Науковий вісник НЛТУ України
Scientific Bulletin of UNFU
http://nv.nltu.edu.ua
https://doi.org/10.15421/40280105
Article received 23.01.2018 р.
Article accepted 28.02.2018 р.
УДК 630*585

ISSN 1994-7836 (print)
ISSN 2519-2477 (online)

@ Correspondence author
V. V. Myroniuk
victor.myroniuk@nubip.edu.ua

В. В. Миронюк

Національний університет біоресурсів і природокористування України, м. Київ, Україна

КЛАСИФІКАЦІЯ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ЗА СЕЗОННИМИ КОМПОЗИТНИМИ МОЗАЇКАМИ LANDSAT

Розглянуто методику картографування рівнинних лісів України з використанням супутникових знімків Landsat 8 OLI. Класифікацію лісового покриву виконано за допомогою платформи Google Earth Engine (GEE) API, яка забезпечує доступ до архівів супутникових даних і володіє необхідними інструментами для їхнього оброблення. Використано попіксельну процедуру поєднання супутникових знімків у вигляді безхмарних композитних мозаїк за принципом відбору "найкращих" спостережень. Для території рівнинної частини України з архіву відібрано 1548 знімків Landsat 8 OLI, на основі яких створено безхмарні композитні мозаїки для чотирьох сезонів: рік, літо, осінь, квітень-жовтень. Щоб забезпечити повне покриття території досліджень якісними спостереженнями та уникнути пропуску даних, знімки відібрано впродовж 2014–2016 рр. Незалежними змінними для класифікації були спектральні канали видимого та інфрачервоного діапазону, їхні відношення, спектральні перетворення типу "ковпак з кистю", специфічні статистичні метрики, топографічні показники. Для збору опорних даних створено стратифіковану навчальну вибірку обсягом близько 4700 спостережень, а для інтерпретації вибіркових одиниць застосовано загальнодоступні супутникові знімки сервісів Google Maps та Bing Maps. За допомогою класифікаційних моделей Random Forest створено лісову маску, а також тематичну карту, що відображає поширення хвойних, листяних і мішаних лісових насаджень на території рівнинної України. Після перевірки результатів встановлено, що для низки областей степової зони площа лісів виявилася істотно меншою, порівняно з даними офіційної статистики, а для низки північних – навпаки більшою. На основі цього зроблено припущення, що супутникові знімки Landsat 8 OLI дають змогу виявляти процеси природного поновлення лісу на колишніх сільськогосподарських землях українського Полісся, проте їхнє просторове розрізнення недостатнє для картографування насаджень лінійного типу степової зони. Загалом карта характеризується високою точністю (75–88 %). Отримані результати свідчать про доцільність застосування сезонних композитних мозаїк та хмарних технологій для великомасштабного картографування лісів України.

Ключові слова: Google Earth Engine; Random Forest; сезонні композитні мозаїки; лісистість; рівнинні ліси України.

Вступ. Відкритий доступ до архіву знімків Landsat сприяв широкому використанню часових серій супутникових даних для оцінювання стану та динаміки лісових екосистем (Eisavi, Homayouni, Yazdi, & Alimohammadi, 2015; Hansen et al., 2014), класифікації лісових насаджень залежно від їхнього видового складу (Zhu & Liu, 2014), моделювання наземної біомаси деревостанів (Boisvenue, Smiley, White, Kurz, & Wulder, 2016; Zald et al., 2016; Zhu & Liu, 2015), оцінювання таксаційних параметрів, зокрема, суми площ перерізів, деревного запасу та густоти насаджень (Chrysafis, Mallinis, Gitas, & Tsakiri-Strati, 2017). Особливе значення дані Landsat відіграли у розробленні методів моніторингу лісових екосистем на регіональному та глобальному рівнях (Hansen & Loveland, 2012). На основі часових серій супутникових знімків, отриманих протягом одного календарного року або тривалішого періоду, можна вирішувати різні задачі тематичної класифікації. Так, річна серія знімків інформує про фенологічні зміни рослинного покриву чи сезонний стан поверхні різних об'єктів (наприклад, лід, сніговий покрив, пашні) впродовж одного року, а багаторічна – відображає усереднену тривалу динаміку їхнього спектра та найістотніші зміни. Фенологічні зміни допомагають відшукати відмінності між подібними типами земного покриву, зокрема, сільськогосподарськими угіддями та луками, лісовими насадженнями та чагарниками. Зазначене покращує точність тематичного дешифрування супутникових знімків.

