

**ВІТАЛІЙ ВЛАСЕНКО, АНДРІЙ ДАШКЕВИЧ**

## ГЕОМЕТРИЧНО УЗГОДЖЕНА СЕГМЕНТАЦІЯ ПОСЛІДОВНОСТІ ОГЛЯДОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ІНКРЕМЕНТАЛЬНИМ ФОРМУВАННЯМ МОЗАЇКИ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

У роботі запропоновано підхід до геометрично узгодженої сегментації послідовності оглядових зображень із інкрементальним формуванням мозаїки земної поверхні, що в межах задачі апроксимується дискретною площинною геометричною моделлю. Геометрична модель представляється як множина прямокутних областей, кожна з яких являє масив піксельної інформації, де кожен піксель віднесено до одного із заданих класів. Вхідні дані представлені послідовністю перекривних фрагментів супутникового зображення земної поверхні, для яких виконується просторово-часове узгодження семантичних міток. Розроблено алгоритмічну схему, що поєднує геометричне моделювання міжкадрових трансляційних перетворень, суперпіксельну сегментацію та кластеризацію колірно-текстурних ознак без використання ресурсомістких моделей глибокого навчання. Інкрементальне формування сегментованої мозаїки здійснюється шляхом накопичення локальних фрагментів з урахуванням зон перекриття та узгодження семантичних міток у глобальній системі координат. Для оцінювання міжкадрової узгодженості сегментації запропоновано коефіцієнт відповідності міток у зоні перекриття сусідніх кадрів. Для зменшення локальних розбіжностей застосовано метод темпоральної стабілізації на основі аналізу зв'язних компонент розбіжності. Застосування запропонованого підходу дозволяє усунути дрібні нестабільні області без впливу на великомасштабні структурні зміни сцени. Експериментальні результати підтвердили ефективність запропонованого підходу для забезпечення просторово-часової узгодженості сегментації в перекривних областях послідовності кадрів. Розроблений метод забезпечує формування цілісної сегментованої мозаїки земної поверхні за умов обмежених обчислювальних ресурсів та може бути використаний у задачах дистанційного зондування, моніторингу територій і обробки оглядових зображень, отриманих із безпілотних літальних апаратів. Розроблені моделі реалізовано у вигляді компонентів комп'ютерної системи представлення просторових моделей та операцій із ними.

**Ключові слова:** обробка зображень; дистанційне зондування; оглядові зображення; геометричне моделювання; дискретна геометрична модель; просторово-часова узгодженість; сегментація; суперпікселі; кластеризація; інкрементальне формування мозаїки.

**VITALII VLASENKO, ANDRII DASHKEVYCH**

## GEOMETRICALLY CONSISTENT SEGMENTATION OF A SEQUENCE OF SURVEY IMAGES WITH INCREMENTAL MOSAIC FORMATION OF THE EARTH'S SURFACE

The paper proposes an approach to geometrically consistent segmentation of a sequence of survey images with incremental formation of a mosaic of the Earth's surface, which within the scope of the problem is approximated by a discrete planar geometric model. The geometric model is represented as a set of rectangular regions containing pixel information, where each pixel is assigned to one of the predefined classes. The input data consist of a sequence of overlapping fragments of a satellite image of the Earth's surface, for which spatiotemporal consistency of semantic labels is ensured. An algorithmic scheme combining geometric modeling of interframe translational transformations, superpixel segmentation, and clustering of color-texture features without the use of computationally expensive deep learning models has been developed. Incremental formation of the segmented mosaic is performed by accumulating local fragments while considering overlap regions and aligning semantic labels within a global coordinate system. To evaluate interframe segmentation consistency, a label matching coefficient for overlap regions of neighboring frames is proposed. To reduce local inconsistencies, a temporal stabilization method based on the analysis of connected discrepancy components is applied. The proposed approach enables eliminating small unstable regions without affecting large-scale structural changes in the scene. Experimental results confirmed the effectiveness of the proposed approach for ensuring spatiotemporal consistency of segmentation in overlapping regions of image sequences. The developed method enables the formation of a coherent segmented mosaic of the Earth's surface under limited computational resources and can be applied to remote sensing, territory monitoring, and processing of survey images obtained from unmanned aerial vehicles. The developed models were implemented as components of a computer system for representing spatial models and operations on them.

