

# Інтелектуальний Моніторинг Температури на Основі Даних Тепловізійної Зйомки

Марія Талах  
кафедра комп'ютерних наук  
Чернівецький національний університет  
імені Юрія Федьковича  
Чернівці, Україна  
m.talah@chnu.edu.ua

Сергій Голуб  
кафедра інтелектуальних систем прийняття рішень  
Черкаський національний університет  
імені Богдана Хмельницького  
Черкаси, Україна  
fpkpk@ukr.net

## Intelligent Temperature Monitoring Based on Thermal Imaging Data

Marii Talakh  
Department of Computer Science  
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University  
Chernivtsi, Ukraine  
m.talah@chnu.edu.ua

Serhii Golub  
Department of intelligent decision support system  
Bogdan Khmelnytsky Cherkassy National University  
Cherkassy, Ukraine  
fpkpk@ukr.net

**Анотація**—Обґрунтовано застосування методики багаторівневого моніторингу для прогнозування температури на основі даних тепловізійної зйомки супутників та даних з метеостанцій. Отримана модель апробована для території Чернівецької та Івано-Франківської областей та дозволяє прогнозувати температуру на ділянках, де відсутні метеостанції, в середньому з точністю до 1 градуса Цельсія.

**Abstract**—The application of multilevel monitoring method for forecasting of temperature based on the data of thermal imagery of satellites and data from meteorological stations is substantiated. The obtained model is tested for the territory of Chernivtsi and Ivano-Frankivsk regions and allows to predict the temperature for the areas with sparse net of meteorological stations, on average, with an accuracy of 1 degree Celsius.

**Ключові слова**—моніторинг, тепловізійна зйомка, Landsat, МГУА, температура.

**Keywords**—monitoring, thermal imagery, Landsat, MSUA, temperature.

### I. Вступ

Величезне значення для науки і господарства має вивчення і передбачення погоди, яке можливе лише внаслідок систематичного довготривалого спостереження за нею. Температура, як один з основних кліматичних показників території використовується для аналізу змін клімату та створення кліматичних моделей різного рівня [1,6,11,12]. Усі зміни основних елементів

погоди фіксують на метеорологічних станціях [5]. Однак, за географічним положенням частина території України розташована в умовах складного рельєфу, зокрема гірських, що зумовлює відсутність метеостанцій на цих ділянках. Крім того, більшість наявних метеорологічних станцій знаходяться в урбанізованому середовищі, що спотворює отримувані дані [7]. Одним з варіантів підвищення їх достовірності є поєднання даних з метеостанцій та даних отриманих з використанням інших методів. Зокрема, одним з найбільш сучасних та широковживаних, наразі, є дистанційне зондування. Такий синтез дозволить отримувати температурні дані для кожної точки поверхні (точність буде визначатись лише дозвільною здатністю космоснімків), що є особливо актуальним для територій, де відсутні метеостанції. Для України це, насамперед, Карпатський регіон. Однак, частота проведення космозйомки не є регулярною, та загалом значно поступається частоті отримання даних з метеостанцій. Таким чином, використання космоснімків дозволяє врахувати просторову складову моніторингу, а дані з метеостанцій – часову, а їх поєднання дозволить створити комплексну систему моніторингу температурних показників певної території.

### II. МЕТОДИКА ОТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ З КОСМОЗНІМКІВ

Для визначення температури на основі космоснімків найчастіше обирають знімки з космічних супутників Landsat-4, -5, -7 та -8. Вибір супутників обумовлений

наявністю в знімальній апаратурі так званого теплового каналу (діапазон електромагнітних хвиль 10,4–12,5 мкм) та даних з цих супутників, які отримували за довгий період часу. Дані з супутників серії Landsat представлені з 1982 р. Для досліджень найчастіше відбирають знімки з супутників серії Landsat за 1984–2017 р. Ще однією перевагою супутників серії Landsat є те, що дані з цих супутників є безкоштовними і знаходяться у вільному доступі та мають при цьому середню дозвільну здатність (30 м в 1 пікселі)[2].

