

**Н. М. Куссуль^{1,3}, А. Ю. Шелестов^{1,2,3}, С. В. Скакун⁵, Р. М. Басараб^{1,2,5},
Б. Я. Яйлимов^{1,2}, М. С. Лавренюк^{1,4}, А. В. Колотій^{1,2,3}, Д. Ю. Ящук^{1,2}**

¹ Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України, Київ

² Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ

³ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ

⁴ Київський національний університет імені Тараса Шевченка

⁵ ТОВ «Інтеграція-Плюс», Київ

РЕТРОСПЕКТИВНА РЕГІОНАЛЬНА КАРТА ЗЕМНОГО ПОКРИВУ ДЛЯ УКРАЇНИ: МЕТОДОЛОГІЯ ПОБУДОВИ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

Пропонується методологія побудови ретроспективних карт земного покриття для території України, заснована на використанні інтелектуальних методів обробки супутникових даних, а саме нейромережевої класифікації часових рядів космічних знімків супутників «Landsat-4», «Landsat-5», «Landsat-7». Отримано карти ґрунтово-рослинного покриття для всієї території України за 1990, 2000 і 2010 рр. з середньою точністю класифікації 95 % (отриманою на незалежній тестовій вибірці).

Ключові слова: ДЗЗ, картографування, класифікація, нейронні мережі, супутникові зображення.

ВСТУП

Кarti земного покриття (land cover maps) відіграють важливу роль для осмислення динаміки екосистем та розв'язання багатьох задач супутникового моніторингу. Зокрема, такі карти необхідні для визначення змін та тенденцій у землекористуванні, підвищення точності класифікації та оцінки площ, аналізу кліматичних змін та їхнього впливу на біосферу тощо.

Глобальні набори даних щодо земного покриття на основі супутникової зйомки почали будувати у 1980-х рр. Як правило, такі карти мали низьке геопросторове розрізнення і не відзначалися високою точністю. Детальний аналіз історії картографування земного покриття наводиться в роботі [10].

Побудова карт на основі даних низького розрізнення спричиняє недооцінку або переоцінку площ певних типів земного покриття чи їхніх змін. Тому з появою у вільному доступі часових рядів даних супутника «Landsat» надзвичайно актуальною стала задача побудови глобальних і регіональних карт земного покриття на основі супутникових зображень високого (30 м) просторового розрізнення. Причому важливою особливістю такої задачі є побудова карт з певною періодичністю, що дозволить аналізувати зміни земного покриття та їхній вплив на біофізику, біогеографію земної поверхні та атмосфери та інші глобальні процеси в екосистемах. В 2013—2014 рр. з'явилося кілька таких карт [1, 7], які в роботі USGS [10] названі картами «нового покоління». Проте навіть за умови валідації цих глобальних карт на численних географічно розподілених полі-

© Н. М. КУССУЛЬ, А. Ю. ШЕЛЕСТОВ, С. В. СКАКУН,
Р. М. БАСАРАБ, Б. Я. ЯЙЛИМОВ, М. С. ЛАВРЕНЮК,
А. В. КОЛОТІЙ, Д. Ю. ЯЩУК, 2015

