

**КЛАСИФІКАЦІЯ ЛІСОВКРИТИХ ТЕРИТОРІЙ ЗА
МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИМИ ДАНИМИ**

**CLASSIFICATION OF FORESTED AREAS
BY MULTISPECTRAL DATA**

**Мельник О.В., к.т.н., доц., Манько П.В., аспірант
(Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки,
м. Луцьк)**

**Melnyk O.V. Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Manko P.V.,
Postgraduate Student (Lesya Ukrainka Eastern European National
University, Lutsk)**

***Анотація.** В статті досліджено питання поєднання сучасних відкритих геоінформаційних систем та даних дистанційного зондування Землі в задачах лісовпорядкування. На основі існуючих планів лісонасаджень розроблено класифікатори лісових порід дослідного об'єкта з урахуванням вікових груп та без їх урахування. Здійснено контрольовану класифікацію дослідних об'єктів та проведено оцінку точності отриманих результатів. Встановлено, що точність визначення окремих класів на основі запропонованої методики є тотожною.*

***Summary.** The question of the combination of modern open geoinformation systems and remote sensing data of the Earth in the problems of forest management is investigated in the article. The purpose of this work is to develop a methodology for obtaining and prompt processing of high quality multispectral remote sensing data for mapping and monitoring of forest environments. The multispectral data of the remote sensing of the earth indicate that the waves of the visible and near infrared bands have a great perspective in solving the classification of forests. Accurate identification of forest types is essential for sustainable forest management and planning, for estimating timber reserves and for modeling species and habitat distribution. The object of the study was a fragment of the forest massif within the Osiv and Verbichan forests, located in the Turiysky district of Volyn region, whose area is 65.61 km². On the basis of existing afforestation plans, classifiers of the forest species of the study site were developed, taking into account age groups and without taking them into account. In this paper, we used the method of increasing the area to form training samples. Image classification was performed using the maximum likelihood algorithm, which calculates the probability distribution for the classes according to the Bayesian theorem, estimating the pixel belonging to the land cover class. The most common method of estimating accuracy is to calculate an error matrix that compares the image data obtained with the control data for the corresponding number of classification units. According to the results of the accuracy assessment, the coefficient κ for the classifications according to the training sample, taking into account the age groups and without them, is 90.3% and 91.4%, respectively.*

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, космічний знімок, моніторинг лісів, контрольована класифікація, еталон, метод максимальної вірогідності, метод нарощування області, метод окреслення полігонів.

Keywords: *remote sensing, space shot, monitoring of forests, controlled classification, standard, method of maximum probability, method of field enhancement, method of defining polygons.*

Постановка проблеми. Класифікація лісових масивів потрібна для вирішення широкого кола екологічних питань, пов'язаних з визначенням лісових класів та/або процесів сукцесії [8], міри заліснення та вирубок лісів [6,10], глобальних екологічних змін [12] тощо. Всі ці галузі застосування вимагають дуже точного картографічного відображення та моніторингу типів лісу, що до цих пір було обмежено спектральною, просторовою та досить низькою роздільною здатністю даних, що доступні з відкритих джерел (наприклад, Landsat, MODIS).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Попередні дослідження, що використовують мультиспектральні дані ДЗЗ, вказують на те, що хвилі видимого та близького до інфрачервоного діапазонів мають велику перспективу у вирішенні питання класифікації лісів [7,9,14]

Як альтернатива супутниковому дистанційному зондуванню, безпілотні літальні апарати останнім часом отримують все ширше застосування для отримання докладних даних в масштабі окремих лісових господарств, але їх широкомасштабне застосування все ще знаходиться на експериментальній стадії [3]. Точне визначення типів лісу також має важливе значення для сталого ведення та планування лісового господарства [2], для оцінки запасів деревини та моделювання розподілу видів та ареалів [5].

Мета та завдання досліджень: Площі лісових угідь Волинської області 696 тис. га, з них 62% – ліси державного значення, 37,5% – ліси сільськогосподарських підприємств, 0,5% ліси інших користувачів. За господарським значенням ліси поділяють на 2 групи: захисні ліси – 23% державного фонду (ліси біля доріг, річок, національні парки), експлуатаційні – 77% державного фонду.

