

УДК 630*53

КАРТОГРАФУВАННЯ РІВНИННИХ ЛІСІВ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ЩІЛЬНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКІВ LANDSAT

Віктор Миронюк

Кафедра таксації лісу та лісового менеджменту, Національний університет біоресурсів і природо-користування України, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, Київ, Україна, 03041, E-mail: victor.myroniuk@nubip.edu.ua

У дослідженні опрацьовано фенологічно орієнтований метод дешифрування вкритих лісовою рослинністю ділянок на території рівнинної частини України, використовуючи часові ряди супутникових знімків Landsat 8 OLI. Класифікацію знімків виконано за алгоритмом Random Forest в «хмарній» платформі Google Earth Engine API. У результаті створено лісову маску рівнинних лісів України з просторовим розрізненням 30 м. Її точність за показниками точності користувача (user's accuracy) та виробника (producer's accuracy) в середньому оцінюється на рівні відповідно $0,795 \pm 0,022$ та $0,845 \pm 0,025$. При цьому для поліської частини регіону дослідження точність виявилася вищою, а степової зони – навпаки, нижчою.

Ключові слова – лісова маска; лісистість; «хмарні» обчислення; Google Earth Engine

Вступ

Дані Landsat (TM, ETM+, OLI) являють собою стандартний продукт для моніторингу лісових територій, що забезпечує просторове розрізнення 30 м, повторювальність зйомки 16 або 8 днів для областей поздовжнього перекриття та ширина охопту знімків 185 x 185 км [Cohen, Goward, 2004]. Завдяки якійсній калібровці сенсорів та стабільності результатів радіометричної корекції багаторічний архів знімків Landsat надає унікальні можливості для дослідження лісів.

Незважаючи на тривалий період зйомки та спрощення доступу до даних Landsat протягом останніх років, кількість наявних супутникових знімків для окремих територій може виявитися недостатньою. Цю проблему істотно усувають повторювальні спостереження, які зменшують ймовірність пропуску даних і дозволяють відібрати з часової серії «найкращі пікселі» відповідно до встановлених критеріїв: сезону зйомки, хмарності тощо. З огляду на зазначене, важливим завданням для сучасної науки стало запровадження часових серій супутникових спостережень, які

демонструють переваги в дослідженнях лісів [Gómes, White, 2017]. Проблема використання сезонних композитних зображень для картографування лісів піднімалася в дослідженнях групи вчених з університету штату Меріленд у США [Hansen et al., 2014]. Більшість сучасних робіт, присвячених дешифруванню лісових насаджень за часовими серіями супутникових знімків [Boisvenue 2016; Zald 2016], вказують, що класифікація земного покриву за часовими серіями знімків виявляється точнішою порівняно з аналогічними результатами без урахування часової динаміки спектральних характеристик.

Мета досліджень полягає в опрацьованні методики дешифрування вкритих лісовою рослинністю ділянок рівнинної частини України на основі часових рядів супутникових знімків Landsat.

Матеріал і методика досліджень

Загальна площа території дослідження становить близько 541 тис. км² та охоплює 21 область України (крім Закарпатської, Івано-Франківської, Чернівецької та АР Крим). У просторовому відношенні її представляє 59 сцен супутникових знімків Landsat 8 OLI, які за координатною сіткою WRS-2 розташовуються в діапазоні: шлях: 174–187, ряд: 23–29. Часову серію супутникових знімків підготовлено в «хмарній» платформі Google Earth Engine (GEE) API [Gorelick 2017] на основі 1548 знімків колекції «LANDSAT/LC8_L1T_TOA», які пройшли геометричну та радіометричну корекції. Знімки відбиралися з хмарністю не вище 20–30 %, після чого застосовувалася маска хмар. У часовому діапазоні їх відфільтровано з 01.01.2014 по 31.12.2016 рр.

На основі відібраних супутникових знімків за алгоритмами GEE сформовано безхмарні мозаїки для чотирьох сезонів: рік, літо, осінь і періоду квітень-жовтень. Згідно з методикою до мозаїк відбиралися лише ті спостереження (пікселі), які 1) не потрапили на хмари; 2) характеризувалися найбільшим значенням нормалізованого різницевого індексу *NDVI*. Річну, літню та осінню мозаїки створено шляхом поєднання окремих спектральних каналів та їхніх співвідношень. Для мозаїки періоду квітень-жовтень застосовувалися відповідні статистичні правила: відбір мінімальних і максимальних значень, 1-го та 3-го квартилів, медіани значень піксель у часовому ряді спостережень. Для всіх мозаїк спектральні змінні доповнювалися значеннями географічних координат (табл. 1).

