

УДК 528.8.04:004.021

ІНДУКТИВНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БІОФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ В ЕКСПЕРИМЕНТІ SPOT-5 Take 5

А.Ю. Шелестов^{1,2,3}, А.В. Колотій^{1,2,3}, О.М. Костецький¹

¹Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,

²Національний університет біоресурсів та природокористування України,

³Національный технический университет Украины «КПИ»

andrii.shelestov@gmail.com, andrew.k.911@gmail.com, KosteckiyOleksandr@gmail.com

В статті вирішується задача моделювання таких інтегральних характеристик рослинності як LAI та FAPAR із використанням наземних даних та даних супутників Landsat-8 та SPOT-5, дані з якого отримані в межах участі у експерименті SPOT-5 Take-5. Приводиться обґрунтування виду регресійних залежностей між супутниковими даними та біофізичними параметрами, наводяться оцінки якості побудованих моделей.

Ключові слова: супутникові дані, агромоніторинг, регресійний аналіз, індукційні моделі, глибинне навчання, LAI, FAPAR, NDVI, SPOT-5, Landsat-8.

This article aims at the problem of modeling such integral vegetation characteristics as LAI and FAPAR using ground data and satellite data from Landsat-8 and SPOT-5. SPOT-5 data derived within participating in the experiment SPOT-5 Take-5. Regression relations between satellite data and biophysical parameters are constructed and model's quality assessment is performed.

Keywords: satellite data, agromonitoring, regression analysis, induction models, deep learning, LAI, FAPAR, NDVI, SPOT-5, Landsat-8.

В статье решается задача моделирования таких интегральных характеристик растительности как LAI и FAPAR с использованием наземных данных и данных спутников Landsat-8 и SPOT-5, данные с которого получены в рамках участия в эксперименте SPOT-5 Take-5. Приводится обоснование вида регрессионных зависимостей между спутниковыми данными и биофизическими параметрами, приводятся оценки качества построенных моделей.

Ключевые слова: спутниковые данные, регрессионный анализ, индукционные модели, глубинное обучение, LAI, FAPAR, NDVI, SPOT-5, Landsat-8.

Вступ

Оцінка біофізичних параметрів рослинного покриву є важливою для вирішення задач моніторингу рослинності та пов'язаних з нею змін, виявлення несприятливих трендів динаміки розвитку рослинності та оцінки потенційної врожайності сільськогосподарських культур. Такі параметри як індекс листяної поверхні (Leaf Area Index – LAI) та частка поглинутої фотосинтетично активної сонячної радіації (Fraction of Photosynthetically Active Radiation – FAPAR) включено до переліку найважливіших кліматичних показників. Такі параметри можуть бути використані для кількісної оцінки стану посівів в межах заходів щодо агромоніторингу (ініціатива Global Agriculture Monitoring – GLAM), прогнозування врожайності та валового збору [1-2].

Оцінка біофізичних параметрів наземними методами на регулярній основі є складною задачею, що потребує багато ресурсів, а тому дані дистанційного

зондування Землі виступають фактично як єдине джерело інформації, яке забезпечує кількісну оцінку біофізичних параметрів на регулярній основі на регіональному, національному та глобальному рівнях.

Із появою сучасних супутників, які мають високі часову та просторову роздільну здатність (Landsat-8, SPOT, Sentinel-2), набрала актуальності і задача побудови біофізичних продуктів високої роздільної здатності за сучасними супутниковими даними та зросла роль інтелектуальних обчислень у вирішенні задач моніторингу довкілля [3-4].

Із запуском супутників групи Sentinel з'явилися принципово нові можливості для вирішення задач сільського господарства із використанням супутникових даних. Для підготовки до використання даних нового супутника Sentinel-2 Європейським космічним агентством (ЄКА) організовано експеримент SPOT-5 Take 5, основною метою якого є розробка та тестування нових методів, сервісів та продуктів в сфері моніторингу земного покриву (с акцентом на задачі сільського господарства) із використанням даних з роздільною здатністю 10-20 м та періодом потворного знімання території в 5 днів.