Сучасний рівень лісистості Волині 34,6%. Найбільша концентрація в Маневицькому (65% його території), Камінь–Каширському (41%). Найбільш поширеними є хвойні породи – 60% лісів, м'яколистяні (береза, осика) – 24%, твердолистяні – 16%. Лісові ресурси області становлять 16,2% сумарного ПРП і в 4 рази перевищують загально-державний показник.

Місія Sentinel-2 (S2), яка розпочалася у червні 2015 року [15], має великий потенціал для точної класифікації та моніторингу типів лісів у великих масштабах [1]. Навіть якщо S2 не має гіперспектрального датчика, це було спеціально задумано для цілей ведення зондування та пропонує інноваційні функції для дослідження навколишнього середовища [7]. S2

може поєднувати високу просторову роздільну здатність, широке покриття та швидкий час перегляду (близько 5 днів), що дає безпрецедентні можливості для чіткого розрізнення класів наземних покриттів. S2 має багатоспектральний сенсор з 13 смугами, від 0,443 до 2,190 мкм. Мультиспектральні дані у видимому та NIR діапазонах, що доступні в 10 м просторовій роздільній здатності як найкраще придатні для застосування в розпізнаванні рослинних покривів. Також доступні чотири сегменти червоного спектру з роздільною здатністю 20 м на піксель, які підходять для аналізу вмісту хлорофілу та для параметризації еколого-фізіологічних великомасштабних моделей. Незважаючи на свій потенціал, в деяких дослідженнях було оцінено здатність S2 в картографуванні лісів і моніторингу [7]. Використовували фактичні дані S2 для картографування лісів, проте вони використовували "сирі" дані без радіометричної та геометричної корекції, що перешкоджає порівнянню з іншими наборами даних. Дійсно, некореговані дані часто демонстрували артефакти, які обмежують узгодженість інформації, доступної від S2 [7, 13].

Метою даної роботи є розробка методики отримання та оперативної обробки високоякісних даних багатоспектрального дистанційного зондування для картографування та моніторингу лісових середовищ.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження було обрано фрагмент лісового масиву в межах Осівського та Вербичанського лісництв, що знаходяться на території Турійського району Волинської області, площа якого становить 65,61 км²

Методика дослідження. Дані Sentinel-2 містять 13 спектральних смуг з просторовим дозволом 10, 20 і 60 м при 12-бітній радіометричній роздільній здатності. Для подальшого аналізу ми зосередилися лише на діапазонах 10 і 20 м. Три зони просторової розбивки на 60 м не використовувалися в цьому дослідженні, оскільки вони в першу чергу стосуються корекції атмосфери. У цій роботі було використано дані Sentinel 2A, що були завантажені з ресурсу Sentinel Hub (<https://apps.sentinel-hub.com>) рівня 1C станом на 30 серпня 2017 року, код продукту "Sentinel 2A L1C_T35ULS_A011430_20170830T093331".

Для знімків було здійснено атмосферну корекцію та ресамплінг з роздільною здатністю 10 м в середовищі QGIS з використанням розширення Semi-Automatic Classification Plugin [16]. В подальшому отримані знімки було обрізано по області інтересу.

Існуючі плани лісонасаджень для дослідної території слугували як основа для вибору ділянок із характерними видами деревної рослинності, які в подальшому використовувались для створення навчальних вибірок для контрольованої класифікації. На основі знімка супутника Sentinel 2A та плану лісонасаджень масштабу 1:25000 станом на 2012 рік обирались виділи із основними елементами лісу одного виду. Перевага у виборі надавалась виділам із зімкнутими кронами лісових культур. У роботі

використано метод нарощування області для формування навчальних вибірок [17]. Вибір "тренувальних" ділянок проводився в каналах знімку 8-4-2 з довжинами хвиль 0.842 μm , 0.665 μm та 0.490 μm відповідно та роздільною здатністю 10 м.

