

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Яйлимов Богдан Ялкапович

УДК 528.8.04:004.021

**АВТОМАТИЗОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ
КАРТОГРАФУВАННЯ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ НА ОСНОВІ
МЕТОДІВ ТА МОДЕЛЕЙ ЗЛИТТЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ**

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

На правах рукопису.

Робота виконана в Інституті космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України (ІКД НАН України та ДКА України).

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Шелестов Андрій Юрійович,
професор кафедри інформаційної безпеки
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», провідний науковий співробітник
Інституту космічних досліджень НАН України та
ДКА України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент
Зацерковний Віталій Іванович,
завідувач кафедри геоінформатики Київського
Національного університету імені Тараса
Шевченка

кандидат технічних наук, с.н.с.
Козлова Анна Олександрівна,
старший науковий співробітник відділу
геоінформаційних технологій в дистанційному
зондуванні Землі Державної установи «Науковий
Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту
геологічних наук НАН України»

Захист відбудеться «21» грудня 2016 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.205.01 в ІКД НАН України та ДКА України за адресою: 03680, Україна, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1, ауд. №209.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці ІКД НАН України та ДКА України за адресою: 03680, Україна, м. Київ, проспект Академіка Глушкова, 40, корп. 4/1.

Автореферат розісланий «18» листопада 2016 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.205.01



Л.М. Колос

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. З 2014 р. з запуском Landsat 8 та програми Copernicus Європейського космічного агентства у вільному доступі з'явилося багато різномірних (радарних та оптичних) супутникових даних з просторовим розрізненням 10–30 м. Ці дані покривають кожну точку земної поверхні з періодичністю 5-16 днів, а значить, дозволяють розв'язувати нові класи задач моніторингу земної поверхні і будувати карти високого розрізнення.

Однією з важливих задач, які стало можливим розв'язувати на основі цих даних, є побудова карт земного покриття і землекористування розрізненням не нижче 30 м для великих територій (адміністративних областей або цілої країни). До 2014 р. подібні карти земного покриття будувалися лише на основі даних середнього (250-500 м) і низького розрізнення, включали лише до 6 основних класів земного покриття і не дозволяли виділяти окремі сільськогосподарські культури. На сьогодні відома лише єдина глобальна карта з розрізненням 30 м, яка має досить низьку точність.

Водночас існуючі методи обробки даних високого розрізнення ґрунтуються на обробці окремих знімків, а не часових рядів, та не передбачають спільне використання оптичних і радарних даних. Крім того, враховуючи невелику площу покриття земної поверхні одним знімком, ці методи не дозволяють будувати карти для великих територій і потребують розробки спеціальних методів геопросторового об'єднання карт, що перетинаються. Враховуючи значні об'єми супутникових даних, для розв'язання задачі картографування великих територій необхідно створювати автоматизовані технології.

Для подолання зазначених труднощів і автоматизації процесу обробки супутникових даних необхідно розвивати методи злиття (data fusion) різночасових гетерогенних даних. Саме ця задача розв'язується в дисертаційній роботі. Тому дана дисертаційна робота, присвячена розробці методів та моделей обробки та злиття супутникових даних великого об'єму, а також їх використанню для побудови карт земного покриття шляхом розробки автоматизованої інформаційної технології картографування земного покриття для території України, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відділі космічних інформаційних технологій та систем Інституту космічних досліджень НАН України та ДКА України в межах наступних наукових тем і проектів:

- Конкурсного проекту Національної академії наук України «Розроблення методів та моделей візуалізації гетерогенної інформації для задач супутникового моніторингу надзвичайних ситуацій» (2012 р.);

- Конкурсного проекту Державного космічного агентства України «Системний проект української складової Міжнародної аерокосмічної системи глобального моніторингу» (2013 р.);

- Проекту цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень «Розроблення науково-методичного забезпечення поліпшення точності геоприв'язки даних космічних апаратів» (2013 р.);

- Міжнародного проекту Європейського космічного агентства «Sentinel 2 for Agriculture» (2014-2017 pp.);
- Державного контракту ДКАУ «Створення інформаційної системи забезпечення користувачів аерокосмічними даними» (0108U009605) (2012 p.);
- Міжнародного проекту GEO по створенню міжнародної мережі полігонів сільськогосподарського призначення JECAM (Joint Experiment of Crop Assessment and Monitoring);
- Гранту Єврокомісії в межах Рамкової Програми FP7 «Стимулювання інновацій для глобального моніторингу сільського господарства та оцінки його впливу на навколишнє середовище як підтримка ініціативи GEOGLAM (SIGMA)» (0114U003046).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи дисертаційного дослідження є створення автоматизованої інформаційної технології картографування земного покриття на основі злиття супутникових та інших геопросторових даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі **задачі**:

- проаналізувати проблеми побудови карт земного покриття, існуючі методи та їх недоліки, запропонувати шляхи їх вирішення;
- вдосконалити метод класифікації земного покриття за супутниковими даними великих обсягів на основі використання ансамблю нейронних мереж та забезпечити його ефективність на основі часових рядів супутникових даних великих обсягів;
- розробити методи злиття геопросторових супутникових даних на рівні пікселів та прийняття рішень для побудови карти класифікації для великої території;
- розробити інформаційну технологію побудови карт земного покриття на основі сервіс-орієнтованого підходу.

Об'єкт дослідження: методи тематичної обробки супутникових даних, що здійснюються для отримання карти класифікації земного покриття.

Предмет дослідження: процеси та інформаційні технології обробки великих об'ємів даних спостереження Землі для великих територій.

Методи дослідження: структурно-функціональний аналіз, статистичний аналіз, геопросторовий аналіз, регресійне моделювання, інтелектуальні методи обробки даних, нейронні мережі.

Наукова новизна результатів, отриманих автором, полягає у наступному:

Отримав подальший розвиток метод злиття гетерогенних супутникових даних на рівні пікселів, у якому розширюється простір ознак шляхом інтеграції різночасових даних різної природи (оптичних та радарних) для картографування земного покриття.

Удосконалено метод класифікації земного покриття за супутниковими даними великих обсягів на основі використання ансамблю нейронних мереж, що визначають апостеріорну ймовірність належності кожного пікселя до відповідного класу.

Вперше розроблено методи злиття даних на рівні прийняття рішень для побудови карти з використанням апостеріорної ймовірності належності кожного пікселя до відповідного класу та маски хмарності для великої території.

Вперше в межах сервіс-орієнтованого підходу розроблено автоматизовану інформаційну технологію картографування земного покриття для всієї території України.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

Розроблені методи побудови карт класифікації земного покриття для великих територій реалізовано у формі інформаційної технології в межах сервіс-орієнтованої системи для автоматизованої пакетної обробки великих об'ємів супутникових даних. Зокрема ці методи використано в рамках проекту Єврокомісії SIGMA для побудови карт земного покриття на основі даних часових рядів оптичних та радіолокаційних зображень з метою подальшої побудови карт класифікації поверхні Землі. Створені карти включено до складу глобального геопросторового шару оброблюваних земель. Розроблену методологію покладено в основу методу нейромережевої класифікації для проекту Sen2Agri.

Особистий внесок здобувача. Всі основні результати дисертаційної роботи отримані автором особисто. Серед 12 публікацій у фахових виданнях 1 стаття написана здобувачем одноосібно [1]. В публікаціях, написаних у співавторстві, здобувачем належать такі результати. У роботі [2] здобувачем запропоновано використовувати технології злиття супутникових даних різного просторового розрізнення, векторні дані про межі полів та дані наземних досліджень для оцінки збитку від посухи. У роботі [3] здобувачем проведено дослідження ефективності використання ансамблю нейронних мереж. У статті [4] запропоновано метод злиття даних на основі маски хмарності та точності класифікації для побудови карт земного покриття великих територій. У роботі [5] здобувачем запропоновано метод побудови навчальної та тестової вибірки для великих територій за ретроспективними даними. У публікації [6] здобувачем запропоновано використовувати маску озимої пшениці, побудованої на основі методів злиття даних для прогнозування врожайності на рівні регіону. У роботі [7] здобувачем досліджено ефективність використання часових рядів супутникових даних. У роботі [8] з використанням методів злиття даних на рівні пікселів, що були розроблені здобувачем, побудовані карти порушень сівозміни. В публікаціях [9, 10] розроблені методи злиття даних на рівні пікселів та прийняття рішень використані для побудови карти змін. У роботах [11, 12] здобувачем запропоновано архітектуру сервіс-орієнтованої системи для підтримки прийняття рішень при надзвичайних ситуаціях.