Навіть для найтривалішої місії Landsat актуальною є проблема пропуску даних, зумовлена, наприклад, хмарністю або певними технічними перешкодами отримання якісних зображень. Задля усунення цих обмежень науковцями опрацювали алгоритми попіксельного аналізу серій супутникових знімків, що забезпечують відбір "найкращих доступних пікселів" (best-available-pixel – BAP) відповідно до встановлених критеріїв: сезону зйомки, стану земної поверхні, хмарності тощо. У роботі (Wulder, Masek, Cohen, Loveland & Woodcock, 2012) зазначено, що завдяки щільним часовим рядам (dense time series) супутникових знімків Landsat стали доступними методи, які були розроблені до цього виключно для систем з високим темпоральних розрізнен-

Інформація про авторів:

Миронюк Віктор Валентинович, канд. с.-г. наук, докторант кафедри лісової таксації та лісовпорядкування.
Email: victor.myroniuk@nubip.edu.ua

Цитування за ДСТУ: Миронюк В. В. Класифікація лісового покриву за сезонними композитними мозаїками Landsat. Науковий вісник НЛТУ України. 2018, т. 28, № 1. С. 28–33.

Citation APA: Myroniuk, V. V. (2018). Forest Cover Mapping Using Landsat-Based Seasonal Composited Mosaics. *Scientific Bulletin of UNFU, 28*(1), 28–33. https://doi.org/10.15421/40280105

ням MODIS та AVHRR. Насамперед зазначене стосується поєднання знімків (помісячно чи за сезонами) у вигляді безхмарних композитних мозаїк (Hansen et al., 2008; Roy et al., 2010). При цьому на основі часових серій супутникових знімків можна відбирати не тільки BAP, а й застосовувати додаткові статистичні правила, тобто відбирати зі спектральних каналів конкретні значення пікселів: персентилі, медіани, екстремальні значення. Так, для картографування лісового покриву в штаті Огайо, США (Zhu & Liu, 2014) використали 42 спектральні змінні, отримані з часової серії знімків Landsat 5 TM та Landsat 7 ETM+. У дослідженнях (Hansen et al., 2014) загальна кількість вхідних параметрів для класифікації налічувала 137 спектральних показників. Невипадково у літературі часто порушують питання оптимізації набору змінних, потрібних для класифікації синтезованих зображень (Chrysafis et al., 2017).

Застосування сезонних композитних мозаїк загострює увагу на проблемах "великих даних" – типовому питанні для сучасної геоінформатики, оскільки для оброблення багаточасових спектральних даних потрібні потужні обчислювальні системи. Серед сучасних тенденцій у цьому напрямі варто відзначити зростаючу роль "хмарних" технологій, зокрема, платформи Google Earth Engine (GEE) API, яка є одночасно репозиторієм для більшості відкритих даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та програмним середовищем для їхнього аналізу (Gorelick et al., 2017). Увага до цієї платформи зростає, зокрема, її вже успішно застосовували в Україні для дослідження сільськогосподарських культур (Shelestov, Lavreniuk, Kussul, Novikov & Skakun, 2017). Водночас аналіз попередніх результатів досліджень вказує, що сезонні композитні мозаїки Landsat, а також можливості платформи GEE ще не використовували для картографування лісів України. На нашу думку, часові серії супутникових знімків мають важливе значення для розширення можливостей систем дистанційного моніторингу у вирішенні завдань картографування лісів України.

Мета дослідження – апробація методики великомасштабного картографування лісового покриву рівнинної частини України на основі сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI та програмних можливостей платформи для хмарних обчислень Google Earth Engine API.

Матеріал і методика дослідження. *Дослідна територія.* Загальна площа території досліджень становить близько 541 тис. км^2 та охоплює 21 область України (окрім Закарпатської, Івано-Франківської, Чернівецької та АР Крим). На території розташовані практично всі рівнинні ліси України, що зростають у трьох природно-кліматичних зонах: поліській, лісостеповій та степовій. Лісистість областей змінюється від 3,7 (Запорізька) до 36,4 % (Рівненська).

Створення сезонних композитних мозаїк. Супутникові знімки отримано за допомогою платформи GGE API, яка забезпечує доступ до архівів більшості безкоштовних супутникових даних. У дослідженнях використано 1548 знімків Landsat 8 OLI колекції 'LANDSAT/LC8_L1T_TOA'. Для зменшення впливу атмосферних ефектів на результати класифікації відбирали дані з хмарністю не більше 30 % (табл. 1). У просторовому відношенні територію досліджень представляє 59 сцен WRS-2 (path: 174–187, row: 23–29).