Початковим завданням було створення класифікатора, що відповідає легенді плану лісонасаджень основних елементів лісу без урахування груп віку. Відповідність видів лісової рослинності та кольорів створених макрокласів представлена в табл. 1.

Таблиця 1.

Відповідність макрокласів і кольорів класифікатора без урахування груп віку

Клас	Колір
Сосна, модрина	
Ялина, ялиця	
Дуб високоствобурний, червоний	
Бук, явір	
Граб, ільмові	
Береза	
Вільха чорна	
Осіка, вільха сіра	

Іншим завданням була спроба оцінки лісових культур досліджуваного лісового господарства з урахуванням груп віку. За аналогічною методикою та на основі створених макрокласів лісової рослинності було розроблено класифікатор, що включає в себе поділ на вікові групи. Відповідність вікових груп рослинності та кольорів класифікатора представлена в табл. 2.

Таблиця.2

Відповідність класів і кольорів класифікатора з урахуванням груп віку

Клас	Вікова група	Колір	Клас	Вікова група	Колір
Сосна, модрина	молодняк		Береза	молодняк	
	середньовікові			середньовікові	
	пристигаючі			пристигаючі	
	стигли та перестиглі			стигли та перестиглі	
Ялина, ялиця	молодняк		Вільха чорна	молодняк	
	середньовікові			середньовікові	
	пристигаючі			пристигаючі	
	стигли та перестиглі			стигли та перестиглі	
Дуб високоствобурний, дуб черв.	молодняк		Осіка, вільха сіра	середньовікові	
	пристигаючі			пристигаючі	
	стигли та перестиглі			стигли та перестиглі	
Граб, ільмові	молодняк		Граб, ільмові	пристигаючі	
	середньовікові			стигли та перестиглі	

Для даних класифікаторів було визначено спектральні сигнатури по кожному з класів. Графічно результати представлені на рис. 1. та рис. 2 відповідно.

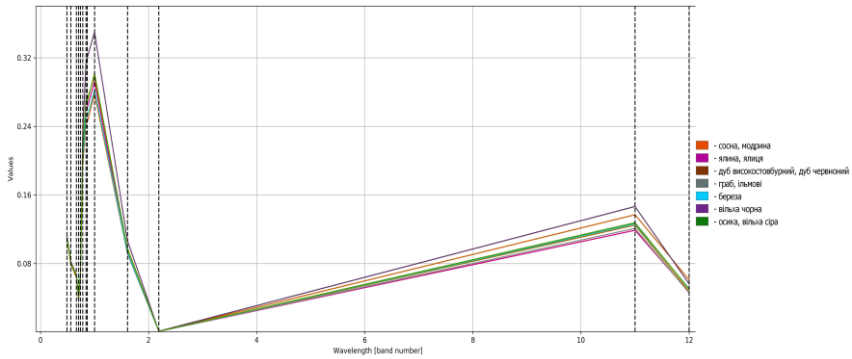


Рис. 1. Графік спектральних сигнатур класифікатора без урахування груп віку.

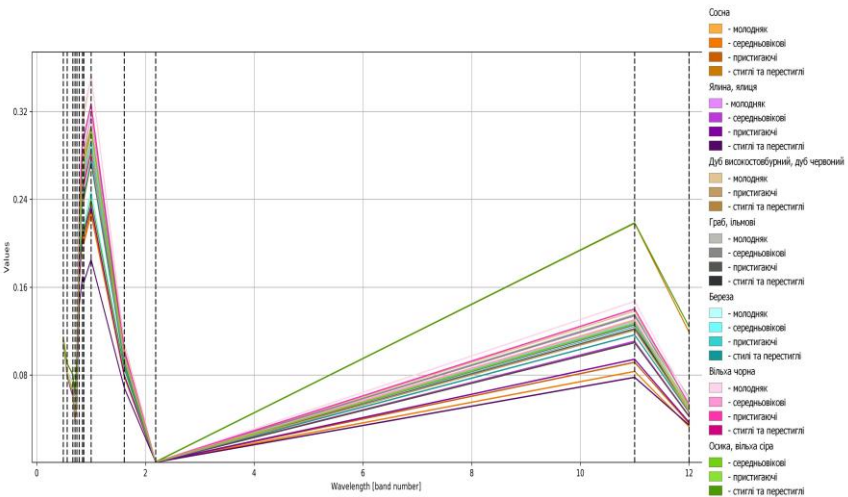


Рис. 2. Графік спектральних сигнатур класифікатора з урахуванням груп віку.