З метою обґрунтування обсягу навчальної вибірки використано наявний доробок вчених зі створення стратифікованої вибірки за чотирма класами глобальної карти Global Forest Change [Hansen 201311]: лісовий покрив, нелісовий покрив, втрати лісу, відновлення лісу [Olofsson].

Спектральні показники сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI

Спектральні змінні для мозаїк сезонів літо, осінь, рік	Показники, визначені для мозаїки сезону квітень-жовтень
Відбиття в каналі 4	Мінімальне та максимальне значення відбиття для каналів 4–7 та індексу <i>NDVI</i>
Відбиття в каналі 5	
Відбиття в каналі 6	
Відбиття в каналі 7	25-й та 75-й перцентилі відбиття для каналів 4–7 та індексу <i>NDVI</i>
Індекс <i>NDVI</i>	
Відношення каналів 4 і 5	Медіана відбиття для каналів 4–7 та індексу <i>NDVI</i>
Відношення каналів 5 і 7	
Відношення каналів 6 і 7	
Перетворення типу «ковпак з кистю»	Географічні координати X та Y (широта та довгота)

Відповідно до запроєктованої схеми на території кожної адміністративної області згенеровано від 220 до 250 випадкових точок, а загальний обсяг вибірки становив понад 4700 спостережень. Для інтерпретації вибіркової одиниці використано web-застосунок Collect Earth [Bey et al., 2016], який

забезпечив доступ до супутникових знімків Google Earth, Bing Maps та їхню інтерпретацію згідно з розробленою схемою (табл. 2). Під час візуального дешифрування знімків вважали, що кожна вибіркова одиниця являє собою центр ділянки площею 0,25 га на місцевості.

Таблиця 2

Схема класифікації вибіркової одиниці

Категорія земного покриття	Підкатегорія земного покриття
Водойми	Ріки; озера; водосховища
Водно-болотні угіддя	Сезонна водойма; болото низинне; болото верхове; бережна рослинність
Населені пункти	Урбанізовані території; сільські території; транспортні шляхи
Інші непродуктивні землі	Піски; каміння; інші землі
Сільськогосподарські угіддя	Рілля; зрошувальні угіддя; незрошувальні угіддя; фруктові сади
Травостої	Луки; травостої з поодинокими деревами; травостої з кушовою рослинністю; розріджена трав'яна рослинність
Чагарники	Чагарники; чагарники з поодинокими деревами
Ліс	Хвойний ліс (частка хвойних видів у деревному наметі >75 %); листяний ліс (частка листяних видів у деревному наметі >75 %); мішаний ліс; позахисні лісосмуги; міські насадження; природне відновлення лісу на сільськогосподарських землях; пошкоджені (ті, що всихають) лісові насадження

Результати досліджень

Аналізуючи можливість розділення різних класів земного покриття, найінформативнішими виявилися канали 6 і 7 короткохвильового інфрачервоного діапазону, а також відношення цих каналів, яке підкреслює відмінності лісових насаджень та інших категорій земного покриття. Аналогічне твердження також стосується співвідношення каналів 5 та 7. Встановлено, що канал 4 червоного та канал 5 інфрачервоного спектрів допомагають виявити відмінності між сільськогосподарськими угіддями та лісовими насадженнями у період стійкого снігового покриття протягом січня. Отже, завдяки щільним часовим серіям знімків Landsat з'являються передумови для розробки фенологічно орієнтованих методів дешифрування лісового покриття.

У зв'язку з великою кількістю показників, які одержано з сезонних мозаїк, виконано оптимізацію

навчальної вибірки. Для цього за допомогою алгоритму машинного навчання Random Forest [Breiman, 2001] змінні, представлені в табл. 1, впорядковано залежно від їхнього внеску в загальну точність класифікації. Алгоритм виконувався за послідовного включення кожної наступної за рангом змінної, починаючи від двох найважливіших (географічна довгота та вегетаційний індекс *NDVI* для річної мозаїки), і завершувався, коли всі 53 показники було включено до моделі. У результаті встановлено, що для дешифрування типів земного покриття найменша помилка класифікації досягається на основі 36 показників [Миронюк, 2017].

