

<https://doi.org/10.15407/knit2021.04.042>
УДК 528.854: 004.932.2

О. Л. МАКАРОВ¹, заст. Генерального конструктора з питань створення й експлуатації космічних апаратів, супутникових систем, контрольно-вимірювальних і інформаційно-керувальних засобів ракетно-космічного та наземного сегментів, канд. техн. наук, акад. Міжнародної академії астронавтики, заслужений машинобудівник України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
E-mail: info@yuzhnoye.com

К. Г. БІЛОУСОВ¹, голов. конструктор і начальник проектно-конструкторського бюро космічних апаратів, систем та комплексів

Д. М. СВИНАРЕНКО², проректор з науково-педагогічної роботи, канд. техн. наук, доцент

В. С. ХОРОШИЛОВ¹, начальник розрахунково-теоретичного сектору відділу конструкторського бюро космічних апаратів, систем і комплексів, д-р техн. наук, проф., «Заслужений діяч науки і техніки України»

Д. К. МОЗГОВИЙ², доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж, канд. техн. наук, доцент
E-mail: m-d-k@i.ua

В. М. ПОПЕЛЬ¹, заст. начальника відділу антено-фідерних та НВЧ-пристроїв конструкторського бюро космічних апаратів, систем і комплексів

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

² Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Проспект Гагаріна 72, Дніпро, Україна, 49010

АВТОМАТИЗОВАНЕ РОЗПІЗНАВАННЯ МІСЬКОЇ РОСЛИННОСТІ ТА ВОДОЙМ ЗА ЗНІМКАМИ ЗІ СУПУТНИКА «JILIN-1A»

Наведено результати експериментального тестування розробленої методики автоматизованого розпізнавання рослинності та водойм на території міст за багатоспектральними знімками зі супутника «Jilin-1A». Дослідження включали проведення автоматизованого розпізнавання рослинності та водних об'єктів на обраній території спостережень за знімками надвисокого просторового розрізнення видимого та ІЧ-діапазонів і наступного порівняння отриманих результатів з результатами візуального дешифрування. Отримані результати обробки знімків зі супутника «Jilin-1A» відповідно до запропонованої методики підтвердили достатньо високу точність автоматизованого виділення границь розпізнаних об'єктів у порівнянні з результатами інтерактивного візуального розпізнавання цих же знімків. На різних тестових ділянках отримано добре розділення класів рослинності і води при тих самих налаштуваннях порогів бінаризації. Точність автоматичної класифікації рослинності та водойм (без урахування похибок еталона) для різних тестових ділянок становила 81...92 %, а значення коефіцієнта Каппа лежали у межах 0.68...0.85. Порівняння нормалізованих індексних зображень, отриманих із супутників «Jilin-1A» і «Sentinel-2A», показало незначні розбіжності значень NDVI та істотні розбіжності для NDWI і MNDWI, що зумовлено використанням різних спектральних каналів (SWIR і NIR). Дані розбіжності можна істотно зменшити, використовуючи поправочні коефіцієнти.

Аналіз впливу зменшення розрядності вихідних знімків (з 10 до 8 біт) і наступного інформаційного стиснення (JPEG lossy і JPEG2000 lossless) на результати автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів підтвердив доцільність і ефективність таких методів. Обсяг збережених і переданих файлів зменшувався суттєво (в 80..100 разів) при незна-

Цитування: Макаров О. Л., Білоусов К. Г., Свиноренко Д. Н., Хорошилов В. С., Мозговий Д. К., Попель В. М. Автоматизоване розпізнавання міської рослинності та водойм за знімками зі супутника «Jilin-1A». *Космічна наука і технологія*. 2021. 27, № 4 (131). С. 42—53. <https://doi.org/10.15407/knit2021.04.042>

чному зниженні точності класифікації (на 1...2 %). Запропонована методика дозволяє істотно підвищити оперативність і вірогідність відновлення карт великих міст при одночасному зниженні фінансових витрат у порівнянні із традиційною наземною GPS-зйомкою та аерофотозйомкою.

Завдяки високому ступеню автоматизації обробки знімків та мінімізації необхідних обчислень (у порівнянні з методами, що використовують складні класифікатори і нейронні мережі) розроблена методика може бути реалізована у вигляді геоінформаційного вебсервісу, який забезпечуватиме потреби широкого кола державних служб і комерційних структур, а також буде корисним для населення мегаполісів і туристів.

Ключові слова: супутниковий моніторинг, багатоспектральні знімки, обробка зображень, спектральні індекси, відновлення карт

Вступ. Забезпечення стійкого розвитку густонаселених територій при надзвичайно високому темпі розвитку міської інфраструктури неможливе без одержання регулярної та достовірної інформації про стан і динаміку змін всіх типів об'єктів, зокрема рослинних і водних. В умовах урбанізації, що дедалі підсилюється, і пов'язаного із цим різкого збільшення техногенного навантаження на міські екосистеми завдання підвищення оперативності та вірогідності відновлення цифрових карт мегаполісів стоїть на першому місці.

Актуальність тематики досліджень. Наразі оперативний контроль природних і антропогенних змін рослинності та водних об'єктів на території великих міст є одним з найбільш важливих і актуальних завдань екологічного моніторингу мегаполісів в усьому світі. Однак проведення регулярного моніторингу екологічного стану великих міст є складною багатопрофільною задачею, яка вимагає залучення багатьох організаційно-фінансових та науково-технічних ресурсів. Тому проведення досліджень з метою розробки нових і ефективних методик та інформаційних технологій автоматизованої обробки даних ДЗЗ для здійснення такого моніторингу є вкрай важливим і актуальним.

Поточний стан. Питанням дистанційного моніторингу навколишнього середовища присвячено досить багато вітчизняних наукових публікацій і дисертацій останнього років, у яких наведено методи супутникового моніторингу рослинності [14, 17, 20, 22], водойм [2, 4, 5, 18, 21] та урбанізованих територій [8, 11–13, 19]. Однак у переважній більшості цих публікацій описано приклади використання багатоспектральних даних ДЗЗ низького й середнього просторово-

го розрізнення, придатних для супутникового моніторингу лише великих рослинних і водних об'єктів (лісові масиви, сільгоспугіддя, ріки, озера тощо). Завдання оперативного моніторингу рослинних і водних об'єктів на території міст можна ефективно вирішувати з використанням високдетальних супутникових знімків видимого та ІЧ-діапазонів. За кордоном супутникові знімки високого і надвисокого просторового розрізнення вже багато років успішно використовуються при розв'язуванні різних прикладних завдань, у тому числі для міського планування й екологічного моніторингу.