Табл. 1. Характеристика знімків Landsat 8 OLI, використаних для створення сезонних композитних мозаїк

Композитна мозаїка для періоду	Початкова дата	Кінцева дата	Частка хмарності території, %	Кількість знімків
Рік	01.01.2014	31.12.2016	30	1548
Літо	01.06.2014	31.08.2014	30	607
	01.06.2015	31.08.2015		
	01.06.2016	31.08.2016		
Осінь	01.09.2014	30.11.2014	20	326
	01.09.2015	30.11.2015		
	01.09.2016	30.11.2016		
Квітень-жовтень	01.04.2014	31.10.2014	20	1020
	01.04.2015	31.10.2015		
	01.04.2016	31.10.2016		

Знімки скомпоновано у вигляді чотирьох сезонних безхмарних мозаїк на основі алгоритму, який максимізує вплив пікселів із найбільшими значеннями індексу *NDVI* та дає змогу відібрати "кращі" спостереження (Hansen et al., 2011). Відповідно до нього із серії спостережень для кожного спектрального каналу відбираються тільки ті пікселі, які не потрапили на хмари. Якщо цей критерій для *i*-го пікселя задовольняють відразу кілька знімків, надається перевага спостереженням з найбільшим значенням *NDVI*. Також за цим принципом до мозаїк були додані канали, створені на основі розрахунку індексу *NDVI* та ортогонального перетворення супутникових знімків типу "ковпак з кистю" – Tasseled-Cap Transformation (TCT). Для цього використано коефіцієнти, отримані емпіричним шляхом у роботі (Baig, Zhang, Shuai & Tong, 2014).

Для мозаїки сезону квітень-жовтень також створили окремі канали, до яких пікселі відбиралися за допомогою певних статистичних правил: медіана, 1-й і 3-й кварталі, а також мінімальні та максимальні значення періоду квітень-жовтень 2014–2016 рр. (табл. 2). На нашу думку, це допомагає виявити сезонну мінливість спектральних властивостей різних категорій земного покриву, зокрема, покращує розпізнавання груп хвойних, листяних і мішаних лісових насаджень.

Табл. 2. Спектральні показники (метрики) сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI

Показник, визначений для мозаїк сезонів: літо, осінь, рік	Показник, визначений для мозаїки сезону квітень-жовтень
Band 4 TOA відбиття	Мінімальне та максимальне значення TOA відбиття для: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7 та NDVI
Band 5 TOA відбиття	
Band 6 TOA відбиття	
Band 7 TOA відбиття	25-й та 75-й персентилі для: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7 та NDVI
NDVI TOA	
Band 4 / Band 5 TOA відбиття	Медіана для: Band 4, Band 5, Band 6, Band 7 та NDVI
Band 4 / Band 7 TOA відбиття	
Band 5 / Band 7 TOA відбиття	Географічні координати X та Y (широта та довгота)
TCT Brightness, Greenness, Wetness	

Створення навчальної вибірки. Для класифікації композитних мозаїк створено стратифіковану випадкову вибірку обсягом близько 4700 спостережень, яку спроектовано на основі глобального набору геоданих Global Forest Change (GFC) відповідно до рекомендацій (Olofsson et al., 2014). Усі вибіркові одиниці візуально дешифровано за знімками високого просторового розрізнення загальнодоступних сервісів Google Maps та Bing Maps у програмному забезпеченні Open Foris (Bey et al., 2016). Під час інтерпретації даних вважалося, що кожна вибіркова одиниця є центром ділянки площею 0,25 га. Для ділянок, що були класифіковані як вкриті

лісовою рослинністю, визначали групу лісових насаджень: хвойні (частка участі хвойних видів за сумою проекцій крон становила понад 75 %), листяні (аналогічна умова, але для листяних видів) та мішані. Врешті-решт, результати візуального дешифрування вибіркових одиниць були поєднані зі значеннями відповідних каналів сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI.