Апробація результатів дисертації. Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на: V міжнародній науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта» (Україна, Київ, 13.11.2014 р.) [13], XV міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Человек и космос» (Україна, Дніпропетровськ, 10-12.04.2014 р.) [14], II міжнародній науково-технічній конференції «Обчислювальний інтелект» (Україна, Черкаси, 14-18.05.2013 р.) [15], міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2013» (Україна, Київ, 13-14.06.2013 р.) [16], 13-тій українській конференції з космічних досліджень (Україна, Євпаторія, 02-06.09.2013 р.) [17], 11-тій всеросійській

відкритій конференції «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Росія, Москва ІКД РАН 11–15.11.2013 р.) [18], четвертій міжнародній конференції «GEO – UA 2014, аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (Україна, Київ, 26–30.05.2014 р.) [19], всеукраїнській науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів», (22 – 23 лютого 2013 року, м. Рівне, РДГУ – НУВГП) [20], 14-тій українській конференція з космічних досліджень, (8-12 вересня 2014 р., м. Ужгород) [21], II міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2014», (м. Київ, НУБіП України, 26-27 червня 2014 р.) [22], міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (м. Рівне, 19 – 22 лютого 2015 року) [23], міжнародній науковій конференції «Астрономічна школа молодих вчених. Актуальні проблеми астрономії і космонавтики» (м. Житомир, 20 – 22 травня 2015 року) [24], III міжнародній науково-практичній конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2015», (м. Київ, НУБіП України, 25-26 червня 2015 р.) [25], International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015 (IGARSS 2015) [26], XIV Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики» (м. Київ, Україна, 26-28 травня 2016 р.) [27], Materials of reports of the 5th International Conference «GEO-UA 2016» (Kyiv, October 10-14, 2016) [28].

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 28 робіт, з яких 12 – це статті у журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових видань затверджених МОН України за спеціальністю дисертації (1 з них без співавторів, а 4 включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), та 16 – публікацій у матеріалах конференцій (у тому числі, міжнародних).

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Робота містить 159 сторінок, у тому числі: 133 сторінок основного тексту, 58 рисунків, 20 таблиць, список використаних джерел із 207 найменувань на 26 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, детально розглянуто поточний стан проблеми, яка вирішується в дисертаційному дослідженні, обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета й завдання дослідження, відзначена наукова новизна та практичне значення отриманих результатів.

Перший розділ – «Сучасний стан проблеми картографування земного покриття» – присвячено аналізу літератури за темою дисертації, викладені основні підходи та методи, які використовуються для картографування земного покриття як в Україні, так і у світі. Проаналізовані існуючі глобальні карти земного покриття (MODIS Land Cover 500 м, GLOBCOVER 300 м та ін.), основними недоліками яких є низьке просторове розрізнення. Існуюча карта China Global Land Cover має просторове розрізнення 30 м, проте побудована з

використанням вибірки лише по одній країні, внаслідок чого не є достатньо точною. Проведено аналіз сучасних безкоштовних супутникових даних, що можуть бути використані для побудови карт земного покриття. Проаналізовано методи класифікації земного покриття (класифікатор на основі дерева рішень, метод опорних векторів, нейронні мережі та ін.) та обґрунтовано, що нейронні мережі є оптимальними для задачі класифікації земного покриття. Описана загальна постановка задачі картографування земної поверхні для великих територій та інші проблеми, які будуть вирішені в дисертаційному дослідженні.

У другому розділі – *«Методи картографування земного покриття на основі злиття даних»* – запропоновано загальну схему розв’язання задачі картографування земного покриття для великих територій на основі даних високого просторового розрізнення, як задачі автоматизованої обробки великих обсягів геопросторових даних, які можуть містити невизначеності (наприклад, області, покриті хмарним покриттям).

Для розв’язання задачі побудови карти земного покриття високого розрізнення для великих територій пропонується підхід, що базується на використанні трьох різних парадигм з різних областей комп’ютерних наук: принципу «розділяй і володарюй» з теорії алгоритмів, методу активного навчання з теорії машинного навчання і методу відновлення зображень з області комп’ютерної обробки цифрових зображень.

Для мінімізації вимог до обчислювальних ресурсів системи при розв’язанні задачі обробки великих обсягів даних територію України пропонується розбити на області, що не перетинаються (згідно з принципом «розділяй і володарюй») та розв’язувати задачу класифікації для кожної з них окремо. У загальному випадку це можна здійснити двома способами:

- розбиття на області однакового розміру з урахуванням покриття супутниковими даними;
- розбиття з урахуванням адміністративних областей.

Другий підхід не забезпечує рівність площ елементарних областей, однак він дозволяє залучити незалежну інформацію (наприклад, офіційні статистичні дані, які доступні для адміністративних областей України) для валідації отриманих карт. Слід зазначити, що саме такий підхід був використаний при створенні карти класів поверхні Землі CORINE, коли кожна країна забезпечувала дослідження своєї власної території.

Сформульовано основні етапи розв’язання задачі картографування земного покриття великої території на основі методів злиття даних:

- збір та попередня обробка даних;
- класифікація, побудова результуючої карти, покращення отриманих результатів класифікації (постобробка);
- візуалізація.

Загальна схема розв’язання задачі картографування земного покриття в межах дисертаційного дослідження наведена на рис. 1.

На першому етапі попередньої обробки даних здійснюється радіометрична та геометрична корекція, ортотрансформування, атмосферна корекція (лише для оптичних даних), фільтрація знімків (лише для радарних даних), перепроєктування даних до однієї проекції, зведення їх до одного

просторового розрізнення та нормалізація. При цьому здобувачем пропонується розширити вектор інформативних ознак для подальшої класифікації шляхом злиття різночасових даних різної природи на рівні пікселів (оптичних та радарних, причому оптичні мають значення пікселів, яких не було в місцях, де дані були захмарені (за рахунок відновлення пропусків даних)).

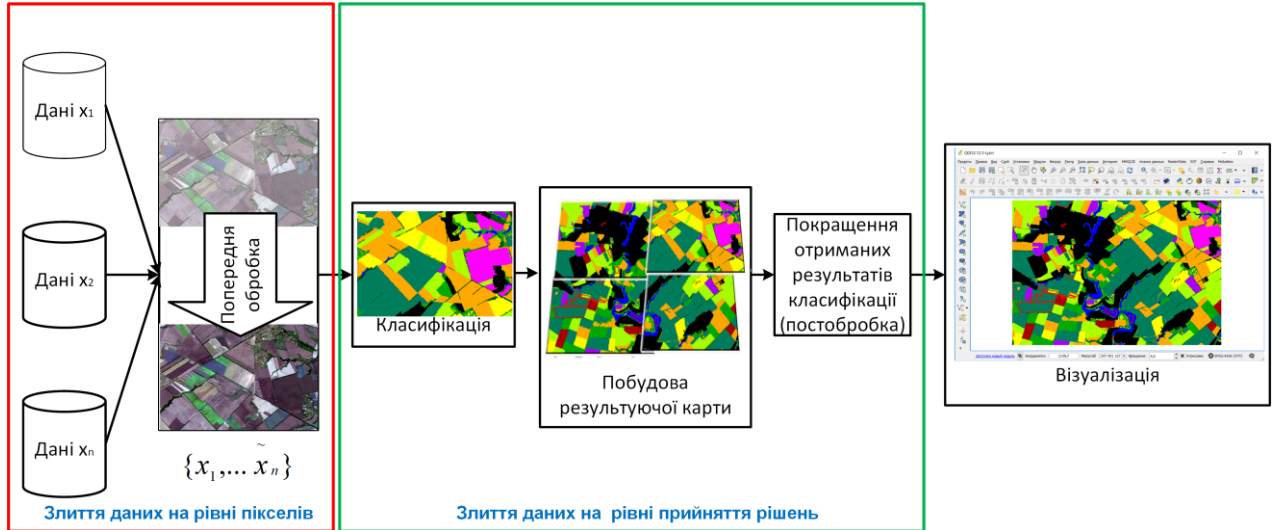


Рис. 1. Схема розв'язання задачі картографування земного покриття

Наступним етапом картографування земного покриття є класифікація даних. В якості метода класифікації пропонується використовувати ансамбль нейронних мереж на основі багатошарових перцептронів (MLP – multi-layer perceptron), в якому кількість прихованих нейронів підбирається в залежності від кількості каналів зображень, поданих на навчання (обґрунтування вибору метода класифікації приведено в дисертаційній роботі).