Формулювання проблеми. Як правило, для регулярного відновлення баз просторових даних при актуалізації карт мегаполісів традиційно використовувалися дані наземних вимірювань та аерофотознімки. При цьому періодичність відновлення карт міст була низькою (зазвичай один раз у кілька років), що пояснюється високою трудомісткістю збору та обробки даних. Широкому використанню супутникових знімків надвисокого просторового розрізнення перешкоджало, у першу чергу, їхня висока вартість, а також складність і висока вартість спеціалізованого програмного забезпечення та для обробки даних ДЗЗ.

Можливі шляхи вирішення. Інтенсивний розвиток в останні роки багатоспектральних супутникових сенсорів надвисокого просторового розрізнення, з одного боку (таблиця), і значний прогрес в області сучасних інформаційних технологій обробки супутникових знімків, з іншого боку, дозволили істотно прискорити та здешевити процес збору та обробки даних ДЗЗ, а також спростити доступ масових користувачів різних прикладних галузей до результатів їхньої обробки [3, 25].

Серед наведених у таблиці супутників ДЗЗ слід особливо зазначити китайські супутники «Jilin-1A» і «SuperView-1A/B/C/D», знімки з яких відрізняються невисокою вартістю у порівнянні із супутниками ДЗЗ інших країн. Незважаючи на гірші характеристики (у першу чергу точність геоприв'язки та динамічний діапазон сенсорів), ці знімки можуть із успіхом використовуватися для розв'язування широкого кола прикладних завдань.

Мета і завдання досліджень. Основним завданням досліджень є розробка та експериментальне тестування методики автоматизованого розпізнавання міської рослинності і водойм за багатоспектральними знімками надвисокого просторового розрізнення зі супутника «Jilin-1A» з метою підвищення оперативності та вірогідності відновлення карт міст при одночасному зниженні фінансових витрат.

Вихідні дані для досліджень. За тестову ділянку для відпрацювання методології автоматизованого розпізнавання рослинності та водних об'єктів було обрано територію міста Дубай, одного з найбільших мегаполісів Об'єднаних

Арабських Еміратів, який вкрай динамічно розвивається. Це місто відрізняється дуже високими темпами змін міської інфраструктури, наявністю районів як з висотною, так і з малоповерховою забудовою, а також великою кількістю різноманітних промислових і культурних об'єктів.

У якості вихідних даних були обрані багатоспектральні знімки надвисокого просторового розрізнення зі супутника «Jilin-1A» за 6 лютого 2018 року, що були отримані у видимому та ІЧ-діапазонах (рис. 1).

Для орторектифікації вихідних знімків було обрано цифрову модель рельєфу ASTER DEM із просторовим розрізненням 30 м (рис. 1).

Методологія досліджень. Суть досліджень полягала в розроблену методики автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів за багатоспектральними супутниковими знімками надвисокого просторового розрізнення видимого та ІЧ-діапазонів, тестування розробленої методики на обраній території спостережень і наступного порівняння отриманих результатів з результатами візуального дешифрування [9, 23].

Супутники з багатоспектральними сканерами надвисокого розрізнення

Супутник	Рік запуску	Країна-оператор	Розрізнення сенсорів			Смуга захвату, км	Точність геоприв'язки, м
			просторове PAN/MS, м	радіометричне, біт	кількість каналів		
«Deimos-2»	2015	Канада	1.0/4.0	10	4	12	—
TripleSat-1,2,3» (DMC-3)	2015	Великобританія	1.0/4.0	10	4	23	—
«Jilin-1A»	2015	Китай	0.8/3.2	—	4	48	—
«Komsat-3A»	2015	Корея	0.4/1.6	14	4	12	13
«Cartosat-2C»	2016	Індія	0.65/2.0	10	4	10	100
«PeruSat-1»	2016	Перу	0.7/2.0	12	4	10	—
«SkySat-3...7»	2016	США	0.8/2.0	11	4	8	—
«Gokturk-1A»	2016	Туреччина	0.7/2.8	12	4	20	10
«SuperView-1A/B»	2016	Китай	0.5/2	11	4	12	20
«WorldView-4»	2016	США	0.3/1.2	11	4	13	3
«Cartosat-2D/2E»	2017	Індія	0.65/2.0	10	4	10	100
«Mohammed-VIA»	2017	Марокко	0.7/2.8	12	4	20	—
«SkySat-8...13»	2017	США	0.8/2.0	11	4	8	—
«Cartosat-2F»	2018	Індія	0.65/2.0	10	4	10	100
«SuperView-1C/D»	2018	Китай	0.5/2	11	4	12	20
«KhalifaSat»	2018	ОАЕ	0.72/2.98	10	4	12	—
«Vision-1»	2018	Франція	0.9/3.5	10	4	21	—

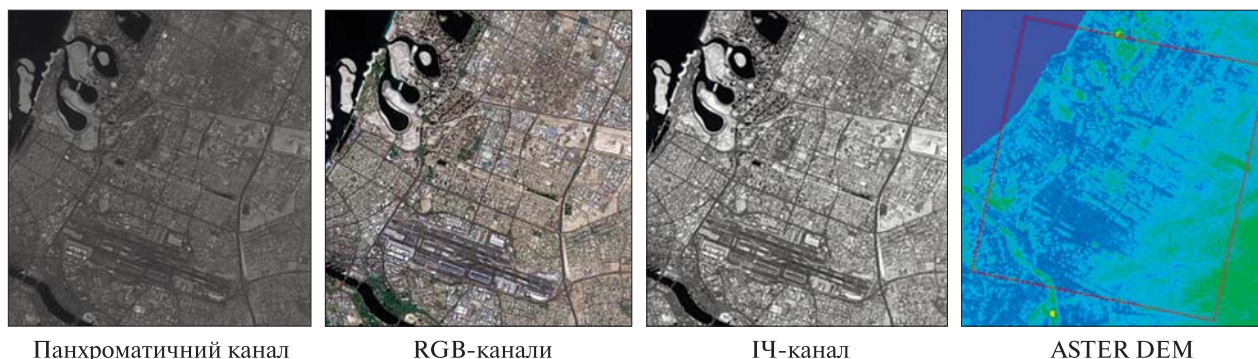


Рис. 1. Вихідні знімки зі супутника «Jilin-1A» і цифрова модель рельєфу

Теоретична частина досліджень включала:

- аналіз технічних характеристик бортової знімальної апаратури видимого та ІЧ-діапазонів, а також вивчення особливостей зйомки та обробки багатоспектральних даних ДЗЗ зі супутника «Jilin-1A»;
- оцінку інформативності стандартних нормалізованих різницевих індексів води і рослинності, що використовують спектральні канали видимого та ІЧ-діапазонів [1, 16];
- визначення основних етапів і послідовності обробки даних ДЗЗ, вибір методів, алгоритмів і програмних інструментів обробки багатоспектральних супутникових знімків зі супутника «Jilin-1A»;
- розробку власних алгоритмів, програм і скриптів для підвищення ступеня автоматизації та оперативності обробки знімків, а також з метою поліпшення інтерфейсу взаємодії з користувачем.