Реалізація опрацьованої методики класифікації супутникових знімків Landsat 8 OLI для території рівнинної частини України на персональному комп'ютері – практично нездійсненна задача.

Адже навіть підготовчий етап роботи зі створення сезонних мозаїк потребує великих витрат часу й ресурсів. У зв'язку з цим, алгоритм обробки знімків від самого початку розроблявся на платформі GEE API, а розрахунки виконано віддалено в «хмарному» кластері Google. В результаті для території рівнинної частини України створено дві тематичні карти. Першою з них є карта земного покриття станом на 2014–2016 рр., що включає 8 визначених в табл. 2 тематичних класів. По суті, це найважливіший

результат картографування, який слугує основою для лісової маски – бінарного варіанту землекористування.

Точність класифікації оцінювалася статистично за матрицею помилок (табл. 3). Згідно з сучасними методиками [Olofsson et al., 2014] матрицю трансформовано таким чином, щоб її елементи відображали частку площі генеральної сукупності, якій вони відповідають на карті. Після цього розраховувалися показники точності користувача (user's accuracy) та виробника (producer's accuracy).

Таблиця 3

Матриця помилок класифікації категорій земного покриття за сезонними мозаїками Landsat 8 OLI

Тематичний клас	Опорні дані								Разом
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	інші непродуктивні землі	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс	
Водойми	66	3	0	3	3	2	0	1	78
Водно-болотні угіддя	7	57	0	0	2	6	2	0	74
Населені пункти	1	2	118	3	4	5	14	3	150
Інші непродуктивні землі	0	0	2	6	1	0	0	0	9
С.-г. угіддя	2	17	51	7	1882	148	26	44	2177
Травостої	1	39	42	13	100	504	128	64	891
Чагарники	0	1	1	0	1	5	25	3	36
Ліс	1	19	14	3	23	121	89	1046	1316
Разом	78	138	228	35	2016	791	284	1161	4731

На цій основі виконано розрахунки невизначеності оцінок площі вкритих лісовою рослинністю ділянок. Відповідно до одержаних результатів, з довірчою ймовірністю 0,95, показники точності користувача та виробника для лісової маски коливаються в діапазонах $0,795 \pm 0,022$ та $0,845 \pm 0,025$, а оцінка площі рівнинних лісів становить $8572,4 \pm 317,3$ тис. га, або $15,8 \pm 0,6$ % – у відносних показниках лісистості.

Перевищення майже на 1 % оціненої лісистості рівнинної частини України порівняно з офіційними даними (14,4 %), пояснюється не тільки помилками класифікації, а й інтерпретацією в дослідженні поняття «ліс» у біофізичному розумінні. Відповідно, до цього класу на карті потрапили ділянки, вкриті лісовою рослинністю, що ідентифікуються за знімками на основі відповідного ступеня зімкнутості, висоти деревостану тощо. Загалом помилкам властивий широтний градієнт: тоді як для областей поліського регіону (Волинська, Рівненська, Житомирська, Київська, Чернігівська) точність класифікації за двома показниками перевищує 80 %, для степових областей – істотно поступається та знаходиться на рівні 60–70 %.

Створена лісова маска виявилася точною для нефрагментованих ділянок лісового фонду, проте

невдало відображає вузькі лінійні насадження завширшки до 30 м. Як наслідок, для областей Поліського регіону оцінка площі вкритих лісовою рослинністю ділянок виявилася приблизно на 10 % завищеною. Це можна пояснити відновленням лісу на колишніх сільськогосподарських землях, що не враховано в матеріалах обліку лісів 2011 року. Крім того, розроблена карта не виключає з розрахунку площу зелених насаджень на території населених пунктів. У цілому узгодженість розробленої лісової маски з наземними даними вища порівняно з даними глобальних продуктів [Миرونюк, 2016]. Більша частина неточності лісової маски на півдні пов'язана зі структурою лісового фонду цього регіону. Він переважно представлений захисними лісовими насадженнями лінійного типу, які складно дешифруються за супутниковими знімками Landsat. Отже, помилки класифікації можна пояснити одночасно просторовим розрізненням знімків (30 м) і незадовільним станом полезахисних смуг, на що акцентують увагу українські вчені [Ткач, 2012].

Загалом треба визнати, що «хмарні» обчислення на платформі Google Earth Engine API забезпечили високу ефективність створення, обробки та класифікації сезонних мозаїк

Landsat 8 OLI, а непараметричний метод класифікації Random Forest виявився ефективним під час аналізу багатовимірної навчальної вибірки.