Під час навчання нейронної мережі з використанням багатошарового перцептрона функція помилок крос-ентропії зводиться до мінімуму:

$$E(\mathbf{w}) = -\ln p(\mathbf{T} | \mathbf{w}) = -\sum_{n=1}^N \sum_{k=1}^K t_{nk} \ln y_{nk} \rightarrow \min, \quad (1)$$

де $\mathbf{w}$ — вектор вагових коефіцієнтів, $\mathbf{T}$ — множина, яка складається з вектору спектральних каналів для кожного пікселя та відповідного йому класу k в навчальній вибірці; N — кількість полігонів у вибірці; K — число класів; t_{nk} — цільові виходи; y_{nk} — виходи MLP, $p(\cdot)$ — умовна ймовірність.

Кожна нейронна мережа після класифікації видає апостеріорну ймовірність належності вхідного пікселя до певного класу. В ансамблі рахується середня апостеріорна ймовірність виходів усіх мереж. Використовуючи отримані ймовірності здобувачем пропонується проводити злиття даних на рівні прийняття рішень для визначення належності кожного пікселя до певного класу, результатом якого є карта класифікації для кожної із сцен.

Вихідний образ відносять до класу з максимальною апостеріорною ймовірністю (рис. 2):

$$k^* = \arg \max_{k=1, K} p_k^e, \quad p_i^e = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L p_i^l, \quad (2)$$

де k^* — клас, до якого відносить вхідний образ ансамбль класифікаторів, p_i^e — апостеріорна ймовірність належності класу для ансамблю, p_i^l — апостеріорна ймовірність належності класу для кожного класифікатора MLP, L — кількість класифікаторів в ансамблі, K — кількість класів.

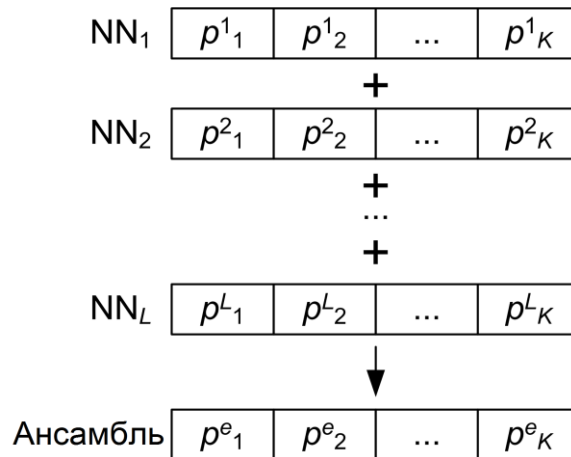


Рис. 2. Злиття даних на рівні прийняття рішень: визначення результатів ансамблю класифікаторів

В результаті класифікації будуються карти земного покриття для кожної сцени, що покриває досліджувану територію. Ці карти можуть перетинатися між собою (рис. 3). Тому для побудови результуючої карти необхідно прийняти рішення щодо належності пікселя певному класу в місцях перетину. Для цього здобувачем пропонуються методи злиття даних на рівні прийняття рішень для отримання цілісної карти.

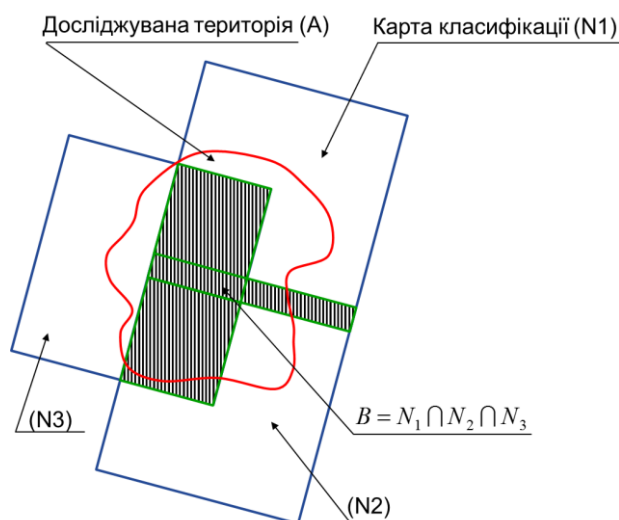


Рис. 3. Неузгодженість результатів класифікації

Перший метод злиття (M1) полягає в попиксельному прийнятті рішення на основі ймовірності належності даного пікселя певному класу на кожному

зображенні, що покриває даний піксель:

$$\text{Im}_{res}(i, j) = \begin{cases} \text{Im}_1(i, j), P(\text{Im}_1(i, j)) > P(\text{Im}_2(i, j)) \\ \text{Im}_2(i, j), P(\text{Im}_1(i, j)) \leq P(\text{Im}_2(i, j)) \end{cases}, \quad (3)$$

де $\text{Im}_1(i, j)$, $\text{Im}_2(i, j)$ — результати класифікації пікселя (i, j) по кожному окремому знімку, $\text{Im}_{res}(i, j)$ — остаточна класифікація, $P(\cdot) = UA(\cdot)$, де $P(\cdot)$ — ймовірність події з матриці невідповідності (точність користувача).

Другий метод злиття (M2) зводиться до наступного: рішення про належність даного пікселя деякому класу приймається з урахуванням якості знімків, що його покривають, тобто маски відновлених пікселів, оскільки результат класифікації відновлених пікселів не відрізняється високою надійністю:

$$\text{Im}_{res}(i, j) = \begin{cases} \text{Im}_1(i, j), \text{Mask}(\text{Im}_1) < \text{Mask}(\text{Im}_2) \\ \text{Im}_2(i, j), \text{Mask}(\text{Im}_1) \geq \text{Mask}(\text{Im}_2) \end{cases}, \quad (4)$$

де $\text{Im}_1(i, j)$, $\text{Im}_2(i, j)$ — результати класифікації пікселя (i, j) по кожному окремому знімку, $\text{Im}_{res}(i, j)$ — остаточний результат класифікації, $\text{Mask}(\text{Im}_i)$ — кількість відновлених пікселів на зображенні, результатом класифікації якого є Im_i , $i = 1, 2$.

У межах *третього методу злиття (M3)* пропонується використовувати класифікацію на основі часових рядів супутникових даних, а для отримання результуючої карти застосовується метод із урахуванням апостеріорної ймовірності належності кожного пікселя певному класу та маски хмарності.

$$\text{Im}_{res}(i, j, k) = \begin{cases} \text{Im}_{11}(i, j, k), P(\text{Im}_{11}(i, j, k)) > P(\text{Im}_{22}(i, j, k)) \\ \text{Im}_{22}(i, j, k), P(\text{Im}_{11}(i, j, k)) \leq P(\text{Im}_{22}(i, j, k)) \end{cases}, \quad (5)$$

де $\text{Im}_{11}(i, j, k)$, $\text{Im}_{22}(i, j, k)$ — результати класифікації пікселя (i, j) на основі часового ряду, $\text{Im}_{res}(i, j, k)$ — остаточний результат класифікації, k — кількість захмарених пікселів на зображенні, $P(\cdot) = p_i^e$, де $P(\cdot)$ — апостеріорна ймовірність, отримана при класифікації.

Часто можуть виникати помилки класифікації, коли в межах одного полігона будуть пікселі, що належать різним класам, так як класифікація виконується попінкельно, що потребує додаткового етапу постобробки. Для покращення карти земного покриття пропонуються методи злиття растрової (карта класифікації) та векторної (містить межі полігонів) інформації. У результаті в межах кожного полігона будуть пікселі, що відносяться до одного класу.

Перший метод злиття растрової та векторної інформації базується на методі голосування – полігону присвоюється той клас, пікселів якого виявилось найбільше:

$$K_{out}^i = \arg \max_j \left(\sum_{j=1}^K k_{out}^j \right), \quad (6)$$

де K_{out}^i — значення класу для i -го полігону,

$$k_{out}^j(x, y) = \begin{cases} 0, k_{out}(x, y) \neq j \\ 1, k_{out}(x, y) = j \end{cases}, (x, y) \in p^i. \quad (7)$$

В роботі запропоновано враховувати відновлені значення відсутніх пікселів на знімках як менш надійні з певними штрафними ваговими коефіцієнтами (зважений метод голосування). Інший метод враховує кількість захмарених знімків, що використовувались під час класифікації. Таким чином, більш надійними вважаються результати класифікації для найменш захмарених пікселів.