Починаючи із супутників Landsat-4, -5 у тепловому каналі 6 або в каналах 6.1 й 6.2 для супутника Landsat-7 та -8 можна отримати цифрові значення (DN – digitalnumber), які не мають фізичної розмірності. З метою отримання значень температури за космічними даними, необхідно перевести дані теплових каналів у значення температури. Всі додаткові параметри автоматично отримуються з файлу метаданих, який поставляється разом з супутниковим знімком.

Для супутників серії Landsat такий перерахунок виконується з використанням формул:

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max_{\lambda}} - L_{\min_{\lambda}}}{Q_{cal_{\max}} - Q_{cal_{\min}}} \right) (Q_{cal} - Q_{cal_{\min}}) + L_{\min_{\lambda}} \quad (1)$$

$L_{\lambda}$  – спектральна густина енергетичної світності на апертурі сенсора (енергетична світність на супутнику), тобто потужність потоку енергії (Watt) на м<sup>2</sup> земної поверхні на один стерadian (тривимірний кут від точки на земній поверхні до сенсора) на одиницю довжини хвилі (мікрметри);  $Q_{cal}$  – дискретизовані та калібровані значення пікселів стандартного продукту [DN];  $Q_{cal_{\min}}$  – мінімальне дискретизоване каліброване значення пікселя, що відповідає  $L_{\min_{\lambda}}$ [DN];  $Q_{cal_{\max}}$  – максимальне дискретизоване каліброване значення пікселя, що відповідає [DN];  $L_{\min_{\lambda}}$  – максимальна спектральна світність градації сірого на сенсорі;  $L_{\max_{\lambda}}$  – мінімальна спектральна світність градації сірого.

Для конвертації даних Landsat 8 застосовується вираз:

$$L_{\lambda} = M_L Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

$L_{\lambda}$  – спектральна густина енергетичної світності на поверхні атмосфери (TOARadiance);  $M_L$  – коефіцієнт перемасштабовування;  $Q_{cal}$  – дискретизоване каліброване значення пікселя [DN];  $A_L$  – адитивний коефіцієнт перемасштабовування.

Наступним кроком є перерахунок отриманих результатів в абсолютні безрозмірні значення відбиття [11].

Для термальних каналів Landsat перерахунок DN в яскравісну температуру на супутнику відбувається за наступною формулою:

$$T_K = \frac{K_2}{\ln(K_1 / L_{\lambda} + 1)} \quad (3)$$

$T_K$  – яскравісна температура на супутнику [Кельвін];  $K_1$  – залежна від каналу стала термального перерахунку;  $K_2$  – залежна від каналу стала термального перерахунку

[K];  $L_{\lambda}$  – спектральна густина енергетичної світності на апертурі сенсора.

Для зручності отриманий результат переводили в градуси:

$$T_C = T_K - 273,15 \quad (4)$$

$T_C$  – яскравісна температура на супутнику, С°;  $T_K$  – яскравісна температура на супутнику, К[4].

### III. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Незважаючи на достатньо велику кількість програмного забезпечення для роботи з космознімками, та задоволення великої кількості потреб користувачів в сфері ДЗЗ, важко не звернути увагу на головні мінуси програмного забезпечення.

Недоліками більшості наявного ПЗ для роботи з космознімками є достатньо складний користувацький інтерфейс, високі вимоги до апаратного забезпечення ПК, а також неможливість автоматичної роботи з серією космознімків та збереження результатів роботи у базу даних, що слугуватиме МБД для подальшого аналізу.