Розроблення класифікаційної моделі. Зважаючи на велику кількість незалежних змінних, розглядали виключно непараметричні методи класифікації супутникових знімків. Останнім часом досить широко почали застосовувати алгоритм машинного навчання Random Forest (RF). По суті, це вдосконалена версія методу класифікаційних і регресійних дерев (CART), в якому кращі класифікаційні дерева обираються після рекурсивної зміни вихідного масиву даних. Він побудований на процедурі bootstarap aggregating або bagging – випадковому формуванні з навчальної вибірки піднаборів даних (приблизно 2/3 від загального обсягу) та побудови дерев рішень. Решта спостережень використовується для оцінки помилок класифікації OBB (out-of-bag). Bagging повторюється *n*-разів, після чого результати від усіх класифікаційних дерев усереднюються. Процедура bootstaraping передбачає створення набору (ансамблю) класифікаційних дерев, які забезпечують меншу мінливість моделі RF (Breiman, 2001).

Картографування лісового фонду рівнинної частини України за даними сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI виконано в два етапи (рис. 1). Спочатку здійснено дешифрування вкритих і невкритих лісовою рослинністю ділянок, внаслідок чого отримано лісову маску. Далі опрацьовано нову класифікаційну модель RF і виконано тематичне дешифрування супутникових даних з виділенням трьох категорій деревостанів залежно від їхнього складу: хвойні, листяні та мішані.

Результати дослідження. На рис. 2 зображено чотири сезонні композитні мозаїки, які використовували для дешифрування груп лісових насаджень залежно від їхнього складу на території рівнинної частини України.

Персентилі розподілу яскравостей пікселів у часовому ряді квітень-жовтень допомагають виявити деякі типи земного покриву за характерною динамікою спектральних характеристик: сезонністю сільськогосподарських робіт, вегетаційними змінами лісових насаджень різного видового складу. Наприклад, на початку вегетаційного періоду значення ТОА відбиття в каналах інфрачервоного спектра для хвойних насаджень будуть більшими, ніж для листяних, а під час активної вегетації – навпаки. Після ретельного аналізу створених композитних мозаїк мінімальні та максимальні значення ТОА відбиття для відповідних каналів (див. табл. 1) були виключені з навчальної вибірки, оскільки вони переважно характеризують затінені ділянки знімків.

Зважаючи на великі обсяги інформації, яку довелося обробляти, класифікацію виконано окремо за адміністративними областями. За результатами розроблених алгоритмів створено тематичну карту, яка відображає просторовий розподіл груп деревних насаджень залежно від їхнього складу для кожної адміністративної області рівнинної частини України (рис. 3).

Обговорення отриманих результатів. Лісову маску оцінювали за матрицями помилок. Загальна точність класифікаційної моделі RF, обчислена за частиною спостережень, які не брали участі у розробленні моделі (out-of-bag error), для всієї території досліджень становить приблизно 75 % (табл. 3). Основні помилки дешифрування лісових насаджень пов'язані із наявністю змішаних ландшафтів, на яких трав'яний покрив чергується з деревною рослинністю. Це призводить до включення до лісової маски ділянок, які фактично не є лісом. Показник точності user's accuracy для лісової маски становить 88 %. Істотно меншим виявився показник producer's accuracy (77 %), який відображає ймовірність пропуску даних. Найчастіше подібні помилки трапляються для лісових насаджень лінійного типу.

Табл. 3. Матриця помилок класифікації категорій земного покриву під час створення лісової маски

Тематичний клас	Опорні дані						
	водойми	водно-болотні угіддя	населені пункти	с.-г. угіддя	травостої	чагарники	ліс
Водойми	68	6	0	1	0	0	3
Водно-болотні угіддя	3	49	2	16	40	1	27
Населені пункти	1	2	108	40	55	2	20
С.-г. угіддя	3	2	12	1807	167	2	25
Травостої	3	9	14	192	447	4	122
Чагарники	0	5	13	23	137	2	104
Ліс	2	1	7	29	93	6	1024

Дешифрування лісових насаджень залежно від їхнього складу виконували теж за адміністративними областями, проте в границях створених лісових масок. Загальну точність класифікації лісових насаджень залежно від їхнього складу, розрахована під час розроблення моделі RF, становить 72 %. Очікувано найбільшу точність мають класи чистих хвойних і листяних насаджень (табл. 4).