Для призначення штрафних ваг враховуємо маску хмарності, яка містить кількість незахмарених знімків для кожного пікселя $m(i, j)$. Тоді штрафні ваги

обчислюємо за формулою $w(i, j) = \begin{cases} \frac{1}{m(i, j)^2}, m(i, j) \neq 0 \\ 0, m(i, j) = 0 \end{cases}$, і метод голосування

реалізується на основі співвідношення:

$$K_{out}^i = \arg \max_j \left(\sum_{j=1}^K k_{out}^j \cdot w(x, y) \right), (x, y) \in p^i. \quad (8)$$

У третьому розділі – «Експериментальні дослідження розроблених методів злиття супутникових даних» – викладено результати експериментальних досліджень з використанням методів злиття супутникових даних при розв’язанні задачі побудови карти земного покриття.

В першому експерименті проведено дослідження доцільності використання ансамблю нейронних мереж в порівнянні з окремою нейронною мережею. Основним критерієм якості класифікатора є точність результатів класифікації на тестовій вибірці. Для проведення експерименту порівняно три різні ансамблеві архітектури. В першій з них використано 1 класифікатор, в другій — ансамбль із 5 класифікаторів, в третій — ансамбль із 7 класифікаторів. Проведені експерименти показали, що використання ансамблю нейронних мереж (2) підвищує точність класифікації в порівнянні з окремою нейронною мережею більше ніж на 15% для ярих культур та на 6,5% для необроблюваних земель.

Наступний експеримент полягає у визначенні ефективності використання часових рядів супутникових даних для побудови карт земного покриття. Для проведення даного експерименту було використано часовий ряд знімків супутника Landsat (08.04.2010, 11.07.2010, 29.07.2010, 30.08.2010). Отримані результати експерименту на незалежній тестовій вибірці підтверджують перевагу класифікації земного покриття на основі часового ряду супутникових зображень для тих класів, які змінюються під час вегетаційного періоду (наприклад, для земель сільськогосподарського призначення). Для таких класів загальна точність класифікації на основі часових рядів даних на 8% більша, ніж при використанні одного знімку для побудови карти земного покриття.

Проведено експеримент щодо дослідження ефективності злиття на рівні пікселів різночасових оптичних (Landsat-8) та радіолокаційних (Sentinel-1) супутникових зображень для класифікації земного покриття та порівняно результати класифікації з використанням оптичних та радарних даних окремо. Загальна точність карти класифікації лише за оптичними даними становить –

85,2%, а додавання радарних даних дозволило збільшити її точність на 7,5% (табл. 1). Злиття радіолокаційних супутникових зображень та оптичних даних значно дозволило покращити точність класифікації літніх культур (наприклад, сої – на 17,4% ТВ та 18,3% ТК; кукурудзи – на 9,7% ТВ та 6,8% ТК). Аналогічну задачу можна розв'язувати з використанням супутникових даних Sentinel-2.

Таблиця 1. Результати класифікації Київської області по різномірних супутникових даних, 2015 р.

	Супутник Клас	Landsat-8		Sentinel-1		Landsat-8+ Sentinel-1	
	Загальна точність, %	85,2		91,4		92,7	
	Індекс Каппа	0.83		0.9		0.91	
№		ТВ, %	ТК, %	ТВ, %	ТК, %	ТВ, %	ТК, %
1	Штучні об'єкти	-	-	-	-	-	-
2	Озима пшениця	90,6	94,4	93	95,5	95,2	95,3
3	Озимий ріпак	94,6	78,3	97,6	78,3	97,5	78,4
4	Ярі культури	45,4	76,5	49,8	71,5	50,6	96,7
5	Кукурудза	80,9	84	89,3	89,7	90,6	90,8
6	Буряк	90,4	86,7	94,7	97,3	97,5	98,4
7	Соняшник	94,1	93,1	99,3	93,1	99,2	96,3
8	Соя	63,6	65,6	79,5	83,8	81	83,9
9	Інші культури	-	-	-	-	-	-
10	Ліси	98,7	96,9	99,4	99,2	99,6	99,7
11	Необроблювані землі	79,2	89,3	92,3	85,9	94,5	91,6
12	Порожня земля	64,6	98,7	79,9	69	90,6	82,8
13	Водні об'єкти	97	99,7	98,7	99,9	99,8	99,9

Задачею наступного експерименту є аналіз трьох методів злиття даних на рівні прийняття рішень (M1, M2, M3) для побудованих карт земного покриття для великої території, використовуючи карти класифікації по кожному тайлу, та порівняно їх ефективність. Як видно з рис. 4-5, у кожній з секцій (розділених вертикальними пунктирними лініями) зліва направо показані результати злиття на основі ймовірності M1 (3), з урахуванням маски хмарності M2 (4) та злиття даних із урахуванням апостеріорної ймовірності кожного пікселя та маски M3 (5). Використання третього методу злиття даних M3 (5), забезпечує найкращі результати як для точності «користувача», так і для точності «виробника». Найбільший розкид результатів спостерігається при класифікації необроблюваних земель. Це пояснюється схожістю спектральних характеристик різних типів рослинності (на сільськогосподарських і несільськогосподарських територіях), а значить виникає складність відділення необроблюваних земель від сільськогосподарських культур.

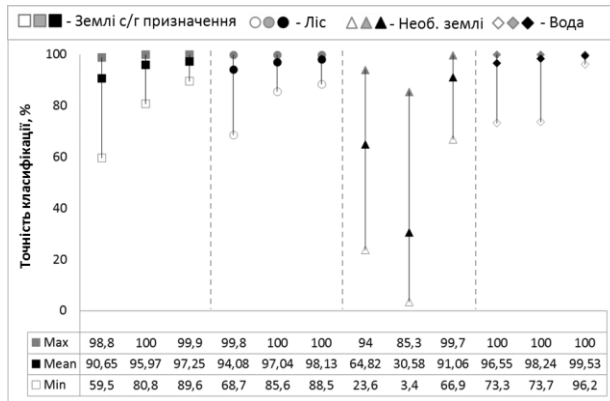


Рис. 4. Розкид «точності виробника» для трьох методів злиття даних при побудові карт класифікації за 2010 р.

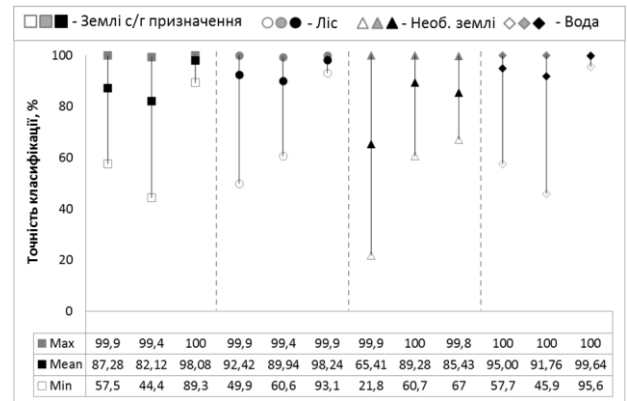


Рис. 5. Розкид «точності користувача» для трьох методів злиття даних при побудові карт класифікації за 2010 р.

Враховуючи перевагу методу злиття МЗ, саме він був використаний для побудови результуючих карт класифікації за 1990, 2000 і 2010 рр. (табл. 2) Загальна точність результатів класифікації для України (за 2010 р.) на 8% вища в порівнянні з глобальною картою рослинного покриву GlobeLand30-2010.

Таблиця 2. Загальна точність, ТВ і ТК для класифікації території України в 2010 році та GlobeLand30-2010

Рік	2010		2000		1990		GlobeLand30-2010	
Клас	ТВ, %	ТК, %	ТВ, %	ТК, %	ТВ, %	ТК, %	ТВ, %	ТК, %
Штучні землі	100	79.9	73.3	83.9	97.8	92.7	3.4	79.5
Землі сільськогосподарського призначення	97.5	98.5	97.1	98.6	97.5	98.2	85.3	99.4
Ліс	97.2	97.4	98.8	98.4	96.7	98.5	95.9	89.9
Необроблювані землі	90.7	85.4	90.5	84.6	90	82.5	60.5	34.4
Відкритий ґрунт	93.6	96.9	96.2	89.7	94.5	93.4	57.1	0.4
Вода	99.5	99.8	99.5	99.9	99.5	99.7	99.9	96.6
Загальна точність, %	97.5		97.7		97.3		89.7	

Також проведені експериментальні дослідження запропонованих методів покращення карт земного покриву, отриманих на основі супутникових даних, шляхом злиття растрової та векторної інформації, а саме, результатів класифікації супутникових даних та векторної інформації. Використовуючи запропоновані методи злиття растрової та векторної інформації на основі зваженого голосування (8) вдалося збільшити загальну точність класифікації на 5,6% відносно початкової карти класифікації (рис. 6).