За таких умов дослідникам потрібна система, що здатна здійснювати автоматизоване отримання та обробку температурних даних з централізованих інформаційних ресурсів і забезпечувати достатньо широкий набір методів для аналізу даних. Для початку роботи в системі користувачу необхідно обрати період та території проведення досліджень. В межах створеної системи для отримання даних використовувався інфрачервоний канал супутника Landsat [2]. Кожний окремий знімок є растровим зображенням, де кожному пікселю відповідає атрибутивне значення, яке з використанням описаної вище методики може бути переведено в показники температури поверхні. Крім атрибутивних значень кожен піксель володіє і географічними координатами, аналізуючи послідовно кожен піксель система відправляє запити на погодні сервери [8,9], які містять дані з показниками температури за необхідний період часу (який співпадає з періодом за який аналізуються космознімки) а також координати метеостанцій. У випадку наявності на досліджуваній території метеостанцій відбувається автоматичне завантаження зазначених даних. Для дослідження може бути обрана будь-яка територія чи період часу (обмеження обумовлюються виключно наявністю даних на централізованих інформаційних ресурсах). Наразі, система працює таким чином, що дані з метеостанцій беруться лише за ті дні, для яких доступні космознімки, водночас, з даних, що отримуються на основі космознімків видаляються значення пікселів, для яких не встановлена наявність метеостанцій. Після того як системою сформовано масив даних, він записується у базу даних та відбувається автоматичне застосування алгоритмів синтезу моделей в рамках технології багаторівневого моніторингу [3].

#### IV. РЕЗУЛЬТАТИ

Нами була проведена апробація роботи системи для території Чернівецької та Івано-Франківської областей. Зокрема, для аналізу було взято серію космознімків з 2000 до 2017 року включно. Для зіставлення даних отриманих з супуника та на основі космознімків було обрано 4 метеостанції: м. Коломия, смт. Селятин, м. Вижниця та м. Чернівці. База первинних даних містила 205 значень, що характеризували кожен з точок в різні дати за досліджуваних період.

Попередній аналіз МВД свідчить, що графіки ходу температур отримані обома методами практично ідентичні, що дозволяє говорити про доцільність використання даного підходу в подальшому. Однак, абсолютні значення в конкретних точках відрізняються, що може залежати від багатьох факторів. Зокрема, хмарності, яка була врахована в моделі. А також від типу підстилаючої поверхні, що впливає на температуру визначену за знімком, в той час як на метеостанціях показники температури знімають на рівні 2,6 м над поверхнею землі.

Врахування цих розбіжностей можливе за рахунок попередньої класифікації космознімків зі співставленням спектральних та тематичних класів та введенням поправочних коефіцієнтів для кожного з них. Однак, такий підхід не буде універсальним, оскільки при зміні території досліджень всю процедуру треба буде починати з нуля.

В якості більш універсального підходу для вирішення задачі прогнозування температури на основі аналізованих даних запропоновано використовувати методи індуктивного моделювання. Зокрема, при випробування алгоритмів синтезу моделей найкращі показники були отримані з використанням багаторядного алгоритму МГУА.

В результаті моделювання синтезатором моніторингової інтелектуальної системи було побудовано 4 моделі (для кожної з досліджуваних точок). Масив даних для навчання моделей містив одну залежну змінну (Y), в якості якої використовували результати зйомок з конкретної точки. X-ами виступали метеорологічні дані з усіх решта точок. Методані про точку моделювання при побудові моделі не використовувались, а були застосовані для оцінки якості прогнозу температури. При цьому, моделі випробувались на даних, які не приймали участі у створенні моделі, таким чином отримані результати свідчать про характеристики стійкості моделі.

В якості способу зупинки генерації рядів селекції використовували критерій точності ряду селекції, при цьому, в якості останнього застосовували абсолютну похибку найточнішого полінома ряду. Кількість поліномів, що виступали входами для кожного наступного ряду селекції дорівнювала рівна кількості початкових змінних. Базовий поліном при створенні моделей – квадратичний. Вагові коефіцієнти розраховувались як відношення частинної похідної моделі по окремій змінній до суми частинних похідних цієї моделі до всіх змінних.