Розподіл ймовірностей для класів вважається формою багатоваріантних нормальних моделей [11]. Для виконання даного алгоритму необхідна достатня кількість пікселів для розрахунку матриці коваріації. Функція дискримінанта, розраховується для кожного пікселя як:

$$g_k(x) = \ln p(C_k) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_k| - \frac{1}{2} (x - y_k)^t \Sigma_k^{-1} (x - y_k) \quad (1)$$

де, C_k - тип наземного покриву k ; x - спектральна сигнатура вектору сигналу пікселя зображення; $p(C_k)$ - вірогідність того, що C_k правильний клас; $|\Sigma_k|$ - визначник коваріаційної матриці даних у класі C_k ; Σ_k^{-1} - обернена коваріаційна матриця; y_k - спектральна сигнатура вектору k .

Тому:

$$x \notin C_k \Leftrightarrow g_k(x) > g_j(x) \forall k \neq j, \quad (2)$$

де, $x_1 \notin g_a(x)$, $x_2 \notin g_a(x)$.

Враховуючи порогове значення для функції дискримінанта для виключення з класифікації пікселів нижче T_i , стан класифікації стає таким:

$$x \notin C_k \Leftrightarrow g_k(x) > g_j(x) \forall k \neq j, \quad (3)$$

де, $g_k(x) > T_i$.

Класифікація за алгоритмом максимальної вірогідності є однією з найбільш поширених контрольованих класифікацій, однак процес класифікації може бути повільнішим порівняно з методом мінімальних відстаней [4].

Результати дослідження. Результатом процесу класифікації є растрове зображення, в якому відповідні ідентифікатори класів співставленні з окремими пікселями вихідного зображення і відображаються в обраній користувачем кольоровій гамі. На основі запропонованої методики та створених навчальних вибірок було виконано контрольовану класифікацію фрагменту території лісового масиву в межах Осівського та Вербичанського лісництв в середовищі QGIS з використанням розширення Semi-Automatic Classification Plugin. Графічно результати контрольованої класифікації за алгоритмом максимальної вірогідності з використанням навчальної вибірки за методом нарощування області представлено на рис. 3 та 4 відповідно.

Найпоширенішим методом оцінки точності є розрахунок матриці похибок, у якій порівнюються дані отриманого зображення з контрольними даними для відповідної кількості класифікаційних одиниць. Відповідно, на основі отриманої матриці похибок розраховується загальна точність класифікації, як відношення вірно класифікованих елементів до загальної кількості елементів вибірки.

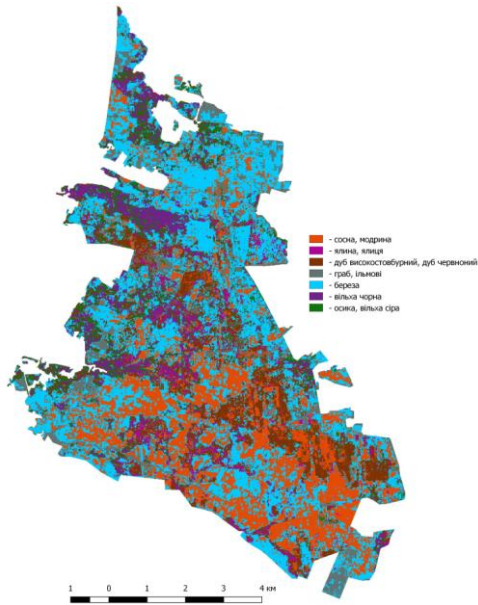


Рис. 3. Результат класифікації без урахування вікових груп лісів.