Експериментальна частина досліджень включала:

- проведення автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів за багатоспектральними знімками зі супутника «Jilin-1A»;
- оцінку точності автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів за багатоспектральними знімками зі супутника «Jilin-1A» шляхом порівняння отриманих результатів з результатами візуального розпізнавання рослинності і водних об'єктів, виконаного за тими ж знімками;
- оцінку ймовірності автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів за

багатоспектральними знімками зі супутника «Jilin-1A», використовуючи як еталони знімки видимого та ІЧ-діапазонів зі супутників «Sentinel-2A/B», які були зроблені для тієї ж території у найближчі дати.

В рамках експериментальної частини досліджень були виконані наступні етапи обробки та аналізу знімків із супутника «Jilin-1A»:

- попередня обробка супутникових знімків, що включає орторектифікацію, підвищення просторового розрізнення, кореляційну геоприв'язку до еталона та інформаційне стиснення (компресію);
- тематична обробка супутникових знімків, що включає розрахунок спектральних індексів, бінаризацію, морфологічну фільтрацію і векторизацію розпізнаних рослинних і водних об'єктів;
- визначення точності автоматизованого розпізнавання рослинних і водних об'єктів з використанням еталонів, створених вручну за результатами візуального дешифрування;
- оцінка впливу зменшення розрядності та інформаційного стиснення вихідних знімків на результати автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів.

Нормалізовані різницеві індекси води і рослинності розраховувалися за формулами

$$NDVI = (B_{NIR} - B_{RED}) / (B_{NIR} + B_{RED}),$$

$$NDWI = (B_{GREEN} - B_{SWIR}) / (B_{GREEN} + B_{SWIR}),$$

$$MNDWI = (B_{GREEN} - B_{NIR}) / (B_{GREEN} + B_{NIR}),$$

де B_{NIR} — спектральний канал ближнього ІЧ-діапазону, B_{SWIR} — спектральний канал середнього ІЧ-діапазону, B_{RED} — червоний спектраль-

ний канал видимого діапазону, B_{GREEN} — зелений спектральний канал видимого діапазону.

Оцінка точності класифікації. Найширше використовуються такі методи визначення точності класифікації і розпізнавання супутникових знімків:

- зіставлення результатів класифікації даних ДЗЗ із результатами синхронних наземних спостережень і вимірювань, виконаних безпосередньо під час супутникової зйомки (або з невеликим часовим інтервалом);

- порівняння з результатами автоматичної класифікації цих же даних, отриманих за допомогою сертифікованих програмних пакетів по обробці супутникових знімків (однак при цьому складно або неможливо оцінити точність самого еталона);

- порівняння з результатами ручної класифікації (розпізнавання), проведеними операторами і оціненими експертною групою (цей метод використовується для порівняно невеликих обсягів даних або для обмеженого набору тестових областей, які повинні бути рівномірно розподілені на досліджуваній території).

Через відсутність даних наземних вимірювань досліджуваної території у даній роботі для оцінки точності класифікації використано останній з перерахованих вище методів: порівняння результатів автоматичної класифікації з результатами ручної класифікації, що була виконана для окремих фрагментів RGB-зображення в інтерактивному режимі у програмному середовищі QGIS. Експертна оцінка точності отриманого в такий спосіб еталона в середньому дорівнює 5 % для рослинних об'єктів і 3 % — для водних.

Крім того, у ході дослідження порівнювалась якість розпізнавання рослинності та водних об'єктів з використанням нормалізованих індексних зображень рослинності ($NDVI$) і води ($NDWI$), отриманих із супутників «Jilin-1A» і «Sentinel-2A» за найближчі дати.

Метрики точності класифікації. При обробці супутникових знімків для кількісної оцінки точності автоматичної класифікації найчастіше використовуються такі метрики [24]:

- матриця помилок класифікації для одного класу, що дозволяє визначити кількість нероз-

пізнаних пікселів класу, кількість хибно розпізнаних пікселів класу, а також загальну точність результату класифікації;

- матриця відповідностей для декількох класів (вона обчислюється практично у всіх програмних пакетах по обробці даних ДЗЗ).

- статистичні показники (наприклад, добре відомий і часто використовуваний коефіцієнт Каппа, що обчислюється по матриці відповідностей).

У цьому випадку як основні кількісні показники точності класифікації були обрані матриця відповідностей для двох класів (вода й рослинність) і коефіцієнт Каппа.

Вимоги до апаратного і програмного забезпечення. Розміри файлів багатоспектральних знімків надвисокого просторового розрізнення, як правило, досить великі (наприклад, одна сцена, знята у видимому та ІЧ-діапазоні, може займати декілька гігабайт). Тому для оперативної обробки таких знімків у реальному часі бажано використовувати сучасні комп'ютери із багатоядерними процесорами класу Intel I-7 або вище і обсягом оперативної пам'яті, не меншим за 64 Гбайт. Програмне забезпечення може бути як платним (ERDAS, ENVI, ArcGIS і т. п.), так і вільним (SNAP, SAGA, GRAAS, QGIS, Monteverdi і т. п.). Дані пакети дозволяють працювати як у середовищі MS Windows, так і в середовищі Linux.

Для забезпечення більшого ступеня автоматизації процедур обробки можливе використання відповідних інструментів (наприклад, Imagine Model Maker у пакеті ERDAS, Graph Builder у пакеті SNAP) або мов програмування (наприклад, IDL у пакеті ENVI, Python+GDAL у системі QGIS).

Результати досліджень. У ході обробки вихідних багатоспектральних знімків зі супутника «Jilin-1A» були отримані RGB-знімки підвищеного просторового розрізнення (рис. 2) та індексні зображення $NDVI$ і $NDWI$ (рис. 3).