Рис. 1. Блок-схема дешифрування груп лісових насаджень за сезонними композитними мозаїками Landsat 8 OLI

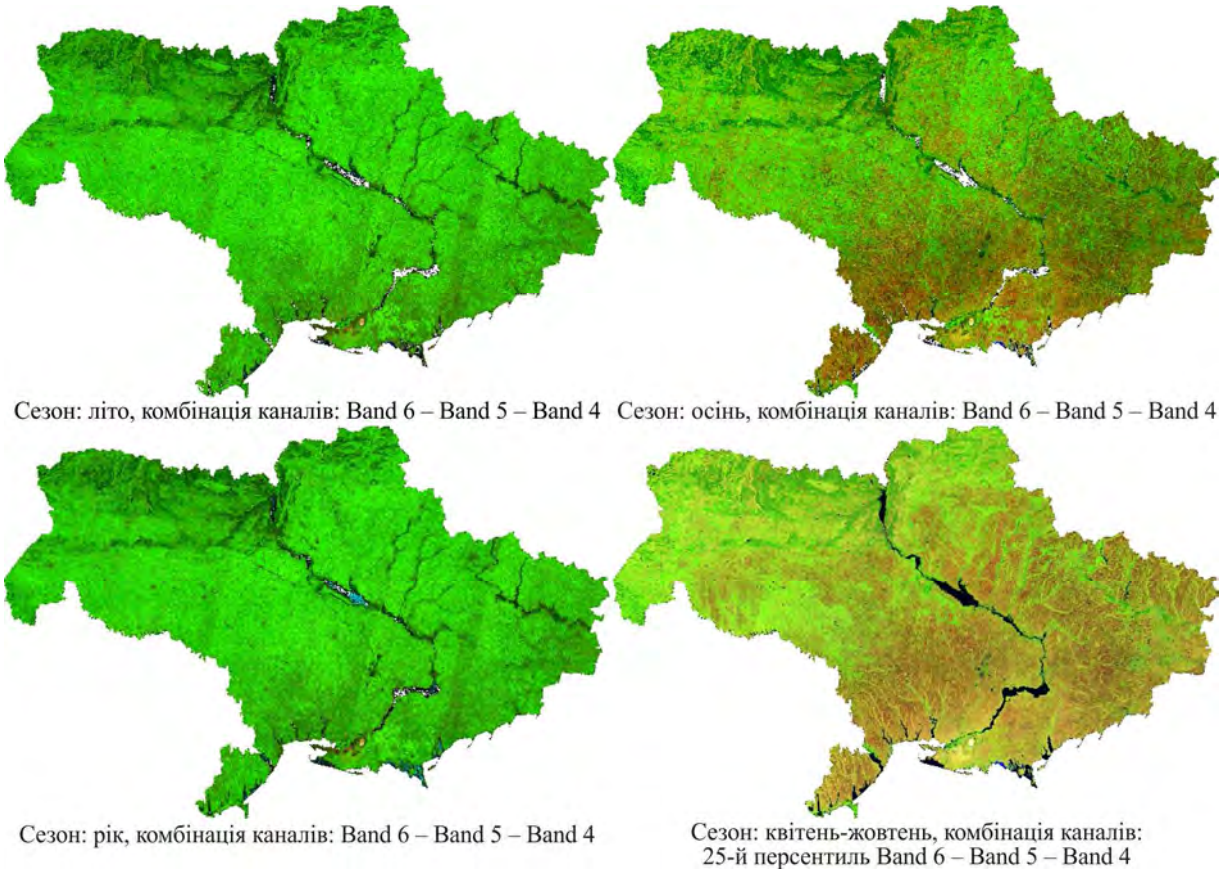

Рис. 2. Сезонні композитні мозаїки Landsat 8 OLI рівнинної частини України для 2014–2016 рр.