**Keywords:** image processing; remote sensing; survey images; geometric modeling; discrete geometric model; spatiotemporal consistency; segmentation; superpixels; clustering; incremental mosaicking.

**Вступ.** Сучасні системи дистанційного зондування та безпілотні літальні апарати дозволяють безперервно отримувати великі обсяги оглядових зображень земної поверхні у вигляді послідовностей із частковим перекриттям. Для автоматизованого аналізу отриманих даних необхідне формування цілісного сегментованого представлення поверхні сцени, узгодженого у спільну систему координат та придатного для подальшого просторового аналізу.

Існуючі методи семантичної сегментації здебільшого орієнтовані на обробку поодиноких зображень без урахування міжкадрової геометричної та просторово-часової узгодженості або потребують використання ресурсомістких моделей глибокого навчання. У результаті виникають розбіжності семантичних міток у зонах перекриття, що призводить до фрагментації сегментів та втрати цілісності мозаїки поверхні.

За умов оглядовості зйомки, коли сцена апроксимується площинною геометричною моделлю, актуальною є задача розробки методу геометрично узгодженої сегментації, що може забезпечити інкрементальне формування мозаїки земної поверхні з урахуванням перекриття зображень, просторово-часової узгодженості та обмежених обчислювальних ресурсів.

**Аналіз останніх досліджень.** Одним із ключових напрямів сучасного комп'ютерного зору є сегментація зображень дистанційного зондування, яка забезпечує автоматизоване виділення структур земної поверхні та їх подальший просторовий аналіз. Сучасні дослідження переважно зосереджені на використанні моделей глибоких нейронних мереж для підвищення точності виділення об'єктів та зменшення фрагментації сегментів. Наприклад, підходи, які враховують структурну взаємодію класів та посилений контроль

меж демонструють підвищену стабільність сегментації [1], а використання послідовностей зображень із виділенням ознак дозволяє покращувати глобальну інтерпретацію сцен із надвисокою роздільною здатністю [2].

Разом із глибокими моделями активно розвиваються безнаглядні та узагальнюючі методи сегментації, які орієнтуються на зменшення залежності від великих обсягів розмічених даних. У роботі [3] науковці розглядають суперпіксельні подання як ефективний спосіб переходу від піксельного до регіонального аналізу сцени. Поєднання суперпікселів із методами кластеризації дозволяє проводити сегментацію без повного нагляду зокрема для гіперспектральних зображень [4], а інтеграція графових моделей та вдосконалення алгоритмів формування суперпіксельних розбиттів забезпечує більш повноцінне врахування просторових залежностей між різними регіонами сцени [5, 6].

Однак, незважаючи на якісні результати, сегментація окремих кадрів не вирішує задачі формування цілісного представлення великої території, особливо за умов оглядовості зйомки. Під час використання безпілотних літальних апаратів зображення формуються як послідовності з частковим перекриттям, зумовлюючи потребу в геометричному вирівнюванні та узгодженні зон перекриття при побудові повноцінної мозаїки. Дослідження науковців демонструють якісні результати при використанні методів оптимального пошуку швів та напівпроективних перетворень [7], глобальної оптимізації реєстрації зображень із використанням графових розрізів [8], а також із використанням сегментаційно-керованих підходів до зшивання [9], що враховують регіональну структуру сцени.

При переході від статичного зшивання до аналізу багатоканальних даних необхідно використовувати просторово-часову узгодженість результатів сегментації. Враховуючи перекриття та послідовне отримання кадрів важливо забезпечити стабільність семантичних міток у часі. Використання механізмів пропагації міток та забезпечення циклічної консистентності, що спрямовані на стабілізацію семантичних міток у часі та зменшення розбіжностей у перекривних областях, дозволяє значно зменшити міжкадрову варіативність результатів, яка може виникати через зміни ракурсу, освітлення та локальну неточність сегментації [10]. Ключовим у задачах відстеження змін на земній поверхні є врахування часової узгодженості [11], а використання консенсусних методів обробки багаточасових даних підвищує надійність моніторингу [12].