У грудні 2014 року ЄКА розпочало конкурс тестових полігонів світу для участі в експерименті SPOT-5 Take 5, до переліку яких було внесено і тестовий полігон, який представляє Україну в проекті JESAM [5]. На початку квітня 2015 р. супутник SPOT-5 почав знімати обрані ділянки поверхні Землі кожні 5 днів, експеримент тривав 5 місяців (08/04/2015 - 31/08/2015) та дав можливість оцінити значні переваги від використання супутникових даних такої високої просторової та часової роздільної здатності для вирішення цілого спектру задач моніторингу стану сільського господарства.

Серед підходів, які використовуються для побудови карт біофізичних параметрів за супутниковими даними відзначимо емпіричний модельний підхід, в якому біофізичні величини (LAI, FAPAR) пов'язуються з такими обраними предикторами (ознаками) як рівні відбиття в різних частотах спектру на супутниковому зображенні, вегетаційними індексами тощо [6]. Такі підходи досить легкі у застосуванні, однак доволі вибагливі щодо вхідних даних, прив'язані до доволі обмеженої площі. Також, зазвичай, використовується лише обмежена за обсягом початкова вибірка за один вегетаційний період, що обумовлено трудомісткістю процесу збирання наземних даних для калібрування моделі.

1. Постановка задачі

Для кількісної оцінки біофізичних величин (LAI, FAPAR) в даній роботі пропонуються регресійні моделі, які в якості предикторів використовують нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI), побудованим за даними супутників SPOT-5 та Landsat-8. Проводиться оцінка ефективності

використання в якості предикторів ближнього інфрачервоного каналу (NIR) та співвідношення NIR/RED (ближній інфрачервоний до червоного). Наводяться результати аналізу наземних даних та оцінки робастності запропонованих моделей, отримані шляхом крос-валідації на незалежних даних. Моделі побудовані для кукурудзи [7-8], дані зібрано впродовж 2013-2015 рр.

2. Використані дані

В якості досліджуваної території використано дослідне господарство «Пшеничне» у Васильківському районі Київської області (широта +50.07997 та довгота +30.23081), на території якого активно ведуться сільськогосподарські роботи та вирощуються такі культури кукурудза, пшениця та соя. Клімат є помірно континентальним, середній рівень опадів – 709 мм на рік, територія переважно рівнинна, а вегетаційний період лежить в межах вересня-липня для озимих та квітня-жовтня для ярих культур.

В роботі використано супутникові дані SPOT-5 та Landsat-8 за 2015 та 2013-2015 відповідно. Дані SPOT-5 з роздільною здатністю 10 м отримані в рамках експерименту SPOT-5 Take-5. Дані Landsat-8 з роздільною здатністю 30 м завантажено з порталу геологічної служби США U.S. Geological Surveys' (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Дані Landsat-8 використані для підтвердження гіпотез, сформованих за даними SPOT-5 на більшому обсязі навчальної вибірки (2013-2015 рр.)

В дослідженні використано знімки 2-рівня обробки, для яких проведено відповідні корекції для зменшення впливу атмосфери та нахилу земної поверхні [9].

Згідно з Європейським валідаційним протоколом дистанційного зонування земної поверхні VALERI [10] збір наземних даних проводиться на квадратній ділянці зі стороною 20 м – ESU (Elementary Sampling Unit), за схемами у відповідності до типу посіву культури (Рис. 1).

Схема типу №1 використовується для досліджень культур, що висіваються хаотично або для посівів, у яких відстань між рослинами є малою (озимі та літні зернові, соя, тощо). Схема типу №2 використовується для досліджень культур з великою відстанню між рядками (кукурудза, соняшник, тощо), тип №3 використовують для замірів на насадженнях сіткоподібної форми (фруктові сади, виноградники, тощо)