Порівняння нормалізованих індексних зображень, отриманих із супутників «Jilin-1A» і «Sentinel-2A», показало незначні розбіжності значень $NDVI$ та істотні розбіжності для $NDWI$ і $MNDWI$, що пояснюється використанням різних спектральних каналів ІЧ-діапазону (SWIR і

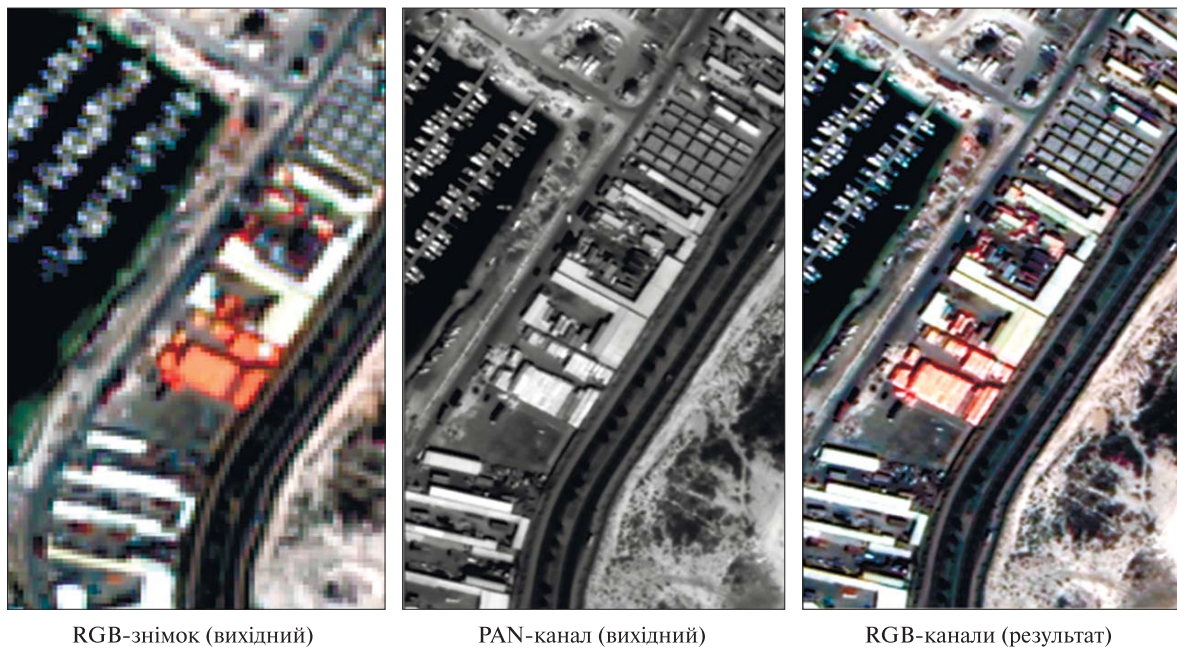


Рис. 2. Фрагменти вихідних знімків і результат підвищення просторового розрізнення

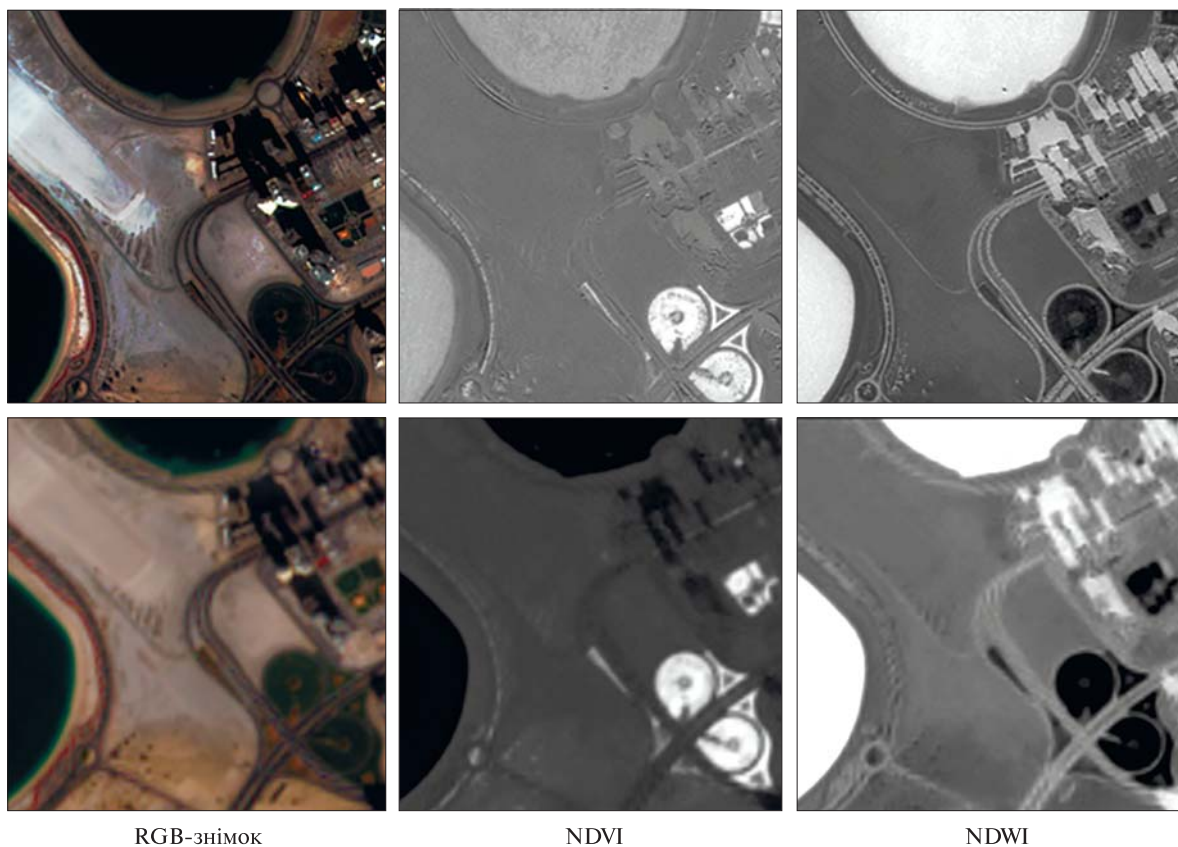


Рис. 3. Розрахунок $NDVI$ і $NDWI$ за даними «Jilin-1A» (угорі) і «Sentinel-2A» (унизу)