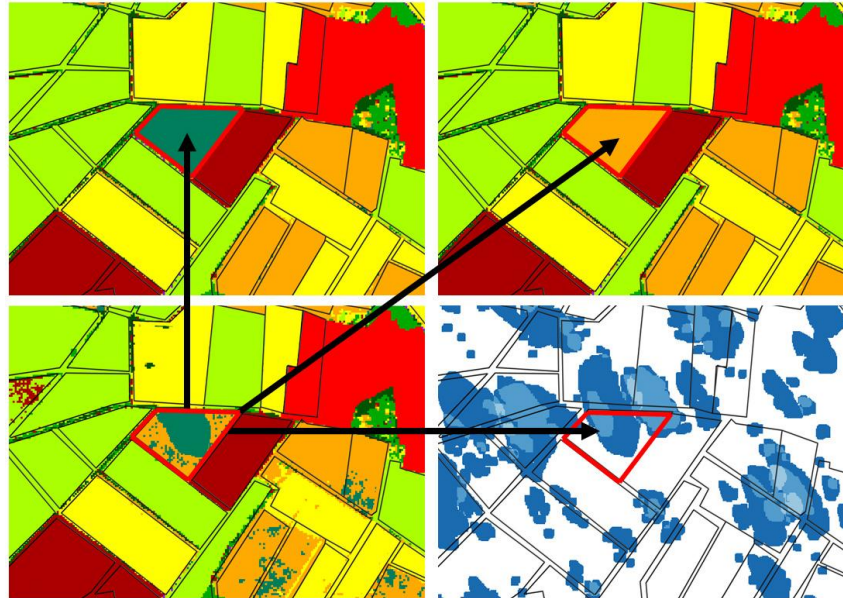


Рис. 6. Приклад полігону, для якого метод зваженого голосування (верхній правий) показав кращий результат, ніж звичайний метод голосування (верхній лівий)

У четвертому розділі – «Автоматизована інформаційна технологія картографування земного покриття на великих територіях у межах сервіс-орієнтованого підходу» – реалізовані методи злиття даних для розв’язання задачі картографування земного покриття для великих територій у формі сервіс-орієнтованої автоматизованої інформаційної технології. Побудована сервіс-орієнтована архітектура на основі використання Web-сервісу. Web-сервіс забезпечує розподілений доступ до даних ДЗЗ, їх обробку та надання відповідних результатів. Проведенні дослідження, що дозволили сформулювати прямі та зворотні задачі оптимізації СОС (сервіс-орієнтованої системи) і її окремі компоненти. Проаналізовано результати експериментальних досліджень для оцінки ефективності СОС різної апаратної конфігурації і різних функціональних елементів. В результаті використання СФА (структурно-функціонального аналізу) для оцінки ефективності передачі одного і декількох файлів для однієї з архітектур на основі СОС найбільш вузьким місцем виявилось сховище. Тобто, для забезпечення ефективності роботи автоматизованої інформаційної технології геопросторові дані та програмний код необхідно зберігати та обробляти на одному сховищі або переходити до хмарних технологій, зокрема Google Earth Engine. Надалі це дозволить підвищувати ефективність їх роботи та надавати сервіс на новому якісному рівні. Для зручності візуалізації результатів обробки розроблено геопортал на основі безкоштовного програмного забезпечення з відкритим кодом QGIS-сервер.

У п’ятому розділі – «Практичні застосування розроблених методів злиття даних та автоматизованої інформаційної технології картографування земного покриття» – розглянуті практичні застосування розроблених методів та автоматизованої інформаційної технології картографування земного покриття на великих територіях з використанням великих обсягів супутникових даних для побудови карт для всієї території України на основі даних Landsat-4/5/7 (для

1990, 2000 та 2010 років). Результати, що отримані при розв'язанні задач картографування земного покриття на великих територіях, можна надалі використовувати для прогнозування врожайності, оцінки ризиків, а також вирішення інших важливих прикладних задач.

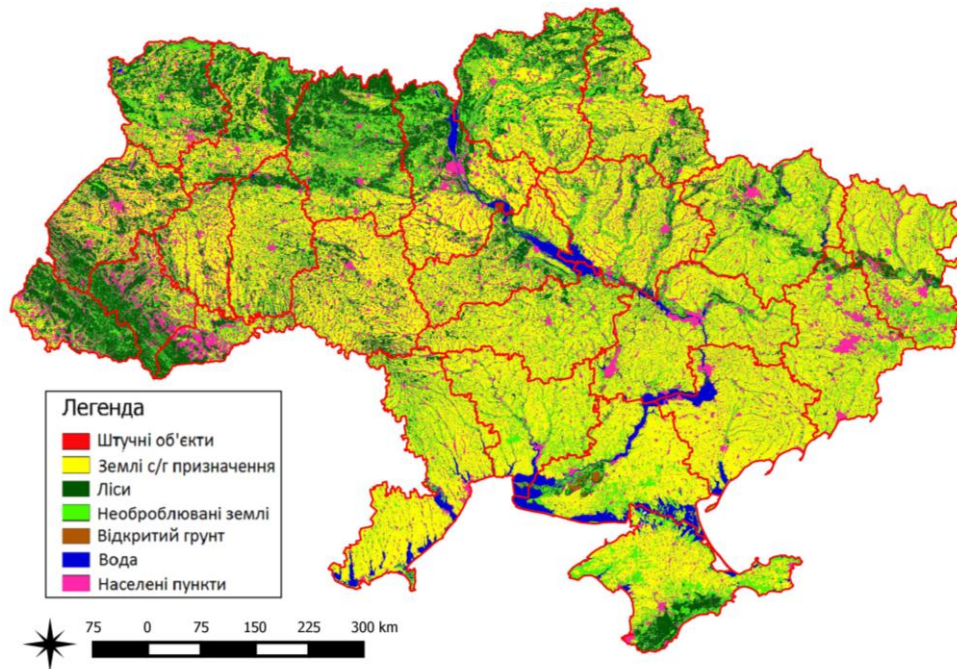


Рис. 7. Карта земного покриття для всієї території України, з використанням супутникових знімків Landsat-5/7 у 2010 році

На рис. 7 представлена карта класифікації земного покриття для 2010 року. Ці карти дозволяють оцінити загальні тенденції різного призначення та зміни земного покриття в Україні. Наприклад, порівняння карт для 1990, 2000 і 2010 показали збільшення необроблюваних земель, зокрема у північній частині України. Основною причиною є те, що багато полів були закинуті через їх низьку урожайність і культивування цієї землі стало не вигідним і недоцільним для фермерів. Для всієї території України побудовані карти змін земного покриття за періоди 1990-2000 роки і 2000-2010 роки. Отримані результати свідчать про те, що в північно-західних областях України помітною тенденцією є збільшення площ необроблюваних земель. Найбільші площі закинутих земель спостерігаються у Чернівецькій, Хмельницькій, Черкаській областях та в АР Крим. Дещо краща ситуація в Житомирській та Київській областях. І лише у Львівській, Миколаївській, Луганській, Запорізькій та Дніпропетровській областях спостерігається збільшення оброблюваних сільськогосподарських земель.

Використовуючи розроблену технологію, здійснено оцінку змін земного покриття і землекористування у Донецькій та Луганській областях, особливо на окупованих територіях. Для отримання результату були використані дані супутника Proba-V (для 2015 р.) та Landsat-5/7 (для 2000 та 2010 рр.). Аналізуючи отримані площі, можна зробити висновок, що кількість оброблюваних земель для східних областей (Донецької та Луганської) у 2015 р. стала найменшою за період 1990-2015. У той же час найбільшим є зменшення посівних площ на окупованих територіях, що складає 35% і 20% порівняно з

1990 роком, що продемонстровано на рис. 8.

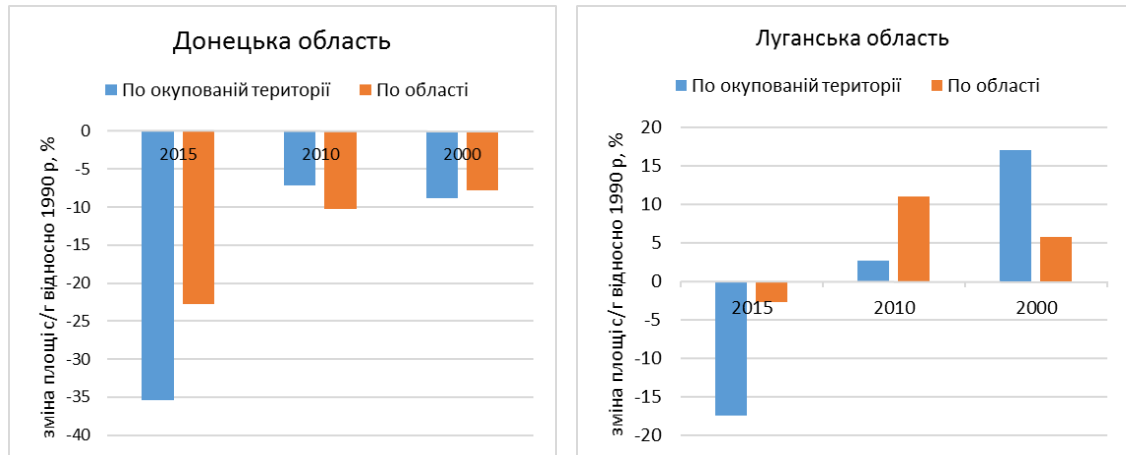


Рис. 8. Зміна площ оброблюваних земель у Донецькій і Луганській областях відносно 1990 року

На основі співставлення даних класифікації по супутниковим даним за 2013-2015 роки для території Київської області була створена тематична карта порушень сівозміни (рис. 9).