Поряд із нейромережевими оптимізаційними підходами зберігається інтерес до геометричних моделей, які засновані на дискретному представленні сцени. Формалізація трансляційних міжкадрових перетворень у межах цілочисельної координатної системи дозволяє реалізувати спрощені, але ефективні схеми узгодження перекривних областей без переходу до повної проективної моделі [13, 14].

Водночас більшість сучасних підходів до сегментації та просторового узгодження зображень орієнтована на використання моделей глибокого навчання, які забезпечують високу точність, однак характеризуються значними обчислювальними витратами, потребою у великих обсягах розмічених даних та складністю адаптації до систем обробки даних у режимі реального часу. Крім того, значна частина існуючих методів розглядає задачі сегментації, геометричного вирівнювання та часової стабілізації ізольовано, що ускладнює формування цілісного просторово-узгодженого представлення сцени. За умов використання безпілотних літальних апаратів та обмежених обчислювальних ресурсів актуальним залишається розроблення ресурсно-ефективних методів, здатних забезпечувати узгодження сегментації перекривних оглядових зображень без використання складних та обчислювально витратних нейромережових архітектур.

Сучасні дослідження також демонструють зростання інтересу до поєднання методів шгучного інтелекту, просторового аналізу та геометричного представлення сцен для задач дистанційного зондування й аналізу складних територіальних структур [15, 16]. Однак більшість існуючих рішень орієнтована або на високоточні моделі семантичної сегментації окремих зображень, або на задачі геометричного зшивання без врахування міжкадрової узгодженості семантичних міток. Формування геометрично узгодженої сегментованої мозаїки земної поверхні на основі дискретної трансляційної моделі та локального просторового узгодження перекривних областей залишається актуальною задачею, що потребує розробки ресурсно-ефективного підходу.

**Мета роботи.** Метою дослідження є розробка методу геометрично узгодженої сегментації послідовності оглядових зображень із інкрементальним формуванням мозаїки земної поверхні на основі геометричного моделювання міжкадрових перетворень. Для досягнення поставленої мети розроблено алгоритмічну схему узгодження сегментації в зонах перекриття зображень та виконано оцінювання стабільності й узгодженості сформованої мозаїки. Запропонований підхід орієнтований на використання в задачах дистанційного зондування та обробки оглядових зображень, отриманих із безпілотних літальних апаратів.

**Основна частина.** Основною задачею дослідження є формування геометрично узгодженої сегментованої мозаїки земної поверхні на основі послідовності оглядових зображень із частковим перекриттям.

Запропонований підхід реалізується у вигляді таких послідовних етапів:

- 1) формування послідовності перекривних фрагментів оглядового зображення;
- 2) визначення глобальних координат фрагментів у спільній системі координат;
- 3) виконання суперпіксельної сегментації локальних кадрів;

4) кластеризація ознак суперпікселів у спільному просторі ознак;

5) формування глобальної мозаїки семантичних міток з урахуванням зон перекриття;

6) оцінювання міжкадрової узгодженості сегментації та темпоральна стабілізація локальних розбіжностей.

Нехай задано послідовність оглядових зображень  $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ , отриманих із частковим перекриттям. Кожному фрагменту відповідає положення у глобальній системі координат, що визначається координатами верхнього лівого кута. Задача полягає у формуванні глобальної сегментованої мозаїки, у якій забезпечується просторово-часова узгодженість семантичних міток у перекривних областях сусідніх кадрів.

Для формування експериментального набору даних було використано оглядове зображення земної поверхні, отримане із супутникової карти розміром  $2048 \times 1280$  пікселів. Для моделювання послідовності оглядових кадрів із частковим перекриттям початкове зображення було розбито на регулярну сітку перекривних фрагментів.

Розбиття виконувалось на тайли розміром  $512 \times 512$  пікселів із перекриттям 128 пікселів по горизонталі та вертикалі. Крок зміщення визначався як:

$$s_x = t_w - o, s_y = t_h - o, \quad (1)$$

де  $t_w = t_h = 512$  – розміри тайлів;

$o = 128$  – величина перекриття.

Визначений крок становить 384 пікселі, що відповідає 25% перекриттю по кожному напрямку. Кількість тайлів по ширині та висоті обчислювалась як:

$$n_x = 1 + \frac{W-t_w}{s_x}, n_y = 1 + \frac{H-t_h}{s_y}, \quad (2)$$

де  $W$  та  $H$  – розміри початкового зображення (ширина і висота відповідно).