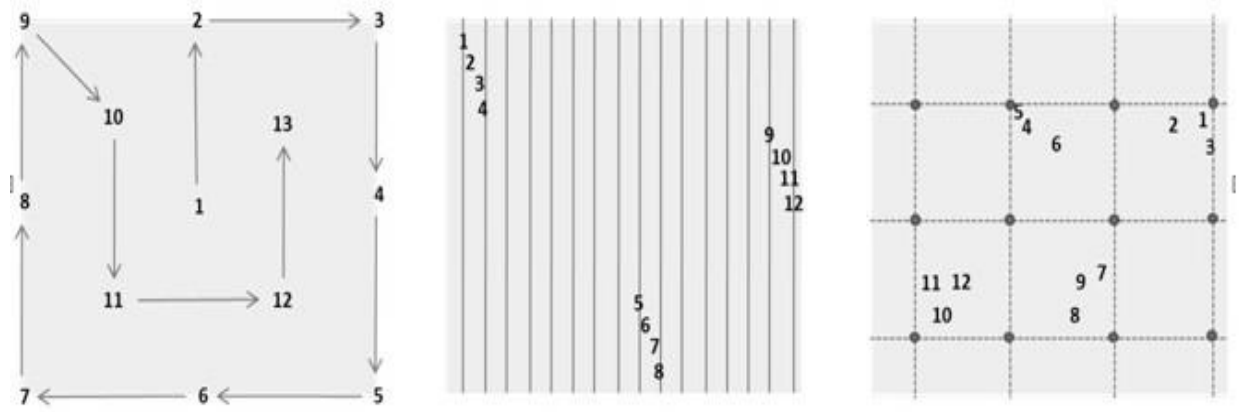


Рис. 1 Схеми збирання наземних даних відповідно до протоколу VALERI: тип №1 (зліва), тип №2 (центр), тип №3 (з права)

Загалом за 2013-2015 рр. для використання із даними супутника Landsat-8 накопичено вибірку наземних спостережень для мажоритарних культур досліджуваного регіону: 109 спостережень – кукурудза, 39 – соя, 62 – пшениця, інші типи рослинності – 46, разом – 256. Для роботи з даними супутника SPOT-5 у 2015 р. зібрано 64 спостереження для кукурудзи, 56 – для сої, 10 – для пшениця, 4 – інші культури, разом – 134 спостереження

Заміри біофізичних параметрів проводились за допомогою дзеркальних фотокамер Canon D550 та Nikon D70 з використанням об’єктивів типу Fish-eye з кутом огляду 180°. Обчислення LAI та FAPAR виконувалось шляхом обробки напівсферичних фотографій (Рис. 2) в програмному забезпеченні CAN EYE (http://www.avignon.inra.fr/can_eye), яке спирається на проведення класифікації кольорів зображення для виділення зеленої рослинності на тлі землі або неба в залежності від висоти рослини.

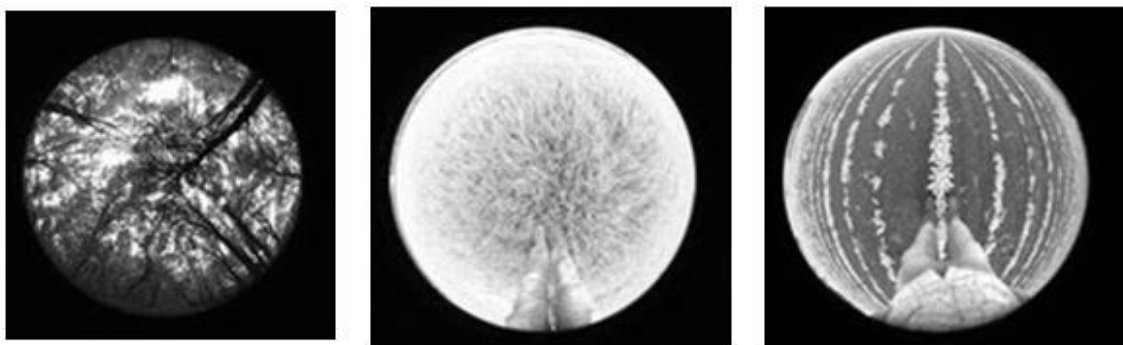


Рис.2 Зразки напівсферичних фотографій (DHP), зроблених у польових дослідженнях

3. Побудова моделей

Аналіз залежності між значенням вегетаційного індексу NDVI та значеннями біофізичних параметрів, отриманими під час наземних досліджень, показує, що LAI має чітко виражену нелінійну залежність з NDVI. Водночас, залежність FAPAR та NDVI носить лінійний характер (Рис. 3). Оцінено залежність біофізичних продуктів від NIR та співвідношення NIR/RED, однак рівень СКП (середня квадратична похибка) похибок моделей, побудованих за такими предикторами є вищим. Результати аналізу параметрів моделей наведено у розділі 4.