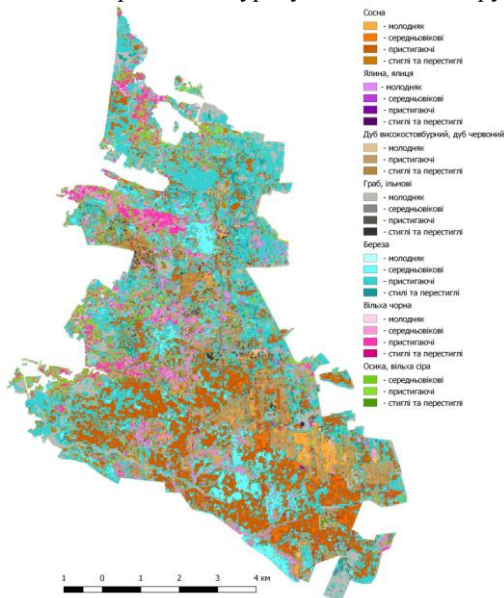


Рис. 4. Результат класифікації з урахуванням вікових груп лісів.

Відповідні матриці похибок класифікації наведених вище методик представлені в табл. 3 та табл. 4.

Таблиця 3.

Матриця похибок класифікації без урахування вікових груп лісів.

№	1	2	3	4	5	6	7	Total
1	1609	2	79	2	1	0	1	1694
2	10	317	0	2	1	6	2	338
3	67	4	775	2	2	1	8	861
4	36	5	15	429	7	2	5	499
5	4	0	1	5	1196	2	8	1265
6	3	0	1	0	7	604	7	625
7	5	1	17	0	10	8	384	426
Total	1734	329	888	440	1224	625	417	5712

Таблиця 4.

Матриця похибок класифікації з урахуванням вікових груп лісів.

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	Total		
1	1051	0	0	0	0	2	0	0	0	0	79	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1135	
2	0	209	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	209	
3	0	0	243	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	243	
4	0	0	0	106	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	107	
5	10	0	0	0	173	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	0	0	4	2	0	1	1	1	0	194	
6	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	
7	0	0	0	0	0	0	45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	45	
8	0	0	0	0	0	0	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	
9	2	0	0	0	0	0	0	0	143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145	
10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	143	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	2	0	0	164	
11	62	0	0	0	4	0	0	0	0	2	473	0	2	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	3	0	552	
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	104	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	119	
13	19	0	0	0	5	0	0	0	2	0	4	0	120	0	0	0	1	0	0	2	0	0	0	5	0	0	0	158	
14	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	127	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	145	
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	77	
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	499	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	499	
18	4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	1	435	8	0	2	0	2	6	0	0	495	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	35	157	0	0	0	0	0	0	0	0	211	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	38	0	0	0	0	0	0	38	
21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	374	2	0	0	0	0	0	378	
22	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	7	0	7	140	2	5	2	0	0	0	0	168	
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	0	0	0	0	0	41	
24	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	3	0	0	0	0	0	0	2	0	0	8	0	154	36	0	0	0	206	
25	5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	12	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	150	0	176	
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	44	44
Total	1176	209	243	106	183	57	45	44	145	147	596	109	127	127	77	58	504	497	165	40	387	155	43	167	206	44	5712		

Згідно результатів проведеної оцінки точності встановлено, що коефіцієнт k для класифікацій за навчальною вибіркою з урахуванням вікових груп та без їх урахування становить 90.3% та 91.4% відповідно.

Висновки. Сучасні відкриті дані дистанційного зондування Землі високої роздільної здатності дозволяють у повній мірі вдосконалити методику таксації лісових масивів, зокрема визначення переважаючих порід. Створені класифікатори, в основу яких були покладені існуючі плани лісонасаджень, дозволяють вирішувати широке коло завдань, пов'язаних із визначенням лісових класів та/або сукцесійних процесів, міри заліснення та вирубок лісів. На основі результатів проведеної оцінки точності можна стверджувати, що результати класифікації лісових масивів тотожні як з урахуванням вікового складу, так і без.