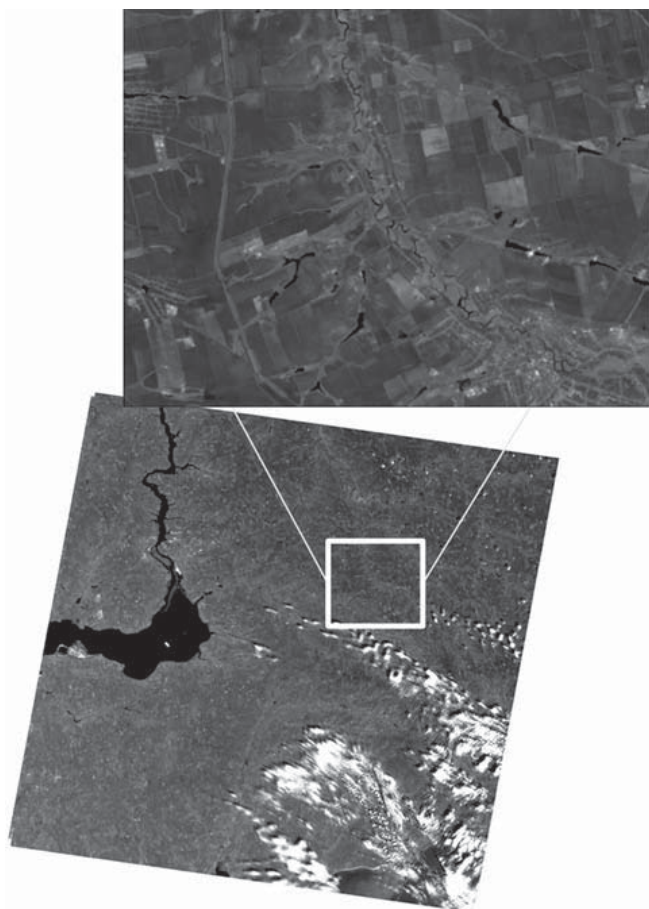


Рис. 1. Композит Color InfraRed зображення КА «Landsat-7 ETM+» (10.05.2000) над Запорізькою областю (Path 177 Row 027)

Таблиця 1. Основні характеристики даних КА «Landsat»

КА	Спектральний канал, просторова роздільна здатність	Розміри сцени
«Landsat-4»	Band 1 Blue (0.45—0.52 мкм) 30 м	185 × 172 км
«Landsat-5»	Band 2 Green (0.52—0.60 мкм) 30 м	
	Band 3 Red (0.63—0.69 мкм) 30 м	
	Band 4 NIR (0.76—0.90 мкм) 30 м	
	Band 5 NIR (1.55—1.75 мкм) 30 м	
	Band 6 Thermal (10.40—12.50 мкм) 60 м	
	Band 7 Mid-Infrared (2.08—2.35 мкм) 30 м	
	Band 8 PAN (0.52—0.90 мкм) 15 м	
«Landsat-7»	Band 1 Blue (0.45—0.52 мкм) 30 м	170 × 185 км
	Band 2 Green (0.52—0.60 мкм) 30 м	
	Band 3 Red (0.63—0.69 мкм) 30 м	
	Band 4 NIR (0.77—0.90 мкм) 30 м	
	Band 5 NIR (1.55—1.75 мкм) 30 м	
	Band 6 Thermal (10.40—12.50 мкм) 60 м	
	Band 7 Mid-Infrared (2.08—2.35 мкм) 30 м	
	Band 8 PAN (0.52—0.90 мкм) 15 м	

гонах їхня точність для конкретних регіонів є недостатньо високою.

Тому актуальною є задача побудови регіональних карт земного покриття з просторовим розрізненням 30 м для обраних проміжків часу. Автори побудували такі карти земного покриття для території України на основі даних супутників «Landsat-4», «Landsat-5», «Landsat-7» за 1990, 2000 та 2010 рр. Це дозволяє оцінити загальні тенденції змін землекористування в Україні за останні 25 років. Нижче обговорюється методологічний підхід до побудови ретроспективних карт земного покриття на основі даних супутників родини «Landsat», включаючи всі стадії підготовки супутникових, навчальних та валідаційних даних, метод класифікації та аналіз отриманих результатів.

СУПУТНИКОВІ ДАНІ

При розв'язанні задачі побудови карт земного покриття території України використано дані космічних апаратів (КА) родини «Landsat». Безкоштовні продукти обробки супутникової інформації, використані в даному дослідженні, отримано з геопорталу геологічної служби США (United States Geological Survey) [2].

Для оцінювання динаміки зміни земного покриття на території України обрано 1990, 2000 та

2010 рр., оскільки саме ці проміжки часу є репрезентативними та дозволяють оцінити динаміку змін землекористування найбільш ефективно. Основні характеристики наявних архівних даних сенсорів ТМ та ЕТМ супутників «Landsat-4», «Landsat-5» та «Landsat-7» наведено в табл. 1.