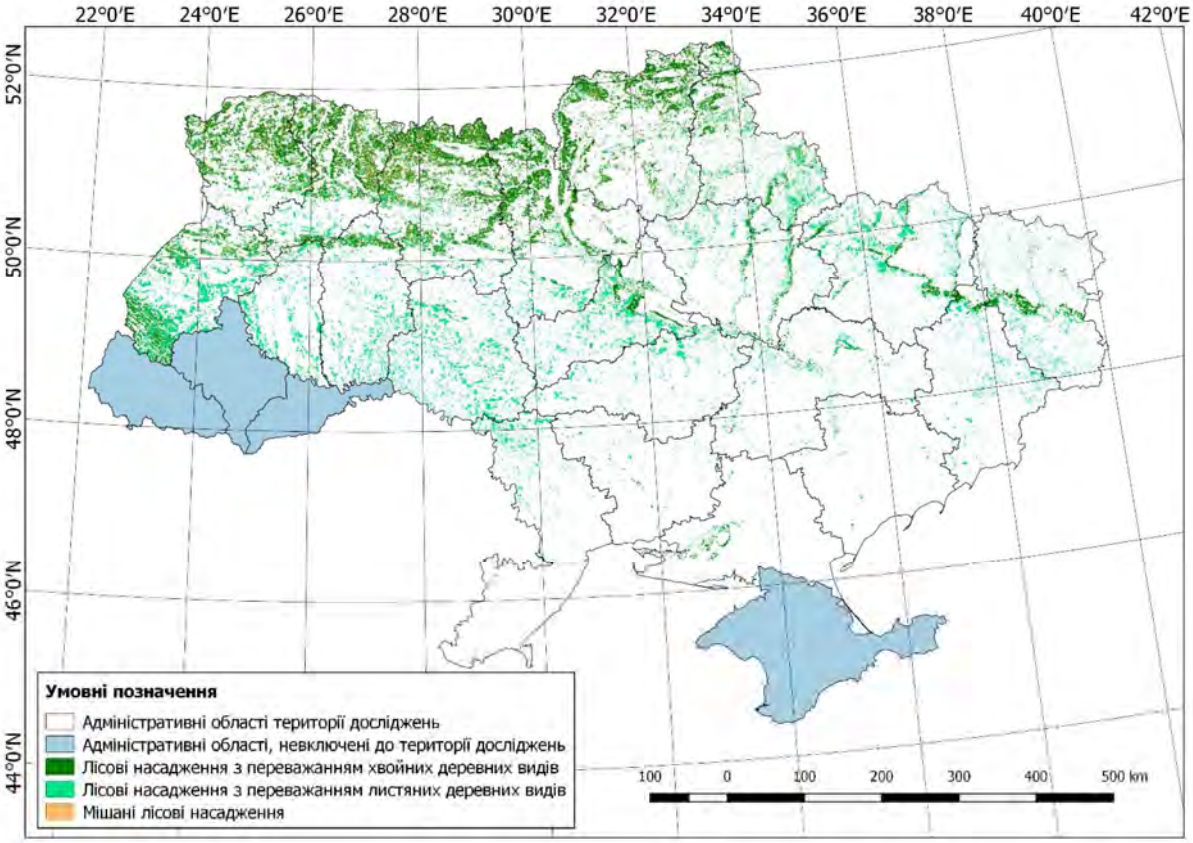

Рис. 3. Лісовий покрив рівнинної частини України за даними дешифрування супутникових знімків Landsat 8 OLI

Аналізуючи точність лісової маски, варто відзначити особливості дешифрування вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок у південних областях України. Лісовий фонд у степовій зоні переважно складається із захисних лісових насаджень лінійного типу, які складно дешифрувати за знімками Landsat. На нашу думку, це можна пояснити двома основними причинами – просторовим розрізненням 30 м і станом полезахисних смуг. Для всіх степових областей України оцінена за супутниковими знімками площа лісових насаджень виявила-

ся істотно меншою порівняно з даними державного обліку лісів станом на 01.01.2011 р. Створена лісова маска має більшу точність для лісових масивів Полісся та Лісостепу, проте неспроможна виявити вузькі лінійні насадження завширшки до 60 м, які переважають у Степу. Для областей поліського регіону спостерігається певне завищення (до 5 %) оцінки лісистості територій. Це можна пояснити заростанням колишніх сільськогосподарських земель, на яких упродовж останніх десятиріч з'явилася значна площа лісових насаджень природного походження, що не враховано в матеріалах обліку лісів 2011 р. Окрім цього, створена лісова маска не виключає з розрахунку площу зелених насаджень на території населених пунктів. Загалом треба констатувати про доцільність використання знімків Landsat для картографування лісів поліського та лісостепового регіонів України. Для створення достовірної лісової маски південних областей потрібно використовувати супутникові знімки більшого просторового розрізнення.

Табл. 4. Матриця помилок дешифрування груп лісових насаджень

Тематичний клас	Опорні дані		
	хвойний ліс	листяний ліс	мішаний ліс
Хвойний ліс	234	22	53
Листяний ліс	8	369	40
Мішаний ліс	66	83	94

Висновки. На основі виконаних досліджень проаналізовано можливості класифікації сезонних мозаїк Landsat 8 OLI з використанням хмарних обчислювальних технологій. Отримані результати дають змогу зробити кілька важливих висновків. По-перше, врахування сезонної динаміки спектральних характеристик різних типів земного покриву відіграє велике значення під час їхньої класифікації за супутниковими знімками оптичного діапазону. По-друге, застосування сезонних композитних мозаїк Landsat 8 OLI є перспективним для великомасштабного картографування лісового покриву України, хоча просторове розрізнення супутникових знімків (30 м) дає змогу розглядати виключно методи дешифрування груп лісових насаджень залежно від їхнього складу. По-третє, платформа GEE виявилася надзвичайно ефективною під час оброблення великих масивів супутникової інформації, зокрема, вирішення завдань масштабного картографування лісового покриву. Зроблені висновки свідчить про необхідність продовження дослідження методів класифікації лісів України з використанням сезонних композитних мозаїк за допомогою сучасних хмарних технологій. Особливої уваги заслуговують питання зменшення розмірності простору ознак класифікації та оптимізації наборів незалежних змінних.