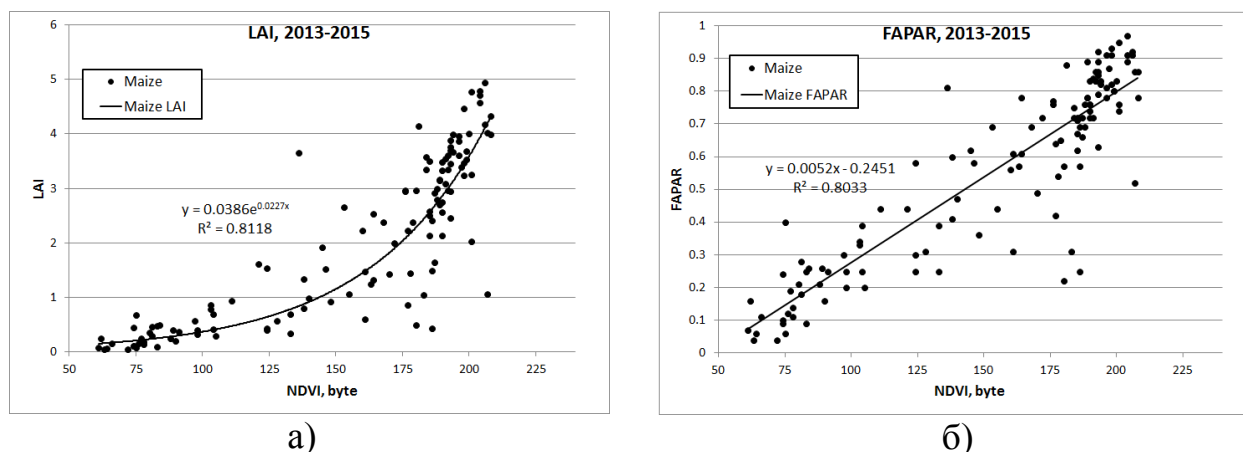


Рис. 3 Залежність біофізичних параметрів від NDVI: а) – FAPAR, б) – LAI на даних 2013-2015 рр.

На основі проведеного аналізу навчальних вибірок, а також того, що обсяг даних не є достатнім для використання складніших математичних моделей, використовуються однофакторні регресійні моделі для побудови LAI та FAPAR за супутниковими даними, оскільки ускладнення моделей в цьому випадку призводить до підвищення рівня помилок прогнозу на незалежних даних, які не використовувалися для калібрування моделей (таблиця 3).

4. Аналіз результатів

Дослідження показали, що мінімізація похибки моделювання біофізичних параметрів досягається використанням в якості предиктору нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI.

Залежність LAI від NDVI є експоненційною (таблиця 2), для FAPAR спостерігається лінійна залежність (таблиця 3).

Результати щодо виду залежностей для даних супутника SPOT-5 (таблиця 1) узгоджуються з результатами, отриманими для даних супутника Landsat-8. При

цьому багатофакторна модель, побудована для параметрів NIR та RED не є задовільною, оскільки статистична значущість коефіцієнту моделі, пов'язаного з RED предиктором не є задовільною.