При побудові карт земного покриття використовуються дані «Landsat» видимого (Band 1, 2, 3), ближнього інфрачервоного (Band 4, 5) та середнього інфрачервоного (Band 7) спектрів з просторовою роздільною здатністю 30 м.

Для супутникових зображень виконуються наступні етапи попередньої обробки:

- радіометрична та геометрична корекція, ортотрансформування, атмосферна корекція (використовуються продукти USGS);
- кожне супутникове зображення перепроєктується у проекцію з рівновеликими площами (Albers Equal Area Projection) для території України;
- для покращення якості даних у випадку їхньої значної захмареності та наявності часового ряду знімків виконується процедура їхнього відновлення відповідно до методики [22].

В дослідженні використано продукт атмосферної корекції даних сенсорів ТМ та ЕТМ+,

створений на основі продуктів рівня обробки L1Gt, або L1T [6], які в свою чергу є радіометрично та геометрично скорегованими даними, що надаються в форматі GeoTIFF.

Для перепроєктування супутникових зображень використано бібліотеку GDAL [23]. Приклад результату атмосферної корекції даних «Landsat-7 ЕТМ+» зображено на рис. 1.

В подальшому саме композити Color InfraRed використано при формуванні навчальних вибірок на основі фотоінтерпретації зображень. Загалом, для побудови карт земного покриття для 1990, 2000 та 2010 рр. всього було використано 463 супутникові зображення (табл. 2).

Точність класифікації земної поверхні напряму залежить не тільки від якості використаних даних, а й від їхньої кількості. У випадку, коли для цільової території отримано відповідний часовий ряд зображень, є можливість врахування динаміки змін земної поверхні і, таким чином, підвищення якості інтерпретації даних. Це дозволяє точніше ідентифікувати такі типи поверхні як луг, воду (виокремити постійні водойми від тимчасово затоплених територій), відділити озимі культури від ярих тощо. Кількісні харак-

Таблиця 2. Супутникова інформація, використана для картографування території України

КА	1989 р.	1990 р.	2000 р.	2010 р.	Об'єм файлів, ГБ
«Landsat-4»	23	5	—	—	30.28
«Landsat-5»	—	89	3	145	259.97
«Landsat-7»	—	—	158	40	218.3

Таблиця 3. Покриття даними «Landsat» території України за досліджувані роки

Кількість знімків	1990 р.		2000 р.		2010 р.	
	Площа, тис. га	Доля від загальної площі, %	Площа, тис. га	Доля від загальної площі, %	Площа, тис. га	Доля від загальної площі, %
1	13953.86	23.11	670.75	1.11	1591.69	2.64
2	9082.06	15.05	6232.47	10.32	9735	16.12
3	11993.07	19.87	23959.82	39.69	16934.36	28.05
4	14750.46	24.44	10012.41	16.59	13543.88	22.44
5	7420.13	12.29	7272.59	12.05	6628.18	10.98
6	3163.23	5.24	9051.59	15.00	5641.71	9.35
7	—	—	3163.18	5.24	6287.99	10.42
Всього	60362.81	100	60362.81	100	60362.81	100

теристики покриття території України знімками «Landsat» наведено у табл. 3. Кожний рядок таблиці містить інформацію про частку території України, покриту конкретною кількістю знімків за певний рік (площу в гектарах, покриту даною кількістю знімків, та її долю від загальної площі території України). У першій графі таблиці вказана максимально можлива кількість супутни-

кових зображень, що перекривають зазначені частки території України у вказані роки.

ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНОЇ ТА ТЕСТОВОЇ ВИБІРОК

Оскільки класифікація здійснювалась за ретроспективними даними, для побудови навчальної вибірки використовувався метод фотоінтерпретації. При цьому у процесі побудови навчальної



Рис. 2. Сформована вибірка для території України за 2010 рік з деталізацією для Миколаївської області

Таблиця 4. Векторні дані

Клас	Кількість полігонів			Доля від загальної кількості, %			Доля від загальної площі, %		
	2010 р.	2000 р.	1990 р.	2010 р.	2000 р.	1990 р.	2010 р.	2000 р.	1990 р.
Штучні об'єкти	30	14	55	0.23	0.12	0.47	0.04	0.03	0.08
Землі сільськогосподарського призначення	6280	5952	5873	48.14	49.88	50.69	40.95	39.5	43.99
Ліс	2338	2336	2296	17.92	19.58	19.82	19.23	19.66	20.36
Луг	2480	2082	1813	19.01	17.45	15.65	9.86	8.12	7.60
Відкритий ґрунт	315	171	156	2.42	1.43	1.35	0.95	1.33	1.00
Вода	1602	1377	1392	12.28	11.54	12.02	28.97	31.36	26.97
Всього	13045	11932	11585	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

вибірки важливо забезпечити пропорційне представлення всіх класів земної поверхні по всій цільовій території [17].

До складу побудованих вибірок входять полігони для шести класів, що відповідають номенклатурі LUCAS [16]. Серед них: штучні об'єкти, землі сільськогосподарського призначення, ліс, луг, відкритий ґрунт та вода. У роботі [4] одним з класів земного покриття розглядаються болота та заболочені території, однак цей клас займає малу частку території України (1.8—2.2 %), тому в роботі не розглянутий.

Кількість полігонів для кожного з класів відповідає пропорціям відповідних площ за статистичними даними. У результаті формування полігонів отримано вибірку, що містить 13045 полігонів для 2010 р., 11932 — для 2000 р. та 11585 — для 1990 р. Детальну інформацію представлено у табл. 4.

Вибірка, побудована окремо для кожної області України, випадковим чином розбивалась на дві множини (рис. 2): навчальну (становить 50 % від загальної кількості полігонів) та тестову (інші 50 %). Дані з навчальної вибірки використовувалися для навчання нейронної мережі, а тестова вибірка — для перевірки узагальнюючої здатності нейронних мереж на незалежних даних [5].

Для виключення із розгляду населених пунктів використовується векторна маска, побудована для всієї території України шляхом оцифрування даних високого розрізнення, а саме актуальної станом на кінець 2014 р. мозаїки зображень території України найвищого просторового розрізнення, представленої сервісом «Планета Земля Google».

ПОПЕРЕДНЯ ОБРОБКА ДАНИХ ТА МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ

Початкові зображення містять шість спектральних каналів та три канали з маскою хмар, тіней та контурів хмар. На основі маски хмарності відбираються зображення, що містять не більше ніж 50 % захмареної території. На наступному кроці відбувається відновлення захмарених пікселів на основі часового ряду (послідовність знімків, що покривають одну територію впро-

довж року) за допомогою карт Кохонена (self-organising map — SOM) [21]. Для класифікації використовується ансамбль нейронних мереж на основі багатосарових перцептронів (MLP — multi-layer perceptron), в якому кількість прихованих нейронів підбирається в залежності від кількості каналів зображень, поданих на навчання. Для класів, мало представлених у вибірці, відбувається розмноження представників даного класу. У результаті навчання нейронних мереж відбувається на вибірках, в яких кількість пікселів кожного класу однакова.

Проведені експерименти показали, що використання ансамблю нейронних мереж підвищує точність класифікації в порівнянні з окремою нейронною мережею [9, 11, 12, 15, 20]. Кожна нейронна мережа після класифікації видає апостеріорну ймовірність належності вхідного пікселя до певного класу. В ансамблі ми рахуємо середню апостеріорну ймовірність виходів усіх мереж:

$$p_i^e = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L p_l^i, \quad (1)$$

$$k^* = \arg \max_{k=1, K} p_k^e, \quad (2)$$

де p_i^e — апостеріорна ймовірність приналежності класу до ансамблю, p_l^i — апостеріорна ймовірність приналежності класу до кожного класифікатора MLP, L — кількість класифікаторів в ансамблі нейронних мереж, K — кількість класів, k^* — клас, до якого належить вхідний піксель ансамблю нейронних мереж.