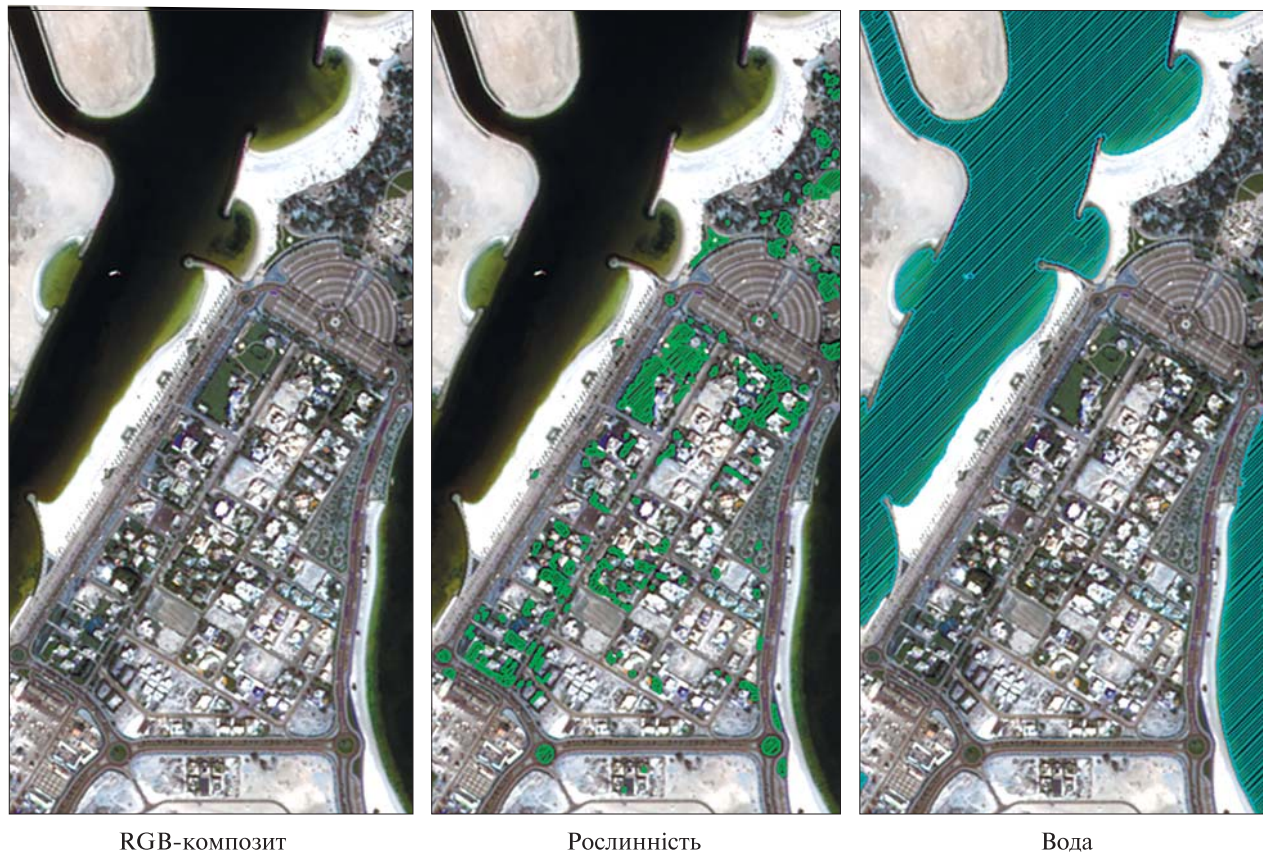


Рис. 4. Приклад автоматизованого розпізнавання рослинних і водних об'єктів

NIR). Дані розбіжності можна істотно зменшити, використовуючи емпірично підібрані коефіцієнти-поправки (індивідуально для кожної пари знімків).

У результаті бінарizaції, морфологічної фільтрації і векторизації індексних зображень були отримані векторні шари розпізнаних рослинних і водних об'єктів (рис. 4).

Аналіз результатів обробки знімків показав достатньо високу точність виділення границь розпізнаних об'єктів та досить добре розділення класів рослинності і води на різних тестових ділянках при тих самих налаштуваннях порогів бінарizaції. При цьому точність автоматичної класифікації (без урахування похибок еталона) для різних тестових ділянок становила 81...92 %, а значення коефіцієнта Каппа лежали у межах від 0.68 до 0.85. Однак слід зазначити, що на деяких тестових ділянках все-таки спостеріга-

лися незначні пропуски або помилкове виділення води і рослинності.

Аналіз впливу зменшення розрядності вихідних знімків (з 10 до 8 біт) і наступного інформаційного стиснення (JPEG lossy і JPEG2000 lossless) на результати автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів підтвердив доцільність і ефективність таких методів. Обсяг збережених і переданих файлів зменшувався суттєво (в 80...100 разів) при незначному зниженні точності класифікації (на 1...2 %).

Основні переваги використання автоматизованого розпізнавання міської рослинності та водойм у порівнянні з наземними методами вимірювань і аерофотозніманням [8, 11, 12]:

- широка оглядовість (зйомка великих територій за короткий строк);
- висока оперативність (виконання зйомки та обробка займають менше однієї доби);

- мінімізація суб'єктивних помилок (високий рівень автоматизації процедур обробки);
- максимальна вірогідність (мінімізація помилок і виключення фальсифікації);
- висока періодичність (можливість здійснювати зйомку з періодичністю до декількох разів на добу, використовуючи угруповання супутників);
- багатодисциплінарність (можливість використання тих самих знімків для вирішення широкого переліку прикладних завдань в інтересах різних споживачів);
- відсутність необхідності одержання юридичних дозволів на зйомку об'єктів, що дозволяє знімати будь-які бажані об'єкти;
- повна безпека (можна проводити моніторинг, не контактуючи при цьому з небезпечним об'єктом, тобто без ризику для здоров'я й життя людей);
- максимальна доступність (можна знімати об'єкти, які розташовуються у важкодоступних місцях);
- висока детальність, достатня для більшості практичних застосувань (просторове розрізнення 30...80 см для комерційних супутників);
- синхронність одержання даних (одночасне спостереження за великою кількістю об'єктів, розташованих на значному віддаленні один від одного);
- висока економічна ефективність (істотне скорочення витрат на створення та експлуатацію системи автоматизованого відновлення цифрових карт міст, особливо при використанні спеціалізованих геоінформаційних вебсервісів).

Область практичного застосування запропонованої методики досить велика, оскільки вона дозволяє більш ефективно та оперативно проводити відновлення карт великих міст, які в наш час повсюдно використовуються представниками різних галузей:

- державними структурами (муніципальними службами, контрольними органами, відомчими організаціями тощо);
- комерційними структурами (туристичними агентствами, торговельними фірмами, транспортними компаніями, приватними підприємствами тощо);

- населенням, що проживає на території мегаполісів і туристами (як правило, це наймасовіший користувач картографічних і геоінформаційних вебсервісів).