Висновки

Виконані дослідження дозволять сформулювати наступні ключові висновки.

1. Фенологічно орієнтовані методи класифікації знімків, побудовані на аналізі щільних часових рядів супутникових знімків, підвищують точність дешифрування різних типів земного покриву.

2. Площа рівнинних лісів України відповідно до даних Landsat 8 OLI становить $8572,4 \pm 317,3$ тис. га ($7766,7$ тис. га – за офіційними даними), що відповідає показнику лісистості $15,8 \pm 0,6$ % ($14,4$ % – за офіційними даними).

3. Невідповідність оціненої та офіційної площі лісів можна пов'язати як з методичними особливостями дешифрування лісу як біофізичного об'єкта з певним ступенем зімкнутості крон і висотою, так і високою фрагментованістю лісів України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. *Миронюк В. В.* Застосування стратифікованої вибірки для регіональної оцінки площі лісів України за даними глобальних карт лісового покриву / В. В. Миронюк, М. І. Георгіян // Збалансоване природокористування. 2017. Вип. 1. С. 69–74.

2. *Миронюк В. В.* Підбір незалежних змінних для класифікації лісового покриву за сезонними мозаїками / В. В. Миронюк // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2017. Вип. 278. С. 66–76.

3. *Ткач В. П.* Ліси та лісистість в Україні: сучасний стан і перспективи розвитку / В. П. Ткач // Український географічний журнал. 2012. Вип. 2. С. 49–55.

4. *Bey A.* Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation / A. Bey, A. Sánchez-Paus Díaz A., D. Maniatis et al. // Remote Sensing. 2016. Vol. 8(10). P. 807.

5. *Boisvenue C.* Integration of Landsat time series and field plots for forest productivity estimates in decision support models / C. Boisvenue, B. P. Smiley, J. C. White, W. A. Kurz, M. A. Wulder // Forest Ecology and Management. 2016. Vol. 376. P. 284–297.

6. *Breiman L.* Random forests / L. Breiman // Machine Learning. 2001. Vol. 45(1). P. 5–32.

7. *Cohen W. B.* Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing / W. B. Cohen, S. N. Goward // BioScience. 2004. Vol. 54(6). P. 535.

8. *Gómez C.* Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review / C. Gómez, J. C. White, M. A. Wulder // ISPRS Journal

of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 116. P. 55–72.

9. *Gorelick N.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone / N. Gorelick, M. Hancher, M. Dixon et al. // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27.

10. *Hansen M. C.* Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with Web-Enabled Landsat Data (WELD) / M. C. Hansen, A. Egorov, P. V. Potapov et al. // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 140. P. 466–484.

11. *Hansen M. C.* High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change / M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore et al. // Science. 2013. Vol. 342(6160). P. 850–853.

12. *Olofsson P.* Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change / P. Olofsson, G. M. Foody, M. Herold // Remote Sensing of Environment. 2014. Vol. 148. P. 42–57.

13. *Zald H. S. J.* Integrating Landsat pixel composites and change metrics with lidar plots to predictively map forest structure and aboveground biomass in Saskatchewan, Canada / H. S. J. Zald, M. A. Wulder, J. C. White // Remote Sensing of Environment. 2016. Vol. 176. P. 188–201.

MAPPING FLAT LAND FORESTS OF UKRAINE USING DENSE TIME SERIES OF LANDSAT SATELLITE IMAGES

Viktor Myroniuk

Department of Forest Mensuration and Forest Management, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroiv Oborony str., 15, Kyiv, Ukraine, 03041, E-mail: victor.myroniuk@nubip.edu.ua

The paper discusses phenology-based method of mapping forested areas of flatland Ukraine using time series of Landsat 8 OLI images. The study is based on 1548 scenes of images that have been composed in four seasonal mosaics: yearly, summer, autumn, April–October.

The classification has been performed by Random Forest algorithm in Google Earth Engine API cloud-based platform. In total, 36 spectral features of seasonal mosaics were used in the study. About 4700 random points have been visually interpreted by Google images and used as a reference dataset. After classification, the forest mask of flatland Ukraine have been created having 30 m spatial resolution. In average, user's and producer's accuracies is assessed to be $0,795 \pm 0,022$ and $0,845 \pm 0,025$ respectively, although the forest mask is more accurate for Polissia regions and lower – for Steppe zone.

Keyword – forest mask; forest cover; cloud computations; Google Earth Engine