Відновлення захмарених даних та класифікація реалізовані за допомогою Matlab з використанням додаткових бібліотек: Netlab для проведення класифікації та SOM toolbox для відновлення захмарених пікселів. І хоча дані операції потребують значних комп'ютерних ресурсів, цей недолік в наші дні легко долається шляхом використання розподілених [13, 14] та високопродуктивних обчислень [19].

Після побудови тематичної карти застосовується такий метод фільтрування вибірки [18]. Автоматично знаходимо полігони із навчальної і тестової вибірки, клас яких визначено некоректно. Експерт аналізує помилкові результати класифікації полігонів у порядку спадання долі площі незбігу. Причиною невідповідності може бути

нерівномірність розміщення класів по досліджуваній області або непропорційне їхнє представництво порівнянні з реальними площами, що покривають ці класи. Для детального аналізу результатів та визначення проблемних класів, які варто проаналізувати більш детально, використовуються матриці невідповідностей. Провівши фільтрацію і редагування вибірки, необхідно повторно виконати класифікацію та проаналізувати нові отримані результати на предмет точності та надійності отриманої вибірки.

ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ТА АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Традиційно для оцінки якості класифікації використовують незалежну тестову (валідаційну) вибірку. Спосіб формування тестової вибірки в задачі, що розглядається, детально описаний вище. Загальна кількість елементів тестової вибірки (полігонів) для 2010 р. становить 6431, для 2000 р. — 6053, для 1990 р. — 5406, причому в кожній області доля представників кожного класу у вибірці приблизно відповідає відсотку площі земного покриву, що припадає на даний клас. Попри те, що вибірка для кожної області розбивається перед класифікацією на дві множини однакової потужності, загальна кількість полігонів тестової вибірки менша від 50 %. Це пояснюється тим, що знімки перекриваються, і полігон, що був для однієї сцени тестовим, для іншої може бути навчальним. Тому для забезпечення незалежності тестових даних полігони, що вико-

ристовувались для навчання хоча б один раз, із тестової вибірки виключаються. Якщо кількості полігонів певного класу у тестовій вибірці недостатньо для перевірки точності побудованої тематичної карти, експерт додає додаткові полігони у тестову вибірку на основі фотоінтерпретації зображень.

Приклад просторового розподілу елементів тестової вибірки для Миколаївської області наведено на рис. 2.

В загальному чисельну характеристику якості класифікації на тестовій вибірці наведено у табл. 5 [18].

Як видно із табл. 5, загальна точність класифікації складає 97.5 % — 2010 р., 97.7 % — 2000 р., 97.3 % — 1990 р., а по кожному із класів не є нижчою за 80 %. Найнижча точність класифікації спостерігається для луків (grassland), оскільки цей клас важко відділити від оброблюваних сільськогосподарських земель.

Другий спосіб валідації результатів полягає у проведенні експедицій та зборі наземних даних про типи земного покриву. Однак за умови картографування ретроспективних даних такий підхід реалізувати неможливо.

Статистичні дані не можна вважати цілком узгодженими, проте це єдиний спосіб оцінити точність класифікації не лише на обмеженій, хоч і незалежній вибірці, а на всій території України. Наприклад, за офіційними статистичними даними [3] площа земель сільськогосподарського призначення в Черкаській області зросла май-

Таблиця 5. Точність класифікації для території України (ТВ — точність «виробника», ТК — точність «користувача»)

Клас	2010 р.		2000 р.		1990 р.	
	ТВ, %	ТК, %	ТВ, %	ТК, %	ТВ, %	ТК, %
Штучні об'єкти	100	79.9	73.3	83.9	97.8	92.7
Землі сільськогосподарського призначення	97.5	98.5	97.1	98.6	97.5	98.2
Ліс	97.2	97.4	98.8	98.4	96.7	98.5
Луг	90.7	85.4	90.5	84.6	90	82.5
Відкритий ґрунт	93.6	96.9	96.2	89.7	94.5	93.4
Вода	99.5	99.8	99.5	99.9	99.5	99.7
Загальна точність, %	97.5		97.7		97.3	