Для кожного фрагмента визначались глобальні координати верхнього лівого кута  $(x, y)$ , які зберігались у метаданих та використовувались для подальшої реконструкції сцени. Формування послідовності фрагментів виконувалось у порядку «змієподібного» обходу, який відповідає типовій траєкторії оглядової зйомки безпілотної літальної апарата та передбачає чергування напрямку сканування у сусідніх рядках сітки. На рис. 1 наведено приклад вихідного зображення, а на рис. 2 – результат його фрагментації на перекривні тайли.

Для перевірки коректності дискретної геометричної моделі було виконано зворотну реконструкцію сцени з використанням координат  $(x, y)$  без застосування додаткових методів вирівнювання. Формування мозаїки здійснювалось шляхом накопичення піксельних значень у глобальній матриці та їх усереднення у зонах перекриття:



Рис. 1 – Приклад оглядового зображення



Рис. 2 – Регулярне перекривне розбиття оглядового зображення

$$M(x, y) = \frac{\sum I_k(x, y)}{N(x, y)}, \quad (3)$$

де  $I_k(x, y)$  – значення пікселя з координатами  $(x, y)$  у  $k$ -му фрагменті;

$N(x, y)$  – кількість фрагментів, які покривають відповідний піксель.

Якість реконструкції оцінювалась за середньоквадратичною похибкою (MSE) та показником пікового відношення сигнал/шум (PSNR):

$$MSE = \frac{1}{HW} \sum (I - M)^2, \quad (4)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{255^2}{MSE} \right). \quad (5)$$

Отримані значення показали нульову або близьку до нуля похибку реконструкції, що підтверджує коректність дискретної трансляційної моделі сцени та узгодженість процедури формування мозаїки.

Після формування набору кадрів було виконано їх суперпіксельну сегментацію методом SLIC із параметром  $n\_segments = 400$ . Для кожного суперпікселя обчислювались середні значення у просторі Lab:  $f_i = [L_i, a_i, b_i]$ . Отримані суперпікселі з усіх кадрів об'єднувались у спільний простір ознак та кластеризувались методом k-means із використанням 6 кластерів, що забезпечувало глобальну узгодженість семантичних міток між кадрами.

Фінальна мозаїка міток формувалась за принципом більшості «голосів» у перекривних областях:

$$\text{Label}(x, y) = \arg \max_c V_c(x, y), \quad (6)$$

де  $V_c(x, y)$  – кількість «голосів» класу  $c$  у відповідному пікселі.

На рис. 3 наведено приклад сегментації окремого фрагмента.

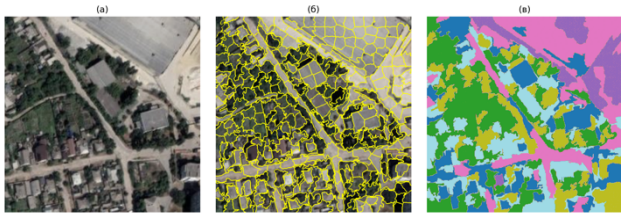


Рис. 3 – Сегментація фрагмента: оригінал (а), суперпікселі (б), кластеризована карта міток (в)

Для оцінки міжкадрової узгодженості сегментації було використано коефіцієнт відповідності семантичних міток у зоні перекриття сусідніх кадрів. Нехай  $L_k(x, y)$  – семантична мітка пікселя з координатами  $(x, y)$  у  $k$ -му фрагменті, а  $R$  – область перекриття двох сусідніх кадрів. Тоді коефіцієнт узгодженості визначається за формулою (7):

$$A = \frac{1}{|R|} \sum_{(x,y) \in R} 1[L_k(x, y) = L_{k+1}(x, y)], \quad (7)$$

де  $1[\cdot]$  – індикаторна функція, яка дорівнює 1 у разі виконання умови та 0 в іншому випадку.

Таким чином, показник  $A$  характеризує частку пікселів перекриття, для яких семантичні мітки двох сусідніх кадрів збігаються. Значення коефіцієнта, близькі до 1, відповідають високому рівню міжкадрової узгодженості сегментації.