Таблиця 1

Параметри регресійних моделей , побудованих із використанням даних SPOT-5

Предиктор	R ²	СКП
Експоненційна залежність (LAI)		
RED	0.63	0.8
NIR	0.79	0.6
NDVI	0.86	0.5
NIR, RED	0.79	0.61
Лінійна залежність (FAPAR)		
RED	0.61	0.15
NIR	0.85	0.09
NDVI	0.84	0.1
NIR, RED	0.85	0.09

Таблиця 2

Параметри регресійних моделей , побудованих із використанням даних Landsat-8 для LAI

Кукурудза													
Рік		Лінійна залежність						Експоненційна залежність					
		NDVI		NIR		NIR/RED		NDVI		NIR		NIR/RED	
		R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП
2013	53	0.74	0.77	0.81	0.66	0.83	0.63	0.86	0.48	0.79	0.59	0.75	0.64
2014	29	0.88	0.47	0.91	0.42	0.89	0.45	0.90	0.25	0.82	0.33	0.83	0.32
2015	27	0.60	0.82	0.66	0.76	0.58	0.84	0.89	0.35	0.79	0.47	0.64	0.62
2013, 2014	82	0.78	0.7	0.8	0.67	0.83	0.61	0.83	0.48	0.71	0.64	0.72	0.62
2014, 2015	56	0.74	0.68	0.75	0.67	0.73	0.7	0.83	0.38	0.68	0.52	0.66	0.53
2013, 2015	80	0.73	0.79	0.79	0.7	0.77	0.72	0.88	0.44	0.8	0.56	0.74	0.64
2013-2015	109	0.75	0.73	0.78	0.7	0.78	0.68	0.84	0.46	0.72	0.61	0.71	0.63

Таблиця 3.

Параметри регресійних моделей , побудованих із використанням даних Landsat-8 для FAPAR

Кукурудза													
Рік		Лінійна залежність						Експоненційна залежність					
		NDVI		NIR		NIR/RED		NDVI		NIR		NIR/RED	
		R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП	R ²	СКП
2013	53	0.87	0.1	0.85	0.11	0.86	0.11	0.83	0.35	0.72	0.45	0.68	0.48
2014	29	0.94	0.06	0.88	0.09	0.89	0.08	0.91	0.14	0.79	0.21	0.81	0.2
2015	27	0.86	0.08	0.84	0.09	0.73	0.11	0.94	0.15	0.84	0.25	0.69	0.35
2013, 2014	82	0.87	0.1	0.78	0.13	0.83	0.12	0.79	0.34	0.63	0.46	0.64	0.45
2014, 2015	56	0.85	0.09	0.74	0.12	0.74	0.12	0.82	0.23	0.63	0.33	0.63	0.33
2013, 2015	80	0.87	0.1	0.86	0.1	0.83	0.11	0.86	0.3	0.75	0.4	0.7	0.44
2013-2015	109	0.86	0.1	0.79	0.12	0.8	0.12	0.81	0.32	0.66	0.43	0.65	0.43

Як показано у таблицях 2-3 вибір типу залежності є стабільних для усіх можливих комбінацій навчальної та тестової вибірок для LAI та FAPAR.

Зразки карт біофізичних параметрів, отриманих із використанням регресійного підходу наведено на Рис. 4

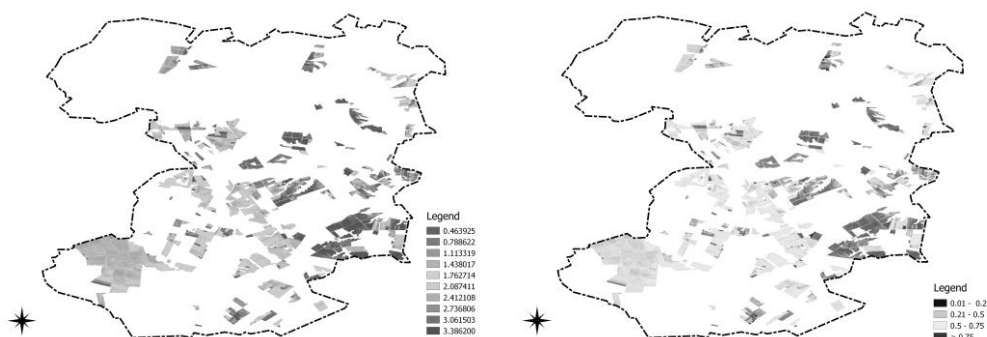


Рис. 4 Зразки карт біофізичних параметрів для полів кукурудзи для досліджуваної території: LAI (зліва) та FAPAR (с права)

6. Висновки

В роботі побудовано регресійні моделі та карти біофізичних параметрів на основі наземних та супутникових вимірювань в межах експерименту Spot5 Take5. В якості вхідної інформації використано дані супутників SPOT-5 за 2015 рік та, для визначення робастності моделей, Landsat-8 за 2013-2015 роки. В роботі оцінено залежності між предикторами, отриманими з супутникових зображень та наземними даними; встановлено, що залежність між LAI та NDVI є нелінійною, а між FAPAR та NDVI — лінійною.