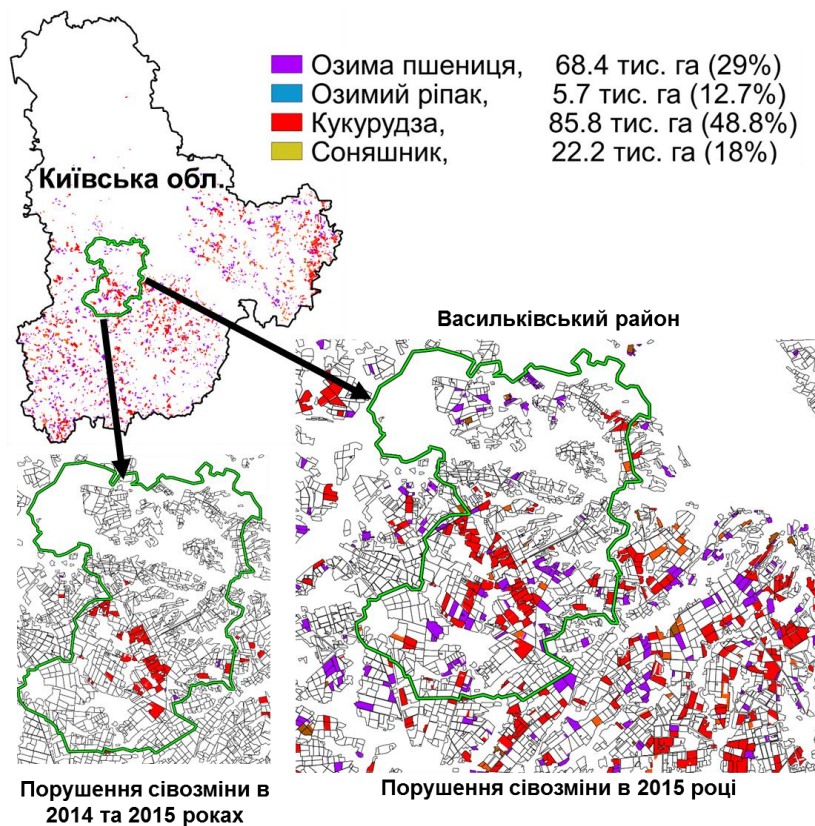


Рис. 9. Тематична карта порушень сівозміни

На карті фіолетовим кольором зображені порушення сівозміни озимої пшениці в 2015 році. Червоним кольором відображені території, на яких порушувалась сівозміна кукурудзи в 2014 та 2015 роках. Побудована карта дає можливість ідентифікувати поля, на яких виснажується земля в результаті порушення сівозміни.

Застосування супутникової інформації та автоматизованих геоінформаційних технологій злиття даних дозволяє ефективно вирішувати задачу оцінки збитків від посухи на одному з районів Автономної Республіки Крим, який в 2013 році постраждав в результаті тривалої посухи. Аналіз тематичної карти, побудованої на основі даних MODIS та EO-1, показав, що в результаті несприятливих погодних умов (тривалої посухи) в Красногвардійському районі постраждали 54315 га посівів зернових (озимої пшениці та ярого ячменю), при цьому економічний збиток від загибелі посівів зернових по Красногвардійському району внаслідок несприятливих погодних умов склав близько 138.5 млн. грн (рис. 10).

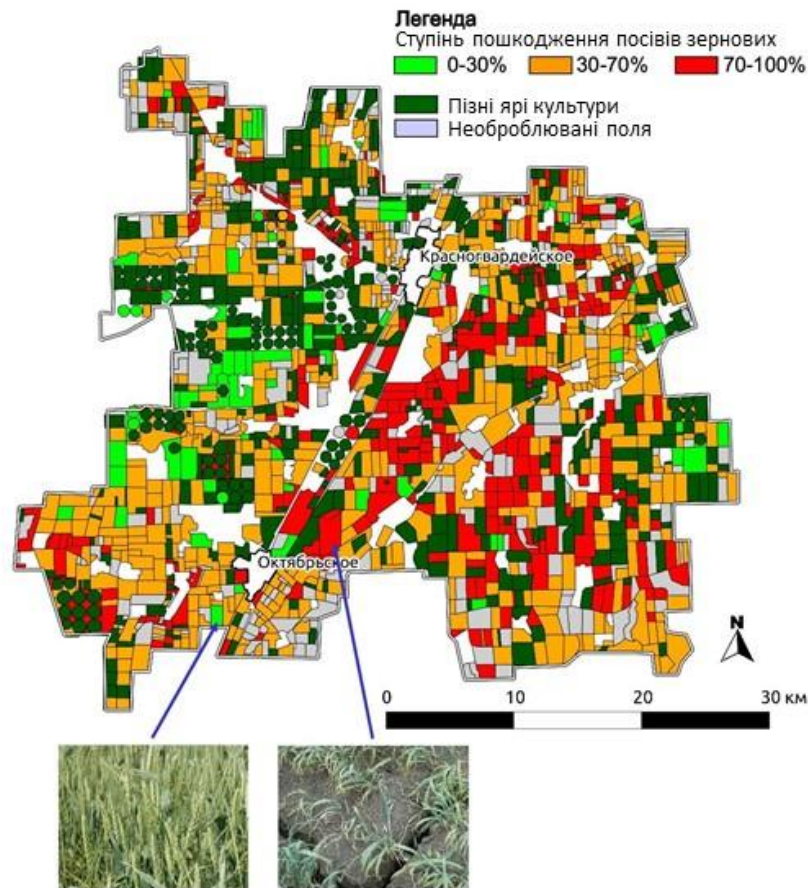


Рис. 10. Тематична карта стану посівів озимих та ярих зернових культур в АР Крим Красногвардійського району, 27 травня 2013

ВИСНОВКИ

У дисертаційному дослідженні розв'язана задача підвищення точності класифікації і завчасності оцінки площ класів земного покриття та забезпечення високої точності картографування земної поверхні на великих територіях шляхом розроблення методів злиття різнорідних геопросторових даних великих обсягів та створення автоматизованої технології картографування. Удосконалений метод класифікації земного покриття за супутниковими даними великих обсягів на основі використання ансамблю нейронних мереж та розроблені методи злиття гетерогенних супутникових даних на рівнях пікселів та прийняття рішень для побудови карти реалізовані у створеній автоматизованій інформаційній технології картографування для всієї території України в межах сервіс-орієнтованого підходу.

За результатами дисертаційної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Проведений аналіз стану проблеми картографування земного покриття на великих територіях показав, що на сьогодні переважна більшість існуючих карт побудована на основі супутникових даних низького просторового розрізнення. Карти з високим просторовим розрізненням створено для невеликих територій, а існуюча єдина глобальна карта GlobeLand30-2010 характеризується низькою точністю і не враховує територіальних відмінностей, пов'язаних з кліматом та різномірністю класів земного покриття. Тому актуальною є задача побудови карти земного покриття для великих територій, яку автор пропонує розв'язувати шляхом злиття різномірних даних.

2. Розроблено метод злиття геопросторових супутникових даних на рівні пікселів, у якому розширюється простір ознак для картографування земного покриття шляхом інтеграції різночасових даних різної природи. Розроблений метод злиття оптичних та радарних геопросторових даних дозволив збільшити точність класифікації на 7,5% у порівнянні з випадком, коли використовуються лише оптичні дані.

3. Отримав подальший розвиток метод ансамблевої класифікації різномірних геопросторових даних шляхом використання ансамблю нейронних мереж. Застосування ансамблю дозволяє підвищити точність класифікації земного покриття в порівнянні з окремою нейронною мережею більше ніж на 15% для ярих культур та на 6,5% для необроблюваних земель за рахунок об'єднання апостеріорних ймовірностей від окремих класифікаторів та обчислення середнього значення ймовірності належності вхідного образу до заданого класу.