Використання в освітньому процесі. Матеріали досліджень були використані при підготовці лекційних і лабораторних занять, включених до складу учбово-методичного комплексу «Обробка багатоспектральних супутникових знімків надвисокого просторового розрізнення», що викладається студентам старших курсів Дніпровського національного університету ім. Олеся Гончара в рамках навчальної дисципліни «Системи ДЗЗ», а також використовується при написанні курсових і дипломних робіт. У ході лабораторних робіт студентами ведеться експериментальне відпрацювання і тестування запропонованої методики з використанням багатоспектральних знімків різних ділянок Землі, отриманих з діючих супутників ДЗЗ.

Напрямки подальших досліджень. На даний час ведуться роботи з модернізації даної методики з метою наступної її реалізації у вигляді геоінформаційного вебсервісу [10, 15], призначеного для автоматизованого відновлення цифрових карт великих міст.

У порівнянні із традиційним використанням спеціалізованих програмних пакетів для обробки даних і потужних комп'ютерів така реалізація запропонованої методики дасть додаткові істотні організаційні, технічні та економічні переваги:

- можливість роботи безпосередньо в браузері, що не вимагає установки додаткового програмного забезпечення у клієнта;
- програмна та апаратна незалежність, що дозволяє використовувати даний вебсервіс на мобільних пристроях;
- можливість збереження результатів обробки знімків на сервері, що дозволяє всім клієнтам користуватися вебсервісом незалежно від їхнього місця перебування;
- висока економічна ефективність (не потрібні потужні комп'ютери і дороге програмне забезпечення);
- мінімальні вимоги до рівня підготовки користувачів (немає необхідності витратити багато

часу на вивчення більших і складних програмних пакетів).

Для підвищення рівня автоматизації і точності географічної прив'язки багатоспектральних знімків зі супутника «Jilin-1A» планується протестувати і використовувати нові алгоритми геоприв'язки з використанням швидкого перетворення Фур'є [6, 7].

Також ведеться експериментальне тестування і подальша модернізація запропонованої методики з використанням багатоспектральних знімків різних ділянок Землі, отриманих з нових оптико-електронних супутників надвисокого просторового розрізнення з метою визначення оптимальних параметрів обробки даних ДЗЗ для основних типів сучасних бортових сканерів з урахуванням регіону та умов зйомки. Крім того, провадиться успішне тестування спрощеної версії даної методики (без процедур попередньої обробки) з використанням багатоспектральних аерофотознімків.

Висновки. Проведено експериментальне тестування розробленої методики автоматизованого розпізнавання рослинності і водойм на території міст за багатоспектральними знімками надвисокого просторового розрізнення видимого та ІЧ-діапазонів, отриманих зі супутника «Jilin-1A».

Результати обробки знімків, отриманих за запропонованою методикою, підтвердили досить високу точність автоматизованого виділення границь розпізнаних водних та рослинних об'єктів з результатами інтерактивного візуального розпізнавання цих же знімків. На різних тестових ділянках отримано добре розділення класів рослинності і води при тих самих налаштуваннях порогів бінарзації.

Основні фактори, що стримують прикладне використання багатоспектральних знімків зі супутника «Jilin-1A» (низька точність геоприв'язки і вузький динамічний діапазон) можуть бути мінімізовані шляхом додаткових процедур на етапах попередньої обробки (кореляційна прив'язка) і тематичної обробки (таблиця коефіцієнтів-поправок для спектральних індексів).

Запропонована методика дозволяє істотно підвищити оперативність і вірогідність відновлення карт великих міст у порівнянні із традиційною наземною GPS-зйомкою та аерофотозніманням при одночасному зниженні фінансових витрат. Завдяки високому ступеню автоматизації і мінімізації необхідних обчислень (у порівнянні з методами, що використовують складні класифікатори і нейронні мережі) розроблена методика може бути реалізована у вигляді геоінформаційного вебсервісу, що функціонує як в інтересах широкого кола державних служб і комерційних структур, так і в інтересах населення мегаполісів і туристів.

Для точнішого визначення попередніх кількісних характеристик якості автоматизованого розпізнавання рослинності і водойм за розробленою методикою у майбутньому бажано синхронно із супутниковою зйомкою проводити зйомки з БПЛА на окремих контрольних ділянках. Також для більш коректної оцінки стійкості і повторюваності результатів автоматизованого розпізнавання міської рослинності та водойм по знімках надвисокого просторового розрізнення доцільно провести відпрацювання запропонованої методики на більшій кількості супутникових знімків зі супутника «Jilin-1A», отриманих у різні сезони та в різних кліматичних зонах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бардиш Б., Бурштинська Х. Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2014. Вип. 2. С. 82—88.
2. Беленок В. Ю., Деркач Д. І., Руль Н. В. Використання аерокосмічних методів та методів обробки даних дистанційного зондування Землі для екологічного моніторингу Каховського водосховища. *Вісник Астрон. школи*. 2017. 13, № 1. С. 54—63.
3. Бурштинська Х. В., Поліщук Б. В., Ковальчук О. Ю. Дослідження методів класифікації космічних знімків високого розрізнення. *Геодезія, картографія та аерофотознімання: Зб. наук. пр.* 2013. Вип. 78. С. 101—110.
4. Вишневський В. І., Шевчук С. А. Оцінювання стану водних об'єктів Києва за даними дистанційного зондування Землі. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2016. № 11. С. 9—14.