В межах проведеного кросс-валідаційного аналізу помилок моделей виявлено, що знайдені залежності між супутниковими предикторами та біофізичними величинами є стабільними, що робить можливим операційне використання отриманих залежностей для подальших вегетаційних періодів з використанням високопродуктивних обчислень [11-13].

Література

1. F. Kogan, N. Kussul, T. Adamenko, S. Skakun, O. Kravchenko, O. Kryvobok, A. Shelestov, A. Kolotii, O. Kussul, and A. Lavrenyuk, "Winter wheat yield forecasting: A comparative analysis of results of regression and biophysical models," *Journal of Automation and Information Sciences*, 2013, 45 (6), , pp. 68-81.
2. A. Kolotii, N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, B. Yailymov, R. Basarab, M. Lavreniuk, T. Oliinyk, and V. Ostapenko, "Comparison of biophysical and

- satellite predictors for wheat yield forecasting in Ukraine”, in: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XL-7/W3, pp. 39-44, 2015.
3. Куссуль Н.Н., Скакун С.В., Шелестов А.Ю. Анализ рисков чрезвычайных ситуаций на основе спутниковых данных. Модели и технологии // К.: "Наукова думка" - 2014. - 184 с.
 4. Куссуль Н.М., Скакун С.В., Шелестов А.Ю. Геопросторовий аналіз ризиків стихійних лих// К.: "Наукова думка" - 2014. - 258 с.
 5. A. Shelestov, A. Kolotii, F. Camacho, S. Skakun, O. Kussul, M. Lavreniuk, and O. Kostetsky, “Mapping of biophysical parameters based on high resolution EO imagery for JECAM test site in Ukraine” in: 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), pp. 1733–1736, 26-31 July 2015.
 6. M. Ali, C. Montzka, A. Stadler, G. Menz, F. Thonfeld, and H. Vereecken, “Estimation and Validation of RapidEye-Based Time-Series of Leaf Area Index for Winter Wheat in the Rur Catchment (Germany),” *Remote Sens.*, vol. 7, no. 3, pp. 2808–2831, 2015.
 7. F. J. Gallego, O. Kravchenko, N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, Y. Grypych, “Efficiency assessment of different approaches to crop classification based on satellite and ground observations”, *Journal of Automation and Information Sciences*, 2012, 44 (5), pp. 67-80.
 8. N. Kussul, S. Skakun, A. Shelestov, O. Kravchenko, O. Kussul “Crop classification in Ukraine using satellite optical and SAR images”, *Inf. Models & Analysis*, 2012, 2, 118-122.
 9. D. P. Roy, M. A., Wulder, T. R., Loveland, et al., “Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research,” *Remote Sens. Env.*, vol. 145, pp. 154–172, 2014.c
 10. J. T. Morisette, F. Baret, J. L. Privette, R. B. Myneni, et al., “Validation of global moderate-resolution LAI products: A framework proposed within the CEOS land product validation subgroup,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 44, no. 7, pp. 1804–1817, 2006.
 11. N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun “Intelligent computations for flood monitoring”, *Advanced Research in Artificial Intelligence*, Institute of Information Theories and Applications FOI ITHEA, 2008, pp. 48-54.
 12. N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun “Grid system for flood extent extraction from satellite images”, *Earth Science Informatics*, 2008, 1 (3-4), pp. 105-117.
 13. N. Kussul, A. Shelestov, S. Skakun, O. Kravchenko “High-performance intelligent computations for environmental and disaster monitoring”, *Int. J. Information Technologies & Knowledge*, 2009, 3, 135-156.