Отримані результати можуть, в певній мірі, слугувати доповненням до архівних картографічних матеріалів при проведенні лісотаксаційних робіт, або оновленні існуючих матеріалів. Важливим невіршеним питанням є

точність визначення окремих класифікаційних вибірок для порід, що у відсотковому складі становлять мізерно малу частку у лісовому масиві.

References

1. Laurin G.V. Optical and SAR sensor synergies for forest and land cover mapping in a tropical site in West Africa / Laurin G.V., Liesenberg V., Chen, Q., Guerriero, L. Del Frate, F., Bartolini, A., Coomes D., Wilebore, B., Lindsell, J., Valentini, R. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. Vol. 21. P. 7-16. DOI: 10.1016/j.jag.2012.08.002
2. Hirose K. Contribution of Hyperspectral Applications to Tropical Peatland Ecosystem Monitoring / Hirose K., Osaki, M., Takeda, T., Kashimura O., Ohki, T., Segah H., Gao Y., Evri M// *Tropical Peatland Ecosystems*. 2016. ISBN 978-4-431-55681-7
3. Omruuzun F. Utilizing hyperspectral remote sensing imagery for afforestation planning of partially covered areas / Omruuzun F., Baskurt D.O., Daglayan H., Cetin Y.Y. // *In SPIE Remote Sensing* (pp. 96432N-96432N). International Society for Optics and Photonics. 2015. DOI:10.1117/12.2196532
4. Trumbore S. Forest health and global change / Trumbore S., Brando P., Hartmann H. // *Science*. 2015. Vol 349. P. 814-818. DOI: 10.1126/science.aac6759
5. Immitzer M. First experience with sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe / Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. // *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8, Issue 3. P. 166. DOI: 10.3390/rs8030166
6. Moore, M.M. Classification of forest vegetation in North-Central Min- nesota using Landsat multispectral scanner and thematic mapper data / Moore, M.M., Bauer, M.E. // *Forest Science*. 1990. Vol. 36. Issue 2. P. 330–342.
7. Waser, L.T. Evaluating the potential of WorldView-2 data to classify tree species and different levels of ash mortality/ Waser, L.T., Kuchler, M., Jütte, K., Stampfer, T. // *Remote Sensing*. 2014. Vol.6. Issue 5. P. 4515–4545. DOI: 10.3390/rs6054515
8. Chianucci F. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV / Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastri C., Rindinella A., Corona P. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. Vol. 47. P.60-68. DOI: 10.1016/j.jag.2015.12.005
9. Barbati A. European forest types and forest Europe SFM indicators: tools for monitoring progress on forest biodiversity conservation / Barbati A., Marchetti M., Chirici G., Corona P. // *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol 321. P. 145-157. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.004
10. Foody G. M. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions / Foody G. M., Boyd D. S., Cutler M. E. // *Remote sensing of environment*. 2003. Vol. 85, Issue 4. P. 463-474. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00039-7
11. ESA Sentinel online. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (date of appeal: 05.09.2018)
12. Baillarin S.J. Sentinel-2 level 1 products and image processing performances / Baillarin S.J., Meygret A., Dechoz C., Petrucci B., Lacherade S., Tremas T., Isola C.,

Martimort P. Spoto F. // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. 2012. P. 7003-7006. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351959

13. Vaiopoulos A.D., Karantzas K. Pansharpening on the Narrow Vnir and SWIR Spectral Bands of SENTINEL-2 // ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2016. P. 723-730. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B7-723-2016

14. QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System // QGIS. URL: <http://www.qgis.org/> (date of appeal: 04.09.2019).