Для зменшення локальних розбіжностей міток у перекривних областях застосовано темпоральну стабілізацію на основі аналізу зв'язних компонент розбіжності. Для кожної пари кадрів визначалась множина пікселів невідповідності міток у зоні перекриття  $D = \{(x, y) \in R: L_k(x, y) \neq L_{k-1}(x, y)\}$ , у якій виділялись зв'язні компоненти  $C_i$ . Якщо площа компоненти  $|C_i|$  була меншою за порогове значення  $A_{min}$ , виконувалась заміна міток цієї області значеннями попереднього кадру:

$$L_k(x, y) = L_{k-1}(x, y). \quad (8)$$

Застосування зазначеного підходу дозволяє усунути локальні нестабільні області без впливу на великомасштабні структурні зміни сцени. Візуальний результат інтеграції сегментованих фрагментів у єдину мозаїку наведено на рис. 4.

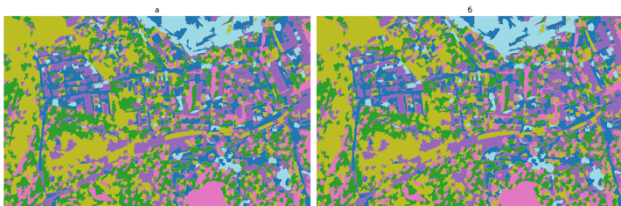


Рис. 4 – Отримана мозаїка до – а та після – б темпоральної стабілізації

Статистичні характеристики коефіцієнта узгодженості до та після темпоральної стабілізації наведено у табл. 1.

Середнє значення коефіцієнта узгодженості зросло з 0.7315 до 0.7572, що відповідає абсолютному приросту 0.0256 (3.5% відносно початкового рівня). Зростання мінімального значення узгодженості на 0.0334 свідчить про зменшення локальних випадків низької відповідності у зонах перекриття, а підвищення максимального показника до 0.8679 підтверджує покращення стабільності сегментації для найбільш однорідних ділянок сцени. Позитивні значення  $\Delta$  свідчать про підвищення міжкадрової узгодженості сегментації після застосування темпоральної стабілізації.

Таблиця 1 – Характеристики узгодженості сегментації в зоні перекриття (до та після темпоральної стабілізації)

Показник	До	Після	$\Delta$	$\Delta, \%$
Середнє значення	0.7315	0.7572	+0.0256	+3.50
Стандартне відхилення	0.0589	0.0628	+0.0039	+6.55
Мінімальне значення	0.6293	0.6627	+0.0334	+5.31
Максимальне значення	0.8195	0.8679	+0.0484	+5.91

Незначне збільшення стандартного відхилення пов'язане з перерозподілом значень коефіцієнта узгодженості у бік вищих значень та формуванням більш виражених стабільних областей сегментації. На рис. 5 наведено залежність коефіцієнта узгодженості від номера пари кадрів до та після темпоральної стабілізації.

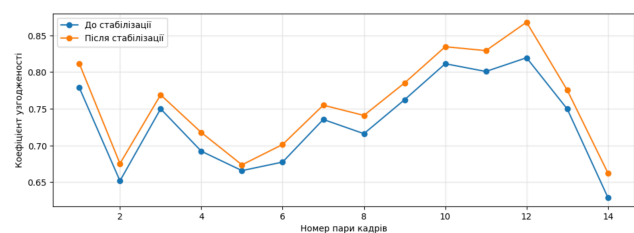


Рис. 5 – Залежність коефіцієнта узгодженості сегментації від номера пари кадрів до та після темпоральної стабілізації

Аналіз графіка демонструє систематичне зміщення кривої після стабілізації у бік більших значень узгодженості. Позитивна динаміка спостерігається для всіх напрямків переміщення кадрів, що підтверджує ефективність структурної фільтрації дрібних компонент розбіжності та підвищення просторово-часової узгодженості сегментації.

Проведені експерименти підтверджують, що

поєднання дискретної трансляційної геометричної моделі, глобальної кластеризації суперпікселів та темпоральної стабілізації з фільтрацією малих компонент дозволяє формувати структурно узгоджену сегментовану мозаїку земної поверхні без використання складних проєктивних перетворень та ресурсомістких моделей глибокого навчання.