Перелік використаних джерел

Baig, M. H. A., Zhang, L. F., Shuai, T., & Tong, Q. X. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance. *Remote Sensing Letters, 5*(5), 423–431. https://doi.org/10.1080/2150704x.2014.915434

Bey, A., Diaz, A. S. P., Maniatis, D., Marchi, G., Mollicone, D., Ricci, S.,… Miceli, G. (2016). Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation. *Remote Sensing, 8*(10). https://doi.org/10.3390/rs8100807

Boisvenue, C., Smiley, B. P., White, J. C., Kurz, W. A., & Wulder, M. A. (2016). Integration of Landsat time series and field plots for forest productivity estimates in decision support models. *Forest Ecology and Management, 376*, 284–297. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.06.022

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning, 45*(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/a:1010933404324

Chrysafis, I., Mallinis, G., Gitas, I., & Tsakiri-Strati, M. (2017). Estimating Mediterranean forest parameters using multi seasonal Landsat 8 OLI imagery and an ensemble learning method. *Remote Sensing of Environment, 199*, 154–166. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.018

Eisavi, V., Homayouni, S., Yazdi, A. M., & Alimohammadi, A. (2015). Land cover mapping based on random forest classification of multitemporal spectral and thermal images. *Environmental Monitoring and Assessment, 187*(5), 34–39. https://doi.org/10.1007/s10661-015-4489-3

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment, 202, 18–27*. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Hansen, M. C., & Loveland, T. R. (2012). A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. *Remote Sensing of Environment, 122*, 66–74. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024

Hansen, M. C., Egorov, A., Potapov, P. V., Stehman, S. V., Tyukavina, A., Turubanova, S. A., … Bents, T. (2014). Monitoring conterminous United States (CONUS) land cover change with Web-Enabled Landsat Data (WELD). *Remote Sensing of Environment, 140*, 466–484. https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.08.014

Hansen, M. C., Egorov, A., Roy, D. P., Potapov, P., Ju, J. C., Turubanova, S.,… Loveland, T. R. (2011). Continuous fields of land cover for the conterminous United States using Landsat data: first results from the Web-Enabled Landsat Data (WELD) project. *Remote Sensing Letters, 2*(4), 279–288. https://doi.org/10.1080/01431161.2010.519002

Hansen, M. C., Roy, D. P., Lindquist, E., Adusei, B., Justice, C. O., & Altstatt, A. (2008). A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. *Remote Sensing of Environment, 112*(5), 2495–2513. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.11.012

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment, 148*, 42–57. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015

Roy, D. P., Ju, J. C., Kline, K., Scaramuzza, P. L., Kovalskyy, V., Hansen, M.,… Zhang, C. S. (2010). Web-enabled Landsat Data (WELD): Landsat ETM plus composited mosaics of the conterminous United States. *Remote Sensing of Environment, 114*(1), 35–49. https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.08.011

Shelestov, A., Lavreniuk, M., Kussul, N., Novikov, A., & Skakun, S. (2017). Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science, 5*, 1–10. https://doi.org/10.3389/feart.2017.00017

Wulder, M. A., Masek, J. G., Cohen, W. B., Loveland, T. R., & Woodcock, C. E. (2012). Opening the archive: How free data has enabled the science and monitoring promise of Landsat. *Remote Sensing of Environment, 122*, 2–10. https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.010

Zald, H. S. J., Wulder, M. A., White, J. C., Hilker, T., Hermosilla, T., Hobart, G. W., & Coops, N. C. (2016). Integrating Landsat pixel composites and change metrics with lidar plots to predictively map forest structure and aboveground biomass in Saskatchewan, Canada. *Remote Sensing of Environment, 176*, 188–201. https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.01.015

Zhu, X. L., & Liu, D. S. (2014). Accurate mapping of forest types using dense seasonal Landsat time-series. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 96*, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.06.012

Zhu, X. L., & Liu, D. S. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 102*, 222–231. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014