5. Зацерковний В. І., Оберемок Н. В., Тішаєв І. В., Казанюк Т. А. Використання технологій геоінформаційних систем та дистанційне зондування землі для моніторингу водних об'єктів. *Наукоємні технології*. 2017. № 1 (33). С. 78–88.
6. Кравченко О. М., Лавренюк М. С., Куссуль Н. М. Алгоритм географічної прив'язки знімків супутника «Січ-2». *Наук. пр. ДонНТУ. Сер. Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2013. № 2 (18). С. 71–79.
7. Куссуль Н. М., Басараб Р. М., Кравченко О. М., Лавренюк М. С., Кригін В. М., Рева К. В. Програмно-технічний комплекс автоматичної географічної прив'язки супутникових даних КС ДЗЗ «Січ-2». *Пробл. програмування*. 2014. № 2-3. С. 303–311.
8. Куссуль Н. М., Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я., Шуміло Л. Л., Яйлимова Г. О., Лавренюк М. С., Колос Л. М., Підгородецька Л. В. Urban atlas для міст України на основі супутникових даних високого розрізнення. *Космічна наука і технологія*. 2019. **25**, № 6. С. 51–60.
9. Мозговой Д. К. Оперативный спутниковый мониторинг растительности и водоемов на территории городов. *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2018. № 17. С. 18–25.
10. Мозговой Д. К., Васильев В. В. Мониторинг природных и антропогенных процессов с помощью веб-сервиса Landsat Viewer. *Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка*. 2016. **24**, № 4, вип. 19. С. 95–101.
11. Пазинич Н. В., Ліщенко Л. П., Мичак А. Г., Філіпович В. Є., Теремко О. М. Використання матеріалів дистанційного зондування Землі при вирішенні завдань екологічної геоморфології в міських умовах (на прикладі долини р. Либідь в м. Києві). *Укр. журн. дистанційного зондування Землі*. 2015. № 5. С. 33–36.
12. Пестова І. О. *Методика оцінювання стану рослинності урбанізованих територій з використанням багатоспектральних космічних знімків*: Дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2015. 172 с.
13. Соколовська А. В. Космічний моніторинг екологічного стану міських територій (на прикладі міста Києва). *Космічна наука і технологія*. 2013. **19**, № 4. С. 44–49.
14. Станкевич С. А., Пестова І. А. Картирование изменений растительного покрова Киевской агломерации на основе долговременных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat. *Современные пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. **11**, № 2. С. 187–196.
15. Станкевич С. А., Пестова І. О. Геоінформаційний сервіс оброблення даних для оцінювання стану рослинності урбанізованих територій. *Вісник геодезії та картографії*. 2014. № 3. С. 23–26.
16. Томченко О. В., Хижняк А. В. Вегетаційні індекси, як інструмент оцінки і моніторингу стану земельних ресурсів. *Новітні технології: зб. наук. пр. ПВНЗ «Університет новітніх технологій»*. 2016. № 1 (1). С. 13–15.
17. Улицький О. А., Єрмаков В. М., Луньова О. В., Буглак О. В. Методика застосування ортотрансформованих космічних знімків для оцінки стану навколишнього середовища. *Космічна наука і технологія*. 2019. **25**, № 4. С. 48–56.
18. Федоровский О. Д., Хижняк А. В., Дьяченко Т. Н., Якимчук В. Г., Подгорняк Д. Л., Суханов К. Ю., Томченко О. В. Космічний моніторинг водних потоків гірлових областей річок (на прикладі Дніпра та Дунаю). *Космічна наука і технологія*. 2017. **23**, № 2. С. 11–16.
19. Філіпович В. Є. Особливості космічного моніторингу урбанізованих ландшафтів. *Фізична географія та геоморфологія*. 2013. Вип. 3. С. 143–150.
20. Шапар А. Г., Тараненко О. С. Визначення техногенних та природних змін на порушених гірничими роботами земель за даними ДЗЗ. *Екологічна безпека*. 2018. № 2 (26). С. 61–69.
21. Шевчук С. А., Шевченко І. А. Визначення екологічного стану водосховищ за допомогою методів дистанційного моніторингу. *Меліорація і водне господарство*. 2013. Вип. 100(2). С. 42–53.
22. Яйлимов Б. Я., Лавренюк М. С., Шелестов А. Ю., Колотій А. В., Яйлимова Г. О., Федоров О. П. Методи визначення істотних змінних для оцінки стану земного покриву. *Космічна наука і технологія*. 2018. **24**, № 4. С. 24–37.
23. Mozgovoy D. K., Hnatushenko V. V., Vasyliiev V. V. Automated recognition of vegetation and water bodies on the territory of megacities in satellite images of visible and IR bands. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* 2018. IV-3. P. 167–172.
24. Mozgovoy D., Hnatushenko V., Vasyliiev V. Accuracy Evaluation of Automated Object Recognition Using Multispectral Aerial Images and Neural Network. *International Conference on Digital Image Processing*. Shanghai, East China Normal University, May 11–14, 2018.
25. Satellite Missions Database. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions> (дата звернення: 19.10.2020).