Отримана сегментована мозаїка може бути використана як основа для побудови дискретної просторової моделі місцевості, у якій локально узгоджені області сцени розглядаються як взаємопов'язані просторові блоки. Таким чином, просторову модель місцевості можна представити як множину взаємопов'язаних блоків:

$$M = \{B_1, B_2, \dots, B_m\}, \quad (9)$$

де  $B_i$  – окремий просторовий блок, що відповідає локально узгодженій області сцени.

Кожен блок визначається як:

$$B_i = \{A_i, O_i, N_i\}, \quad (10)$$

де  $A_i$  – просторова область блоку (масив пікселів);

$O_i = \{o_{i1}, o_{i2}, \dots, o_{ik}\}$  – множина об'єктів, що належать блоку;

$N_i$  – множина блоків, суміжних із заданим.

У межах дослідження було розроблено комп'ютерну реалізацію запропонованих моделей. Узагальнена діаграма класів для представлення просторової моделі місцевості наведена на рис. 6.

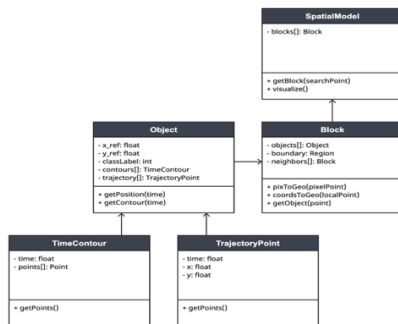


Рис. 6 – Діаграма класів для представлення просторової моделі місцевості

**Висновки.** У роботі розроблено підхід до геометрично узгодженої сегментації оглядових зображень із інкрементальним формуванням мозаїки земної поверхні на основі дискретної трансляційної моделі міжкадрових перетворень, суперпіксельного подання та кластеризації ознак. Запропонований підхід забезпечує просторово-часову узгодженість семантичних міток у перекривних областях без використання складних проєктивних перетворень та ресурсомістких моделей глибокого навчання.

У межах дослідження реалізовано алгоритмічну схему формування сегментованої мозаїки земної поверхні, що включає геометричне узгодження фрагментів, глобальну кластеризацію суперпікселів та темпоральну стабілізацію локальних розбіжностей міток. Розроблені моделі реалізовано у вигляді компонентів комп'ютерної системи представлення просторових моделей та операцій із ними.

Результати експериментів підтвердили ефективність запропонованого підходу для забезпечення міжкадрової узгодженості сегментації та формування цілісної сегментованої мозаїки земної поверхні. Використання дискретної геометричної моделі дозволило зменшити обчислювальну складність узгодження кадрів та забезпечити ресурсно-ефективну реалізацію алгоритму.

Отримані результати підтверджують доцільність використання розробленого підходу в задачах дистанційного зондування, моніторингу територій та обробки оглядових зображень, отриманих із безпілотних літальних апаратів. Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення експериментальної бази, інтеграцію адаптивних механізмів узгодження міток та розробку гібридних моделей, що поєднують геометричні й навчальні підходи.

#### Список літератури

- [1] X. He, Y. Zhou, B. Liu, J. Zhao, and R. Yao, "Remote sensing image semantic segmentation via class-guided structural interaction and boundary perception," *Expert Systems with Applications*, vol. 252, Art. 124019, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124019>.
- [2] Z. Wang, J. Yi, A. Chen, L. Chen, H. Lin, and K. Xu, "Accurate semantic segmentation of very high-resolution remote sensing images considering feature state sequences: From benchmark datasets to urban applications," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 220, pp. 824–840, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2025.01.017>.
- [3] C. N. Rodrigues, I. M. Nunes, M. B. Pereira, H. Oliveira, and J. A. dos Santos, "From superpixels to foundational models: An overview of unsupervised and generalizable image segmentation," *Computers & Graphics*, vol. 123, Art. 104014, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2024.104014>.