В. В. Миронюк

Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, г. Киев, Украина

КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ПО СЕЗОННЫМ КОМПОЗИТНЫМ МОЗАИКАМ LANDSAT

Рассмотрена методика картирования равнинных лесов Украины с использованием спутниковых снимков Landsat 8 OLI. Классификация лесного покрова выполнена с помощью платформы Google Earth Engine (GEE) API, которая обеспечивает доступ к архивам спутниковых данных и обладает необходимыми инструментами для их обработки. Использована попиксельная процедура сочетания спутниковых снимков в виде безоблачных композитных мозаик по принципу отбора "лучших" наблюдений. Для территории равнинной части Украины из архива отобрано 1548 снимков Landsat 8 OLI, на основе которых созданы безоблачные композитные мозаики для четырех сезонов: год, лето, осень, апрель-октябрь. Чтобы обеспечить полное покрытие территории исследований качественными наблюдениями и избежать пропуска данных, снимки отобраны в течение 2014–2016 гг. Независимыми переменными для классификации были спектральные каналы видимого и инфракрасного диапазона, их отношения, спектральные преобразования типа "колпак с кисточкой", специфические статистические метрики, топографические показатели. Для сбора опорных данных была сформирована стратифицированная обучающая выборка объемом около 4700 наблюдений, а для интерпретации выборочных единиц применены общедоступные спутниковые снимки сервисов Google Maps и Bing Maps. С помощью классификационных моделей Random Forest создана лесная маска, а также тематическая карта, отражающая распространение хвойных, лиственных и смешанных лесных насаждений на территории равнинной Украины. После проверки результатов установлено, что для ряда областей степной зоны площадь лесов оказалась существенно меньшей по сравнению с данными официальной статистики, а для ряда северных – наоборот большей. На основе этого предположено, что спутниковые снимки Landsat 8 OLI позволяют выявлять процессы естественного возобновления леса на бывших сельскохозяйственных землях украинского Полесья, однако их пространственное разрешение недостаточное для картографирования насаждений линейного типа степной зоны. В целом карта характеризуется высокой точностью (75–88 %). Полученные результаты указывают на целесообразность применения сезонных композитных мозаик и облачных технологий для крупномасштабного картографирования лесов Украины.

Ключевые слова: Google Earth Engine; Random Forest; сезонные композитные мозаики; лесистость; равнинные леса Украины.

V. V. Myroniuk

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

FOREST COVER MAPPING USING LANDSAT-BASED SEASONAL COMPOSITED MOSAICS

The paper discusses methods for mapping forests in the plain areas of Ukraine using Landsat 8 OLI satellite images. We used Google Earth Engine (GEE) API for classification of forest cover. GEE is a cloud-based planetary-scale platform which provides access to archives of free satellite data and incudes all necessary tools for their processing. We performed pixel-based composing approach to create cloudless composited mosaics so that best-available-pixels could be selected from a time series of satellite images. Based on 1548 Landsat images, four cloudless mosaics were composed for the following seasons: year, summer, autumn, April-October. To ensure complete coverage of the study area by quality imagery and exclude missing observations we selected images for the period of 2014-2016. We used a number of predictor variables for the classification that included visible and infrared spectral bands, relations of the selected bands, three tessellated cap transformation bands, specific statistical metrics (median, minimal and maximal values, percentiles), and topographic features. The reference dataset included about 4700 random points that were selected within the study area using stratified sampling approach. Each sampling point was visually interpreted using free satellite images from Google Maps and Bing Maps. We used Random Forest classifier to create forest mask and predict tree species composition of forest stands grouped as follows: coniferous, deciduous and mixed. The thematic maps allowed us to estimate total forested area and its distribution between regions of the plain areas of Ukraine. It was found that we underestimated forest area for a number of southern regions located in the Steppe of Ukraine, but we overestimated forested area for the northern regions of Polissya. As a result, we concluded that Landsat 8 OLI images are not allowed to map precisely narrow windbreaks especially if they have low tree cover level. Alternatively, the satellite images could be used to map forests appeared on abandoned agricultural fields which are quite common for Ukrainian Polissya. We used confusion matrixes to assess spatial agreement between reference and mapped pixels. The overall accuracy of the classification is approximately 75-88 %. Finally, we concluded feasibility of our approach for large scale mapping of forests of Ukraine. Application of seasonal composited mosaics increases separability between thematic classes hence cloud-based technologies accelerate computation.

Keywords: Google Earth Engine; Random Forest; time series; forest cover; plain areas of Ukraine.