Отриманий результат дозволяє прогнозувати температуру на ділянках, де відсутні метеостанції, в середньому з точністю до 1 градусу. Результати тестування створених моделей наведені в таблиці I. Найменша абсолютна похибка вимірювань зафіксована для Вижниці, що може бути пов'язано насамперед з близькістю до неї інших двох дослідних точок Селятина і Коломиї, (42км та 33км відповідно), адже у випадку роботи з простороворозподіленими даними точність моделювання спадає з віддаленням від опорних точок.

ТАБЛИЦЯ I. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ

Селятин			Коломия			Вижниця			Чернівці		
Селятин, знімок, град.С	Модель, град.С	Похибка абсолютна, град.С	Селятин, знімок, град.С	Модель, град.С	Похибка абсолютна, град.С	Селятин, знімок, град.С	Модель, град.С	Похибка абсолютна, град.С	Селятин, знімок, град.С	Модель, град.С	Похибка абсолютна, град.С
13	12,36	0,6	15,00	15,53	0,53	15,00	15,80	0,8	20,00	16,63	3,4
18	16,83	1,2	21,00	15,41	5,59	21,00	21,13	0,1	18,00	21,57	3,6
9	8,90	0,1	11,00	10,89	0,11	11,00	11,91	0,9	12,00	12,94	0,9
-1	0,61	1,6	2,00	2,27	0,27	2,00	3,77	1,8	3,00	4,78	1,8
-1	2,65	3,7	4,00	4,35	0,35	4,00	4,78	0,8	5,00	6,00	1,0
-1	1,87	2,9	3,00	3,61	0,61	3,00	3,41	0,4	5,00	4,60	0,4
1	0,84	0,2	3,00	3,09	0,09	3,00	4,34	1,3	6,00	5,61	0,4
15	17,58	2,6	19,00	20,47	1,47	19,00	19,08	0,1	21,00	20,05	0,9
10	9,65	0,4	13,00	11,38	1,62	13,00	13,89	0,9	15,00	14,58	0,4
12	11,56	0,4	16,00	14,13	1,87	16,00	15,74	0,3	17,00	16,84	0,2
Середня похибка		1,36			1,25			0,74			1,30

Загальні характеристики отриманих моделей наведено в таблиці II. В загальному, отримані

значення вагових коефіцієнтів можна пояснити насамперед відстанню між досліджуваними точками

та на основі порівняння їх абсолютних висот. Так, на спрогнозоване значення температури в Селятині, отриманої на основі космознімку найбільший вплив має значення температури Вижницької метеостанції, яка знаходиться найближче, серед усіх досліджуваних точок (42 км). В той же час, для спрогнозованого значення температури за космознічком для Коломиї найбільшу вагу має температура метеостанції Чернівецького аеропорту, що може бути пов'язано з зі значно меншим перепадом абсолютних висот для цих двох точок (48м), тоді як перепад висот з Селятином становить 561м. Таким чином, для підвищення точності моделювання слід обирати більшу кількість дослідних точок, які при цьому повинні представляти різні фізико-географічні умови.

ТАБЛИЦЯ II. РЕЗУЛЬТАТИ ТЕСТУВАННЯ МОДЕЛЕЙ

смт. Селятин		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Коломия, метео, С°	15,38%	Спадає
Вижниця, метео, С°	61,03%	Зростає
Чернівці, метео, С°	22,91%	Зростає
Хмарність, %	0,69%	Зростає
м. Коломия		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Селятин, метео, С°	12,83%	Спадає
Вижниця, метео, С°	16,23%	Зростає
Чернівці, метео, С°	70,58%	Зростає
Хмарність, %	0,36%	Зростає
м. Чернівці		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Селятин, метео, С°	34,95%	Зростає
Коломия, метео, С°	65,05%	Зростає
Вижниця, метео, С°	0,00%	Спадає
Хмарність, %	0,00%	Спадає
м. Вижниця		
Ім'я змінної	Ваговий коеф.	Напрямок зміни функції
Селятин, метео, С°	58,27%	Зростає
Коломия, метео, С°	41,73%	Зростає
Чернівці, метео, С°	0,00%	Спадає
Хмарність, %	0,00%	Спадає

### ВИСНОВКИ

В межах роботи подано результати застосування індуктивних принципів моделювання для прогнозування значень температури для територій, з нерозгалуженою мережею метеостанцій на основі тепловізійної зйомки супутників. Система спрямована на автоматизацію формування МВД та застосування аналітичних процедур для

прогнозування значень температури для територій, з нерозгалуженою мережею метеостанцій.