- [4] M. P. Barbato, P. Napoletano, F. Piccoli, and R. Schettini, "Unsupervised segmentation of hyperspectral remote sensing images with superpixels," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 28, Art. 100823, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100823>.
- [5] Z. Yang, H. Niu, X. Wang, L. Huang, and K. Yang, "An unsupervised semantic segmentation method that combines the ImSE-Net model with SLICm superpixel optimization," *International Journal of Digital Earth*, vol. 17, Art. 2341970, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2341970>.
- [6] F. Huang, Z. Yang, H. Zhou, C. Du, A. J. Y. Wong, Y. Gou, M. Han, and J.-H. Lai, "Unsupervised superpixel-driven parcel segmentation of remote sensing images using graph convolutional network," in *Companion Proceedings of the Web Conference 2022*, 2022, pp. 1046–1052, doi: <https://doi.org/10.1145/3487553.3524716>.
- [7] J. Chen, Z. Li, C. Peng, Y. Wang, and W. Gong, "UAV image stitching based on optimal seam and half-projective warp," *Remote Sensing*, vol. 14, Art. 1068, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14051068>.
- [8] Z. Wang, Z. Fu, and J. Xu, "Large-scale UAV image stitching based on global registration optimization and graph-cut method," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 107, Art. 104354, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2024.104354>.
- [9] W. Pan, A. Li, X. Liu, and Z. Deng, "Unmanned aerial vehicle image stitching based on multi-region segmentation," *IET Image Processing*, vol. 18, pp. 4607–4622, 2024, doi: <https://doi.org/10.1049/ipr2.13271>.
- [10] V. Addanki, D. R. Yerramreddy, S. Durgapu, S. S. N. Boddu, and V. Durgapu, "Enhancing semi-supervised semantic segmentation through cycle-consistent label propagation in video," *Neural Processing Letters*, vol. 56, Art. 4, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s11063-024-11459-6>.
- [11] S. Tian, A. Ma, Z. Zheng, X. Tan, and Y. Zhong, "Learning temporal consistency for high spatial resolution remote sensing imagery semantic change detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 63, pp. 1–25, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3561021>.
- [12] F. J. Cardama, D. B. Heras, and F. Argüello, "Consensus techniques for unsupervised binary change detection using multi-scale segmentation detectors for land cover vegetation images," *Remote Sensing*, vol. 15, Art. 2889, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/rs15112889>.
- [13] А. О. Дашкевич, "Просторові нетворення точкових множин на цілочисельних регулярних сітках," *Сучасні проблеми моделювання*, вип. 26, с. 100–108, 2024, doi: <https://doi.org/10.33842/2313125X-2024-26-100-108>.
- [14] А. О. Дашкевич, "Геометрична ідентифікація динамічних об'єктів на послідовностях зображень," *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Інформатика і моделювання*, № 1, с. 73–80, 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2023.01.06>.
- [15] І. О. Довбиш, О. В. Муравйов, А. С. Момот, та Г. А. Богдан, "Автономна навігація БПЛА: технології орієнтації та локалізації," *Прикладні питання математичного моделювання*, т. 8, № 1, с. 57–64, 2025, doi: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-5>.
- [16] І. С. Ряполов, В. О. Василець, С. В. Кукобко, та С. І. Богдан, "Modelling the surface geometry of unmanned aerial vehicles, the design of which contains elements with different electrophysical properties," *Випробування та сертифікація*, № 2(4), с. 101–110, 2024, doi: <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.13>.
- [17] M. P. Barbato, P. Napoletano, F. Piccoli, and R. Schettini, "Unsupervised segmentation of hyperspectral remote sensing images with superpixels," *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 28, Art. 100823, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100823>.
- [18] Z. Yang, H. Niu, X. Wang, L. Huang, and K. Yang, "An unsupervised semantic segmentation method that combines the ImSE-Net model with SLICm superpixel optimization," *International Journal of Digital Earth*, vol. 17, Art. 2341970, 2024, doi: <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2341970>.
- [19] F. Huang, Z. Yang, H. Zhou, C. Du, A. J. Y. Wong, Y. Gou, M. Han, and J.-H. Lai, "Unsupervised superpixel-driven parcel segmentation of remote sensing images using graph convolutional network," in *Companion Proceedings of the Web Conference 2022*, 2022, pp. 1046–1052, doi: <https://doi.org/10.1145/3487553.3524716>.
- [20] J. Chen, Z. Li, C. Peng, Y. Wang, and W. Gong, "UAV image stitching based on optimal seam and half-projective warp," *Remote Sensing*, vol. 14, Art. 1068, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/rs14051068>.
- [21] Z. Wang, Z. Fu, and J. Xu, "Large-scale UAV image stitching based on global registration optimization and graph-cut method," *Journal of Visual Communication and Image Representation*, vol. 107, Art. 104354, 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2024.104354>.
- [22] W. Pan, A. Li, X. Liu, and Z. Deng, "Unmanned aerial vehicle image stitching based on multi-region segmentation," *IET Image Processing*, vol. 18, pp. 4607–4622, 2024, doi: <https://doi.org/10.1049/ipr2.13271>.
- [23] V. Addanki, D. R. Yerramreddy, S. Durgapu, S. S. N. Boddu, and V. Durgapu, "Enhancing semi-supervised semantic segmentation through cycle-consistent label propagation in video," *Neural Processing Letters*, vol. 56, Art. 4, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s11063-024-11459-6>.
- [24] S. Tian, A. Ma, Z. Zheng, X. Tan, and Y. Zhong, "Learning temporal consistency for high spatial resolution remote sensing imagery semantic change detection," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 63, pp. 1–25, 2025, doi: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2025.3561021>.
- [25] F. J. Cardama, D. B. Heras, and F. Argüello, "Consensus techniques for unsupervised binary change detection using multi-scale segmentation detectors for land cover vegetation images," *Remote Sensing*, vol. 15, Art. 2889, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/rs15112889>.
- [26] А. О. Дашкевич, "Spatial transformations of point sets on integer regular grids," *Modern Problems of Modeling*, no. 26, pp. 100–108, 2024, doi: <https://doi.org/10.33842/2313125X-2024-26-100-108>.
- [27] А. О. Дашкевич, "Geometric identification of dynamic objects in image sequences," *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Informatics and Modeling*, no. 1, pp. 73–80, 2023, doi: <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2023.01.06>.
- [28] І. О. Довбиш, О. В. Муравйов, А. С. Момот, та Г. А. Богдан, "Autonomous UAV navigation: orientation and localization technologies," *Applied Problems of Mathematical Modeling*, vol. 8, no. 1, pp. 57–64, 2025, doi: <https://doi.org/10.32782/mathematical-modelling/2025-8-1-5>.
- [29] І. Ye. Ryapolov, V. O. Vasylets, S. V. Kukobko, and S. I. Bodnar, "Modelling the surface geometry of unmanned aerial vehicles, the design of which contains elements with different electrophysical properties," *Testing and Certification*, no. 2(4), pp. 101–110, 2024, doi: <https://doi.org/10.37701/ts.04.2024.13>.