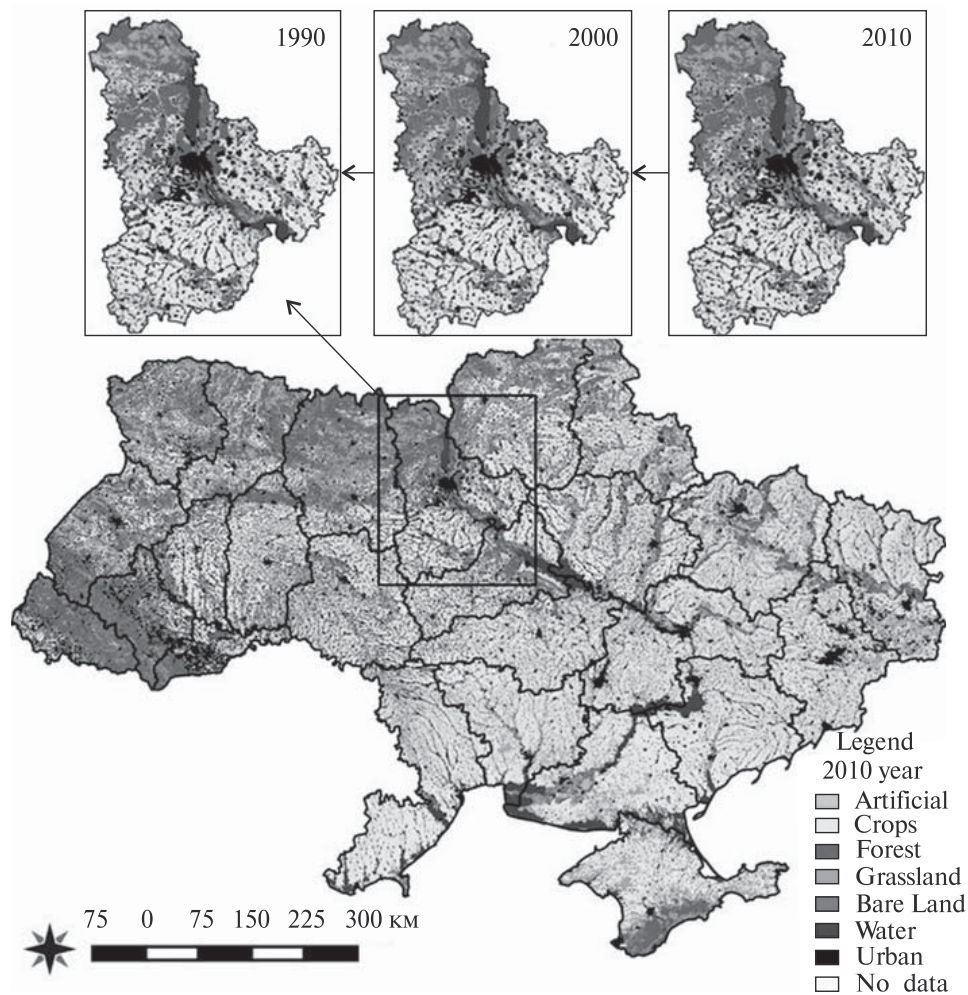


Рис. 3. Карта класифікації території України за 2010 рік та карти класифікації Київської області за 1990, 2000 та 2010 роки

же на 40 % у 2000-му році (порівняно з 1990 р.) і зменшилась практично до попереднього рівня у 2010-му році.

Для переважної більшості областей України помилка класифікації відносно даних офіційної статистики, пронормована до площі області, для луків та посівних площ становить 5 — 15 % (виняток становить Житомирська обл. для луків; АР Крим, Одеська, Запорізька та Чернівецька обл. — для посівних площ), помилка для лісів становить 5 % (за винятком Кіровоградської обл.).

Таким чином, можна стверджувати, що отримані карти класифікації земного покриття відзначаються досить високим рівнем точності для основних типів землекористування.