4. Вперше розроблено методи злиття даних на рівні прийняття рішень для побудови карти земного покриття для великих територій. Використання розроблених методів злиття даних дозволило підвищити на 8% загальну точність класифікації земного покриття для території України порівняно з існуючою картою GlobeLand30-2010.

5. Розроблені методи злиття геопросторових даних реалізовані у формі сервіс-орієнтованої автоматизованої інформаційної технології. Проведені дослідження щодо оцінки ефективності сервіс-орієнтованої системи різної апаратної конфігурації і різних функціональних елементів. В результаті дослідження виявлено, що для забезпечення ефективності роботи автоматизованої інформаційної технології геопросторові дані та програмний код необхідно зберігати та обробляти на одному сховищі.

6. Використовуючи запропоновану автоматизовану технологію розв'язано задачу картографування земного покриття для всієї території України за 1990, 2000 і 2010 рік з 30-метровим просторовим розрізненням. Загальна точність класифікації для території України за областями становить не менше 88% і в середньому 97% при валідації на незалежній тестовій вибірці. Також вирішено проблеми оцінки збитків від посухи та порушення сівозміни. Побудовано карти земного покриття для території Київської області протягом 2013-2015 років. Для покращення достовірності карт земного покриття запропоновано метод злиття растрової та векторної інформації з використанням меж полігонів, що дає можливість покращити точність на 5,6% відносно початкової карти класифікації.

Отримані в ході дисертаційного дослідження карти земного покриття включено до складу глобального геопросторового шару оброблюваних земель.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ПО ТЕМІ ДИСЕРТАЦІЇ

У фахових виданнях:

1. **Яйлимов Б. Я.** Метод классификации на основе слияния данных для анализа ущерба от засухи / Б. Я. Яйлимов // Индуктивное моделирование сложных систем. – 2014. – Вып. 6. – С. 167-176.
2. Шелестов А.Ю. Информационная технология оценки ущерба от засухи на основе слияния данных / А. Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов**, А. И. Петухова // Наукові праці Донецького національного технічного університету Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка». – 2013. – Т. 17, № 1. – С. 125-132.
3. Kussul N. Regional scale crop mapping using multi-temporal satellite imagery / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, M. Lavreniuk, **B. Yailymov**, O. Kussul // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2015. – Vol. XL-7/W3. – P. 45-52. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-45-2015. (**SCOPUS**)
4. Лавренюк Н.С. Классификация больших площадей земного покрова по ретроспективным спутниковым данным / Н. С. Лавренюк, С. В. Скакун, А. Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов**, С. Л. Янчевский, Д. Ю. Ящук, А. М. Костецкий // Кибернетика и системный анализ. – 2016. – Т. 52, № 1. – С. 137-149. (**SCOPUS**)
5. Куссуль Н. М. Ретроспективна регіональна карта земного покриття для України: методологія побудови та аналіз результатів / Н. М. Куссуль, А. Ю. Шелестов, С. В. Скакун, Р. М. Басараб, **Б. Я. Яйлимов**, М. С. Лавренюк, А. В. Колотій, Д. Ю. Ящук // Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21, № 3. – С. 31-39.
6. Kolotii A. Comparison of biophysical and satellite predictors for wheat yield forecasting in Ukraine / A. Kolotii, N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, **B. Yailymov**, R. Basarab, M. Lavreniuk, T. Oliinyk, V. Ostapenko // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. – 2015. – Vol. XL-7/W3. – P. 39-44. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-39-2015 (**SCOPUS**)
7. Скакун С. В. Класифікація сільськогосподарських посівів з використанням часових рядів супутникових даних / С. В. Скакун, А. Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов**, В. А. Остапенко, М. С. Лавренюк, А. В. Вікулов // Индуктивное моделирование сложных систем. – 2014. – Вып. 6. – С. 157-166.
8. Шелестов А. Ю. Регресійний аналіз показників розвитку рослинництва в регіонах України за статистичними і супутниковими даними / А.Ю. Шелестов, І. М. Бутко, М. С. Лавренюк, **Б. Я. Яйлимов**, А.В. Колотій // Индуктивное моделирование сложных систем. – 2015. – Вып. 7. – С. 282-290.
9. Куссуль Н.Н. Анализ изменений земного покрова на основе технологии глубинного машинного обучения / Н.Н. Куссуль, Н.С. Лавренюк,

А.Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов**, И.Н. Бутко // Проблемы управления и информатики. – 2016. – № 3. – С. 140-151.

10. Kussul N. Land Cover Changes Analysis Based on Deep Machine Learning Technique / N. Kussul, N. Lavreniuk, A. Shelestov, **B. Yailymov**, I. Butko // Journal of Automation and Information Sciences. – 2016. – Vol. 48, No. 5. – P. 42-54. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v48.i5.40. (**SCOPUS**)

11. Kussul N. Resilience Aspects in the Sensor Web Infrastructure for Natural Disaster Monitoring and Risk Assessment Based on Earth Observation Data / N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, O. Kussul, **B. Yailymov** // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 7, No. 9 – P. 3826-3832. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2313573 (**SCOPUS**)

12. Шелестов А.Ю. Структурно-функциональный анализ сервис-ориентированных систем / А.Ю. Шелестов, О.М. Куусуль, **Б. Я. Яйлимов** // Індуктивне моделювання складних систем: Зб. наук. пр. – К.: МННЦ ІТС НАН та МОН України. – 2012. – Вип. 4. – С. 224-238.

Тези доповідей, матеріали наукових конференцій:

13. **Яйлимов Б. Я.** Інформаційна технологія оцінки збитків від посух / Яйлимов Б.Я. // Збірник матеріалів V міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених "Інформаційні технології: економіка, техніка, освіта", (м. Київ, НУБіП України, 13-14 листопада 2014р.). – 2014 р. – С. 152-153.

14. **Яйлимов Б. Я.** Геопортал «Сич-2» в контексте GEOSS и информационной безопасности / Б.Я. Яйлимов, О.М. Куусуль, С.В. Скакун, В.Н. Крыгин // XV міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос». Матеріали доповідей, (м. Дніпропетровськ, 2013р.). – Д.:2013 – С. 481.

15. Скакун С.В. Моніторинг надзвичайних ситуацій на основі високопродуктивних GRID обчислень / С.В. Скакун, А.Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов**, В.М. Кригін // Обчислюваний інтелект (результат, проблеми, перспективи): Матеріали 2-ї Міжнародної науково-технічної конференції (14-17 травня 2013 р., Черкаси). – Черкаси: Маклаут. – 2013. – С. 242.

16. Куусуль Н.М. Визначення аномалії розвитку рослинності / Н.М. Куусуль, О.М. Кравченко, С.В. Скакун, **Б. Я. Яйлимов** // Збірник матеріалів Міжнародної науково-практичної конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2013» (13-14 червня 2013 року, Київ, Україна). – Київ: ТОВ «Аграр Медіа Груп». – 2013. – С. 27-28.

17. Куусуль Н.М. Класифікація літніх сільськогосподарських культур на основі злиття різнорідних наземних та супутникових даних / Н.М. Куусуль, А.Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов** // Наукове видання. 13-а Українська конференція з космічних досліджень, (2-6 вересня 2013р., м. Євпаторія, Україна). – Видавництво «Кафедра», 2013 р. – С. 181.

18. Шелестов А.Ю. Автоматизация выявления аномалий развития вегетации растительности по спутниковым данным / А.Ю. Шелестов, **Б.Я. Яйлимов** // Сборник тезисов докладов конференции. Одиннадцатая

Всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», Москва, Россия. – 2013 г.

19. Куссуль Н.М. Моніторинг та оцінка збитків від посух на основі супутникових даних / Н.М. Куссуль, А.Ю. Шелестов, С.В. Скакун, **Б. Я. Яйлимов** // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей Четвертої Міжнародної конференції «GEO-UA 2014» (2014 р., м. Київ). – ISBN 978-966-02-7248-4 (електронне видання). – С. 209-210.

20. Шелестов А. Ю. Анализ эффективности сервис-ориентированной системы на базе структурно-функционального анализа / А.Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов** // Всеукраїнська наукова конференція «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів», (22 – 23 лютого 2013 року, м. Рівне, РДГУ - НУВГП). – 2013. – С. 201.