#### References (transliterated)

- [1] X. He, Y. Zhou, B. Liu, J. Zhao, and R. Yao, "Remote sensing image semantic segmentation via class-guided structural interaction and boundary perception," *Expert Systems with Applications*, vol. 252, Art. 124019, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124019>.
- [2] Z. Wang, J. Yi, A. Chen, L. Chen, H. Lin, and K. Xu, "Accurate semantic segmentation of very high-resolution remote sensing images considering feature state sequences: From benchmark datasets to urban applications," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote*

Надійшла (received) 19.04.2026  
Прийнята до друку (accepted) 28.05.2026  
Опублікована (published) 29.05.2026

*Відомості про авторів та їх внесок / About The Authors And Their Contributions*

**Віталій Власенко (Vitalii Vlasenko)** – аспірант кафедри геометричного моделювання та комп’ютерної графіки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; тел.: (066)2715472; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6951-8496>; email: [Vitalii.Vlasenko@infiz.khpi.edu.ua](mailto:Vitalii.Vlasenko@infiz.khpi.edu.ua) (концептуалізація, методологія, програмна реалізація, проведення експериментів, формальний аналіз, написання початкового варіанту тексту)

**Андрій Дашкевич (Andrii Dashkevych)** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри геометричного моделювання та комп’ютерної графіки, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; тел.: (095)3880456; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9963-0998>; email: [Andrii.Dashkevych@khpi.edu.ua](mailto:Andrii.Dashkevych@khpi.edu.ua) (наукове консультування, валідація результатів, рецензування та редагування тексту)

*Усі автори ознайомилися з остаточною версією рукопису та погодилися з її публікацією.*