Аналізуючи побудовані тематичні карти за декілька періодів часу, можна помітити певну закономірність. Зокрема, на рис. 3 для Київської області показано тенденцію зміни земного покриття. Значна частина земель, що були сільськогосподарськими землями у 1990 р., поступово перетворились в луки. Особливо це помітно в північно-західній частині області. Семантичний аналіз отриманих результатів свідчить про істотне збільшення протягом 20 років незалежності України площі необроблюваних земель (grassland), особливо в північно-західній частині України. Розроблена технологія дозволяє будувати карти земного покриття для території України з потрібною періодичністю в автоматизованому режимі.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в роботі запропонована методологія побудови ретроспективних карт земного покриву великих територій за супутниковими даними з просторовим розрізненням 30 м. Запропонована методологія передбачає використання нейромережевої класифікації часових рядів супутникових даних, на яких попередньо відновлено інформацію у захмарених областях, з подальшим об'єднанням отриманих карт для всієї території. Розроблену методологію застосовано для класифікації земного покриву території України за ретроспективними супутниковими даними. Використання інтелектуальних методів обробки часових рядів даних «Landsat» дозволило забезпечити загальну точність класифікації даних за 1990, 2000 та 2010 рр. на рівні 97 % (на незалежній вибірці) і значно покращити якість картографування порівняно з іншими картами земного покриву України з просторовим розрізненням 30 м, наприклад [8].

Основні результати роботи отримано в рамках проекту FP7 «Стимулювання інновацій для глобального моніторингу сільського господарства та його вплив на навколишнє середовище в підтримку GEOGLAM» (Sigma).

1. *Геопортал* ESA CCI Land Cover products: a new generation of satellite-derived global land cover products. Електронний ресурс — режим доступу станом на 15.12.2014: <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/index.php>.
2. *Геопортал* Геологічної служби США (United States Geological Survey). Електронний ресурс — режим доступу станом на 15.12.2014: <http://earthexplorer.usgs.gov>.
3. *Державна служба статистики України*: Статистичний щорічник України за 2010 рік. — Київ: ТОВ «Август Трейд», 2011. — 560 с.
4. *Изменения земных систем в Восточной Европе* / Отв. ред. В. И. Лялько. — Киев, 2010. — 582 с.
5. Скакун С. В., Шелестов А. Ю., Яйлимов Б. Я. и др. Класифікація сільськогосподарських посівів з використанням часових рядів супутникових даних // Індуктивне моделювання складних систем. — 2014. — Вип. 6. — С. 157–166.
6. Chander G., Markham B., Helder D. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // *Remote Sens. Environ.* — 2009. — **113**. — P. 893–903.
7. Chen J., Liao A., Cao X., et al. Global land cover mapping at 30m resolution: A POK-based operational approach // *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens.* — 2015. — **103**. — P. 7–27.
8. Foody G. Status of land cover classification accuracy assessment // *Remote Sens. Environ.* — 2002. — **80**, N 1. — P. 185–201.
9. Gallego J., Kussul N., Skakun S., et al. Efficiency assessment of using satellite data for crop area estimation in Ukraine // *Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinform.* — 2014. — **29**. — P. 22–30.
10. Gira C., Pengrab B., Longe J., Lovelanda T. R. Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring // *Int. J. Appl. Earth Observation and Geoinform.* — 2013. — **25**. — P. 30–37.
11. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., et al. Crop classification in Ukraine using satellite optical and SAR images // *Models and Analyses.* — 2013. — **2**, N 2. — P. 118–128.
12. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Lavreniuk M. Large scale crop classification in Ukraine using multi-temporal Landsat-8 images with missing data // *American Geophysical Union Fall Meeting (AGU 2014)*, San Francisco, USA, December 15-19, 2014.
13. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid and sensor web technologies for environmental monitoring // *Earth Sci. Inform.* — 2009. — **2**, N (1-2). — P. 37–51.
14. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Technologies for satellite data processing and management within international disaster monitoring projects // *Grid and Cloud Database Management Grid* — Fiore, S.; Aloisio, G. (Eds.). — 2011, Springer — P. 279–306.
15. Lavreniuk M., Kussul N., Skakun S. Integrated use of multi-temporal SAR and optical satellite imagery for crop mapping in Ukraine // *American Geophysical Union Fall Meeting (AGU 2014)*, San Francisco, USA, December 15–19, 2014.
16. Lucas survey European statisticians monitor territory. Електронний ресурс — режим доступу станом на 15.12.2014: <http://www.uni-mannheim.de/edz/pdf/eurostat/03/KS-AZ-03-001-EN-N-EN.pdf>
17. Olofsson P., Foody G. M., Herold M., et al. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // *Remote Sens. Environ.* — 2014. — **148**. — P. 42–57.
18. Sánchez J. S., Barandela R., Marqués A. I. Analysis of new techniques to obtain quality training sets // *Pattern Recognit Lett.* — 2003. — **24**, N 7. — P. 1015–1022.
19. Shelestov A., Kussul N., Skakun S. Grid technologies in monitoring systems based on satellite data // *J. Automation and Inform. Sci.* — 2006. — **38**, N 3. — P. 69–80.
20. Skakun S., Kussul N., Basarab R. Dealing with missing data in remote sensing images within land and crop classification // *40th COSPAR Scientific Assembly*, (2–10 August 2014, in Moscow, Russia) — P. 3–14.