Стаття надійшла до редакції 19.10.2020; після доопрацювання 01.06.2021

REFERENCES

1. Bardysh B., Burshtynska H. (2014). The use of vegetation indices to identify objects on the Earth's surface. *Suchasni dosyagnennya geodezichnoyi nauky ta vyrobnytstva*, 2, 82–88 [In Ukrainian].
2. Belenok V. Yu., Derkach D. I., Rul N. V. (2017). Use of aerospace methods and image processing methods of remote sensing of the Earth for environmental monitoring of Kakhovka reservoir. *Visnyk Astron. shkoly*, 13, № 1, 54–63 [In Ukrainian].
3. Burshtynska Kh. V., Polishchuk B. V., Kovalchuk O. Yu. (2013). Research of methods for classification of forests using satellite images of high resolution. *Geodeziya, kartografiya ta aerofotoznimannya*, 78, 101–110.
4. Vyshnevskiy V. I., Shevchuk S. A. (2016). Evaluation of status of Kyiv water bodies using remote sensing data. *Ukr. J. remote sensing*, № 11, 9–14 [In Ukrainian].
5. Zatserkovnyi V. I., Oberemok N. V., Tishaev I. V., Kazanyuk T. A. (2017). Use of technologies of geoinformation systems and remote sensing of the Earth for monitoring of water objects. *Science-Based Technologies*, № 1 (33), 78–88 [In Ukrainian].
6. Kravchenko O. M., Lavrenyuk M. S., Kussul N. M. (2013). Sich-2 satellite image georeferencing algorithm. Works of DonNTU. Ser. *Informatics, Cybernetics and Computer Science*, № 2 (18), 71–79 [In Ukrainian].
7. Kussul N. M., Basarab R. M., Kravchenko O. M., Lavrenyuk M. S., Krygin V. M., Reva K. V. (2014). Software technical complex automatically geographical binding of satellite Sich 2 remote sensing data. *Programming Problems*, № 2-3, 303–311 [In Ukrainian].
8. Kussul N. M., Shelestov A. Yu., Yailymov B. Ya., Shumilo L. L., Yailymova H. O., Lavreniuk M. S., Kolos L. M., Pidgorodetska L. V. (2019). Urban Atlas for Ukrainian cities on the basis of high-resolution satellite data. *Space Sci. and Technol.*, 25(6), 51–60 [In Ukrainian].
9. Mozgovoij D. K. (2018). Operational satellite monitoring vegetation and water objects in the territory of cities. *Ukr. J. remote sensing*, № 17, 18–25 [In Russian].
10. Mozgovoy D. K., Vasil'yev V. V. (2016). Monitoring of natural and anthropogenic processes using the Landsat Viewer web service. *Bull. DNU. Rocket and space technology*, 24 (4), 13, 95–101 [In Russian].
11. Pazinich N. V., Lischenko L. P., Mychak A. G., Filipovych V. Ye., Teremenko O. M. (2015). Decision of task of ecological geomorphologic in the Kyiv city with the use of remote sensing data (on the example of Lybid river valley). *Ukr. J. remote sensing*, 5, 33–36 [In Ukrainian].
12. Pestova I. O. (2015). *Methods of estimating the state of vegetation of urban areas using multispectral space images*: Dis. ... Cand. tech. Sci. Kyiv. [In Ukrainian].
13. Sokolovska A. V. (2013). Space monitoring of ecological condition of urban territories (the Kyiv city is used as an example). *Space Science and Technol.*, 19(4), 44–49 [In Ukrainian].
14. Stankevich S. A., Pestova I. A. (2014). Vegetation cover changes mapping within Kiev metropolis agglomeration using long-term time series of Landsat multispectral satellite imagery. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 11, № 2, 187–196 [In Russian].
15. Stankevich S. A., Pestova I. O. (2014). Geoinformation service of data processing for estimation of a condition of vegetation of the urbanized territories. *Bulletin of Geodesy and Cartography*, № 3, 23–26 [In Ukrainian].
16. Tomchenko O. V., Khyzhnyak A. V. (2016). Vegetation indices as a tool for assessing and monitoring the state of land resources. *Emerging technologies*, 1(1), 13–15 [In Ukrainian].
17. Ulytsky O., Yermakov V., Lunova O., Buglak O. (2019). Technique for orthotransformed satellite imagery application in environmental assessment. *Space Science and Technol.*, 25(4), 48–56 [In Ukrainian].
18. Fedorovskiy A. D., Khyzhniak A. V., Diachenko T. N., Yakimchuk V. G., Pidhorniak D. L., Sukhanov K. Yu., Tomchenko O. V. (2017). Space monitoring of water stream in estuarial areas (by the example of the Dnieper and the Danube). *Space Science and Technol.*, 23(2), 11-16 [In Ukrainian].
19. Filipovych V. Ye. (2013). Features of space monitoring of urban landscapes. *Phys. geogr. and geomorphol.* 3, 143–150 [In Ukrainian].
20. Shapar A. H., Taranenko O. S. (2018). Determination of technogenic and natural changes in the mining lands by remote sensing data. *Ecological safety*, № 2 (26), 61–69 [In Ukrainian].
21. Shevchuk S. A., Shevchenko I. A. (2013). Determination of ecological condition of reservoirs by means of methods of remote monitoring. *Land Reclamation and Water Management*, 100(2), 42–53 [In Ukrainian].
22. Yailymov B. Ya., Lavreniuk M. S., Shelestov A. Yu., Kolotii A. V., Yailymova H. O., Fedorov O. P. (2018). Methods of essential variables determination for the Earth's surface state assessing. *Space Science and Technol.*, 24(4), 24-37 [In Ukrainian].
23. Mozgovoy D. K., Hnatushenko V. V., Vasyliov V. V. (2018). Automated recognition of vegetation and water bodies on the territory of megacities in satellite images of visible and IR bands. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-3, 167–172.

24. Mozgovoy D., Hnatushenko V., Vasyliiev V. (2018). *Accuracy evaluation of automated object recognition using multispectral aerial images and neural network*. Int. Conf. on Digital Image Processing. Shanghai, East China Normal University.
25. *Satellite Missions Database*. URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions> (Last accessed: 19.10.2020).

Received 19.10.2020

Revised 01.06.2021

*O. L. Makarov*¹, Deputy General Designer of Missile & Space Launch System Development, Management, Tests and Operations, Ph. D. in Tech., Member of IAA, Honored Machine Builder of Ukraine, Winner of State Awards in Science and Technology of Ukraine

*K. H. Bilousov*¹, Chief Designer – Head of Spacecraft, Measuring Systems and Telecommunications

*D. N. Svyarenko*², Vice-rector for Scientific and Pedagogic Work, Ph. D. in Tech.,

Associate Professor at the Department of Telecommunication Systems and Networks

*V. S. Khoroshylov*¹, Head of Department in the Design Office of Spacecrafts and Sites System Engineering,

Dr. Sci. in Tech., Professor, «Honored Worker of Science and Technology of Ukraine»

*D. K. Mozgovoy*², Associate Professor at the Department of Physics, Electronics, and Computer Systems, Ph. D. in Tech.

*V. M. Popel*¹, Deputy Chief of the Department in the Design Office of Spacecrafts and Sites System Engineering

¹ Yangel Yuzhnoye State Design Office

3, Kryvorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

² Oles Honchar Dnipro National University

72, Gagarina Ave, Dnipro, 49010 Ukraine

AUTOMATIZED RECOGNITION OF URBAN VEGETATION AND WATER BODIES BY JILIN-1A SATELLITE IMAGES

The results of testing the developed techniques for automatized recognition of vegetation and water bodies on the urban territory by multispectral images from the Jilin-1A satellite are given.

The research included automatized recognition of vegetation and water bodies on the selected observation territory based on images with super high spatial resolution in the visual and infrared range and consequent comparison of the obtained results with the results of visual decoding.

The obtained results of processing the images from the Jilin-1A satellite in accordance with the proposed techniques confirmed the sufficiently high accuracy of automatized edge enhancement of recognized objects as compared to the results of interactive visual recognition of these images. Different test areas provided a good separation of vegetation and water types with the same thresholding customization.

The accuracy of automatized classification of vegetation and water bodies (without considering the standard errors) for different test areas was within 81...92 %, and values of kappa-coefficient were within 0.68 to 0.85.

Comparison of normalized index images received from Jilin-1A and Sentinel-2A satellites showed slight discordance in *NDVI* values and significant discordances for *NDWI* and *MNDWI* that are caused by the usage of different spectral channels (SWIR and NIR). These discordances can be sufficiently reduced when using correction coefficients.

Analysis of the influence of output image resolution reduction (from 10 to 8 bit) and subsequent informational compressing (JPEG lossy and JPEG2000 lossless) on results of automatized recognition of vegetation and water bodies confirmed the validity and efficiency of these techniques. The volume of saved and transmitted files significantly decreased (in 80...100 times) with a slight reduction of classification accuracy (by 1...2 %).

The proposed techniques make it possible to increase significantly the efficiency and probability of renewing maps of big cities and to reduce financial expenditures as compared to the traditional ground GPS-surveying and aerosurveying.

The high-level automatization of image processing and minimization of necessary calculations (as compared to techniques that use complex classifiers and neural networks) allow to implement the developed technique as a geographic information web service that satisfies the needs of a wide circle of government services and commercial structures and can be useful for megapolis population and tourists.

Keywords: satellite monitoring, multispectral images, image processing, spectral indices, map renewal.