Апробація на основі даних для території Чернівецької та Івано-Франківської областей області показала, що запропонований алгоритм може бути використаний для прогнозування значень температури.

Окрім того, дана моніторингова інформаційна система має перспективи розвитку, зокрема за рахунок додавання нових алгоритмів формування моделей та включення до МВД нових показників, зокрема, вегетаційних індексів, що будуть враховувати характеристики підстилаючої поверхні.

Отримані результати можуть мати широке практичне використання для вирішення як глобальних, так і локальних задач. Зокрема для моніторингу змін клімату й створення кліматичних моделей, або ж виявлення стану рослинності та наявності рубок на досліджуваних територіях.

### ЛІТЕРАТУРА REFERENCES

- [1] Балдина Е.А. Изучение сезонной динамики теплового излучения городских ландшафтов по снимкам Landsat-7 ETM+ (на примере Москвы) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: мат-лы VIII Всерос. науч. конф. / Е.А. Балдина, М.Ю. Грищенко – М.: Изд-во ИКИ РАН, 2010. С. 251–252.
- [2] Геологічний сервіс. USGS [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.usgs.gov/>.
- [3] Голуб, С.В. Багаторівневе моделювання в технологіях моніторингу оточуючого середовища [Текст] / С.В. Голуб. – Черкаси: Вид. ЧНУ імені Богдана Хмельницького, 2007. – 220 с.
- [4] Забелин С. А. Методика атмосферной коррекции снимков Landsat [Текст] / С. А. Забелин, А. Д. Тулегулов // Вестник ЕНУ им. Л. Н. Гумилева. – 2011. – № 6. – С. 147-154.
- [5] Клімат України: у минулому... і майбутньому?/ М.І.Кульбіда [та ін.] / за ред. М.І.Кульбіди, М. Б. Барабаш: Монографія. — К.: Сталь, 2009. — 234 с.
- [6] Кривоберець С.В. Аналіз методів і знімальних систем ведення агроекологічного моніторингу / С.В. Кривоберець // Вісник ЧДТУ. Збірник. Серія «Технічні науки». – Чернівці: ЧДТУ, 2012. – 42 (57). – С.166–175.
- [7] Лялько В.И. Влияние урбанизации на микроклимат городов (по материалам тепловых аэрокосмических съемок). Информационный отчет о НИР / В.И. Лялько, В.Е. Филиппович, С.А. Станкевич, А.Г. Мычак, О.В. Титаренко и др. – К.: ЦАКИЗ ИГН НАНУ. 2014. – 21 с.
- [8] Сервіс погоди. RP5 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://rp5.ua>.
- [9] Сервіс погоди. World weather [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.worldweatheronline.com>
- [10] Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to temperature // The Yale Center for Earth Observation, 2010. [Електронний ресурс]. Режим доступу – <http://www.yale.edu/ceo>.
- [11] NiclosR. LandSurfaceAirTemperatureRetrievalFromEOS-MODISImages / NiclosR., ValienteJ.A., BarberaM.J., CasellesV. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 11, No. 8. P. 1380–1384.
- [12] Sundara Kumar K. Esti-mation of Land surface temperature to study Urban Heat Island effect Using Landsat ETM+ image / Sundara Kumar K., Udayabhaskar P., Padmakumari K. // International journal of en-gineering, science and technology. 2012. № 4 (2). P. 807–814.