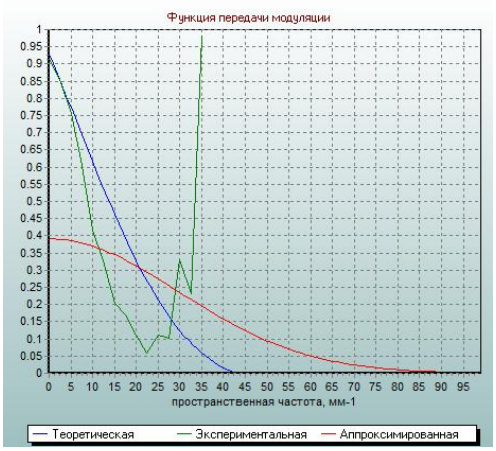
LC81910312016185 Low



LC81910312016185 Enhanced



LC81910312016201 Low



LC81910312016201 Enhanced