21. Куссуль Н.М. Картографування земного покриву для великих територій / Н.М. Куссуль, М.С. Лавренюк, А.Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов** // Наукове видання. 14-а Українська конференція з космічних досліджень, (8-12 вересня 2014 р., м. Ужгород). – К.: 2014. – С. 174.

22. Скакун С. Метод оцінювання ризику посух на основі часових рядів супутникових даних та теорії екстремальних величин / С. Скакун, Р. Басараб, **Б. Яйлимов**, Д. Ящук, Р. Климчук // Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2014», (м. Київ, НУБіП України, 26-27 червня 2014 р.). – К.: Аграр Медіа Груп. – 2014. – С. 12-14.

23. Шелестов А. Ю. Метод злиття геопросторових даних в задачі картографування земної поверхні / А.Ю. Шелестов, **Б. Я. Яйлимов** // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання та обчислювальних методів» (м. Рівне, 19 – 22 лютого 2015 року). – Рівне : РВВ РДГУ. – 2015. – С. 180.

24. **Яйлимов Б. Я.** Метод злиття геопросторових даних в задачах побудови карт сільськогосподарських посівів / Б. Я. Яйлимов, М.С. Лавренюк // Матеріали Міжнародної наукової конференції «Астрономічна школа молодих вчених. Актуальні проблеми астрономії і космонавтики» (м. Житомир, 20 – 22 травня 2015 року). – Київ-Житомир. – 2015. – С. 89.

25. **Яйлимов Б.** Методи злиття даних на основі прийняття рішень для побудови карти класифікації / Б. Яйлимов, М. Лавренюк // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2015», (м. Київ, НУБіП України, 25-26 червня 2015 р.). – К.: Інтерсервіс, 2015. – С. 20.

26. Lavreniuk M. Regional Retrospective High Resolution Land Cover For Ukraine: Methodology And Results / M. Lavreniuk, N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, **В. Yailymov** // International Geoscience and Remote Sensing Symposium 2015 (IGARSS 2015), № 15599383. – P. 3965-3968. DOI: 10.1109/IGARSS.2015.7326693.

27. **Яйлимов Б. Я.** Методи злиття даних в задачі картографування земного покриву / Б. Я. Яйлимов // Матеріали XIV Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і

прикладні проблеми фізики, математики та інформатики», (26-28 травня 2016 р., м. Київ, Україна). – 2016. – Т. 2. – С. 184-185.

28. **Яйлимов Б. Я.** Злиття супутникових даних на основі ансамблевого методу класифікації / Б.Я. Яйлимов, М.С. Лавренюк // Materials of reports of the 5th International Conference «GEO-UA 2016» (October 10-14, 2016, Kyiv). – 2016. – Р. 60-61.

АНОТАЦІЯ

Яйлимов Б. Я. Автоматизована інформаційна технологія картографування земного покриття на основі методів та моделей злиття супутникових даних. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження. – Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Київ, 2016.

У дисертаційному дослідженні розв'язана задача підвищення точності класифікації і завчасності оцінки площ класів земного покриття та забезпечення високої точності картографування земної поверхні на великих територіях шляхом розроблення методів злиття різнорідних геопросторових даних великих обсягів та створення автоматизованої технології картографування. Удосконалений метод класифікації земного покриття за супутниковими даними великих обсягів на основі використання ансамблю нейронних мереж та розроблені методи злиття гетерогенних супутникових даних на рівнях пікселів та прийняття рішень для побудови карти реалізовані у створеній автоматизованій інформаційній технології картографування для всієї території України в межах сервіс-орієнтованого підходу. Розроблений метод картографування земного покриття був використаний при побудові карт для території України на основі Landsat-4/5/7 за 2010, 2000 та 1990 роки. Отримані карти дали можливість оцінити загальні тенденції різного призначення земного покриття в Україні. На основі розробленої технології вирішено проблеми оцінки збитків від посухи та порушення сівозміни, побудовано карти земного покриття для території Київської області протягом 2013-2015 років (з використанням супутникових даних Landsat-8, Sentinel-1).

Ключові слова: супутникові дані, злиття даних, картографування, карта земного покриття, сервіс-орієнтована система.

АННОТАЦИЯ

Яйлимов Б. Я. Автоматизированная информационная технология картографирования земного покрова на основе методов и моделей слияния спутниковых данных. - На правах рукописи.

Диссертация на получение научной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.12 - Дистанционные аэрокосмические исследования. - Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины, Киев, 2016.

В диссертационном исследовании решена задача повышения точности классификации и заблаговременности оценки площадей классов земного покрова и обеспечения высокой точности картографирования земной поверхности на больших территориях путем разработки методов слияния разнородных геопространственных данных больших объемов и создания автоматизированной технологии картографирования. Усовершенствованный метод классификации земного покрова по спутниковым данным больших объемов на основе использования ансамбля нейронных сетей и разработанные методы слияния гетерогенных спутниковых данных на уровнях пикселей и принятия решений для построения карты реализованы в созданной автоматизированной информационной технологии картографирования для всей территории Украины в пределах сервис-ориентированного подхода.

Разработанный метод картографирования земного покрова был использован для создания карт по территории Украины на основе спутниковых данных Landsat-4/5/7 для 2010, 2000 и 1990 годов с 30-метровым пространственным разрешением. Общая точность классификации для территории Украины по областям составляет не менее 88% и в среднем 97% при валидации на независимой тестовой выборке. Слияние разнородных данных и использование ансамбля классификаторов позволило повысить на 8% общую точность классификации земного покрова для территории Украины по сравнению с существующей картой GlobeLand30-2010. Полученные карты позволили оценить общие тенденции различного назначения земного покрова в Украине. На основе разработанной технологии решена задача нарушения севооборота, построены карты земного покрова для территории Киевской области для 2013-2015 годов (использовались спутниковые данные Landsat-8, Sentinel-1). Карты получены на основе бесплатных спутниковых данных с высоким пространственным разрешением и разработанных методов слияния геопространственных данных. Для улучшения достоверности карты земного покрова использован метод слияния растровой и векторной информации (содержащая границы полигонов), в котором более надежными считаются результаты классификации для наименее облачных пикселей. Использование данного метода позволило улучшить точность карты земного покрова на 5,6%. Методы слияния данных для решения задачи картографирования земного покрова для больших территорий реализованы в форме сервис-ориентированной автоматизированной информационной технологии.

Проведены исследования по оценке эффективности сервис-ориентированной системы различной аппаратной конфигурации и различных функциональных элементов. Исследование показало, что наиболее узким местом является хранилище. То есть для обеспечения эффективности работы автоматизированной информационной технологии пространственные данные и программный код необходимо хранить и обрабатывать на одном хранилище.

Применение спутниковой информации и автоматизированных геоинформационных технологий слияния данных позволило эффективно решать задачу оценки ущерба от засухи на одном из районов Автономной Республики Крым, который в 2013 году пострадал в результате длительной засухи. Анализ тематической карты, построенной на основании данных MODIS

и ЕО-1, показал, что в результате неблагоприятных погодных условий (продолжительной засухи) в Красногвардейском районе пострадали 54315 га посевов зерновых (озимой пшеницы и ярового ячменя), при этом экономический ущерб от гибели посевов зерновых в этом районе в результате неблагоприятных погодных условий составил около 138.5 млн. гривен.

Ключевые слова: спутниковые данные, слияние данных, картографирование, карта земного покрова, сервис-ориентированная система.

ABSTRACT

Yailymov B. Automated information technology for land cover mapping based on satellite data fusion methods and models. - Manuscript.

Thesis in fulfillment of the requirements for the degree of candidate of technical sciences on the speciality 05.07.12 – Remote aerospace research. – Space Research Institute NAS Ukraine and SSA Ukraine, Kyiv, 2016.

The dissertation is devoted to solving a problem of accuracy improvement of classification and timely evaluation of area classes of the land cover and support of high accuracy in mapping of the earth's surface on large areas by developing of the methods of fusion of different types of large volumes of geospatial data and creating of automated mapping technology. The method of classification of the land cover using satellite data of large volumes on the basis of the use of the ensemble of the neural networks was improved and the methods of fusion of different satellite data on pixels' levels and decisions levels for mapping were implemented in automated information technology for Ukraine within a service-oriented approach. The method of mapping of the land cover was used in obtaining maps for the territory of Ukraine based on Landsat-4/5/7 for 2010, 2000 and 1990. The obtained maps made it possible to assess the general trends of various purpose of the land cover in Ukraine. The problem of the breach of crop rotation based on the developed technology was solved, the land cover maps were developed for the territory of Kyiv region for 2013-2015 years, the problem of assessing of the damages from drought was solved.

Keywords: satellite data, data fusion, mapping, land cover map, service-oriented system.