21. Skakun S., Kussul N., Basarab R. Restoration of missing data due to clouds on optical satellite imagery using neural networks // ESA SENTINEL-2 for Science Workshop, ESA-ESRIN, Frascati, Rome, Italy, 20-22 May 2014. Available at: http://seom.esa.int/S2forScience2014/files/05_S2forScience-MethodsI_KUSSUL.pdf.
22. Skakun S. V., Basarab R. M. Reconstruction of missing data in time-series of optical satellite images using self-organizing Kohonen Maps // J. Automation and Inform. Sci. — 2014. — 46, N 12. — P. 19—26.
23. Warmerdam F. The geospatial data abstraction library / Eds H. Brent, L. G. Michael // Open Source Approaches in Spatial Data Handling. — Berlin: Springer, 2008. — Vol. 2. — P. 87—104.

Стаття надійшла до редакції 10.03.15

Н. Н. Куссуль, А. Ю. Шелестов, С. В. Скакун,
Р. М. Басараб, Б. Я. Яйлимов, Н. С. Лавренюк,
А. В. Колотий, Д. Ю. Ящук

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины, Киев

РЕТРОСПЕКТИВНАЯ РЕГИОНАЛЬНАЯ КАРТА ЗЕМНОГО ПОКРОВА ДЛЯ УКРАИНЫ: МЕТОДОЛОГИЯ ПОСТРОЕНИЯ И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе предложена методология построения ретроспективных карт земного покрова для территории Украины, которая основана на использовании интеллектуальных методов обработки спутниковых данных, а именно

нейросетевой классификации временных рядов космических снимков спутников «Landsat-4», «Landsat-5», «Landsat-7». В результате её применения получены карты почвенно-растительного покрова для всей территории Украины за 1990, 2000 и 2010 гг. со средней точностью классификации 95 % (полученной на независимой тестовой выборке).

Ключевые слова: ДЗЗ, картографирование, классификация, нейронные сети, спутниковые снимки.

N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, R. Basarab,
B. Yaylimov, M. Lavreniuk, A. Kolotii, D. Yashchuk

Space Research Institute of the National Academy of Science of Ukraine and the National Space Agency of Ukraine, Kyiv

RETROSPECTIVE REGIONAL LEVEL LAND COVER MAP FOR UKRAINE: METHODOLOGY OF DEVELOPMENT AND RESULTS ANALYSIS

This paper presents the methodology of retrospective land cover mapping for Ukrainian territory. Proposed methodology is based on intelligent processing techniques of satellite data, namely neural network classification of time series of Landsat-4, Landsat-5, Landsat-7 imagery (with 30m spatial resolution). As the result of its implementation we've obtained land cover maps for all Ukrainian territory over 1990, 2000 and 2010 years with the average accuracy of 95 % (produced on independent test set).

Key words: Remote sensing, mapping, classification, neural networks, satellite imagery.