15. Melnyk O. Classification of Volyn woodlands according to many spectral satellite images / Melnyk O., Manko P. // Scientific Journal «ScienceRise» №9(50)2018

16. Richards, J. A. and Jia, X. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction: monography / res. editor Richards, J. A. Berlin: Springer 2006. 438 p. DOI 10.1007/3-540-29711-1

17. Congedo L. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation // ResearchGate. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

Список використаної літератури

1. Laurin G.V. Optical and SAR sensor synergies for forest and land cover mapping in a tropical site in West Africa / Laurin G.V., Liesenberg V., Chen, Q., Guerriero, L. Del Frate, F., Bartolini, A., Coomes D., Wilebore, B., Lindsell, J., Valentini, R. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. Vol. 21. P. 7-16. DOI: 10.1016/j.jag.2012.08.002

2. Hirose K. Contribution of Hyperspectral Applications to Tropical Peatland Ecosystem Monitoring / Hirose K., Osaki, M., Takeda, T., Kashimura O., Ohki, T., Segah H., Gao Y., Evri M // Tropical Peatland Ecosystems. 2016. ISBN 978-4-431-55681-7

3. Omruuzun F. Utilizing hyperspectral remote sensing imagery for afforestation planning of partially covered areas / Omruuzun F., Baskurt D.O., Daglayan H., Cetin Y.Y. // In SPIE Remote Sensing (pp. 96432N-96432N). International Society for Optics and Photonics. 2015. DOI:10.1117/12.2196532

4. Trumbore S. Forest health and global change / Trumbore S., Brando P., Hartmann H. // Science. 2015. Vol 349. P. 814-818. DOI: 10.1126/science.aac6759

5. Immitzer M. First experience with sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe / Immitzer M., Vuolo F., Atzberger C. // Remote Sensing. 2016. Vol. 8, Issue 3. P. 166. DOI: 10.3390/rs8030166

6. Moore, M.M. Classification of forest vegetation in North-Central Minnesota using Landsat multispectral scanner and thematic mapper data / Moore, M.M., Bauer, M.E. // Forest Science. 1990. Vol. 36. Issue 2. P. 330-342.

7. Waser, L.T. Evaluating the potential of WorldView-2 data to classify tree species and different levels of ash mortality/ Waser, L.T., Küchler, M., Jütte, K., Stampfer, T. // Remote Sensing. 2014. Vol.6. Issue 5. P. 4515-4545. DOI: 10.3390/rs6054515

8. Chianucci F. Estimation of canopy attributes in beech forests using true colour digital images from a small fixed-wing UAV / Chianucci F., Disperati L., Guzzi D., Bianchini D., Nardino V., Lastrì C., Rindinella A., Corona P. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. Vol. 47. P.60-68. DOI: 10.1016/j.jag.2015.12.005

9. Barbati A. European forest types and forest Europe SFM indicators: tools for monitoring progress on forest biodiversity conservation / Barbati A., Marchetti M., Chirici G., Corona P. // *Forest Ecology and Management*. 2014. Vol 321. P. 145-157. DOI: 10.1016/j.foreco.2013.07.004
10. Foody G. M. Predictive relations of tropical forest biomass from Landsat TM data and their transferability between regions / Foody G. M., Boyd D. S., Cutler M. E. // *Remote sensing of environment*. 2003. Vol. 85, Issue 4. P. 463-474. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00039-7
11. ESA Sentinel online. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2> (дата звернення: 05.09.2018)
12. Baillarin S.J. Sentinel-2 level 1 products and image processing performances / Baillarin S.J., Meyret A., Dechoz C., Petrucci B., Lacherade S., Tremas T., Isola C., Martimort P. Spoto F. // *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2012. P. 7003-7006. DOI: 10.1109/IGARSS.2012.6351959
13. Vaiopoulos A.D., Karantzalos K. Pansharpening on the Narrow Vnir and SWIR Spectral Bands of SENTINEL-2 // *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. P. 723-730. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B7-723-2016
14. QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System // QGIS. URL: <http://www.qgis.org/> (дата звернення: 04.09.2018).
15. Мельник О. В. Класифікація лісових масивів Волині за даним багато спектральних супутникових знімків / О. В. Мельник, П. В. Манько. // *Scientific Journal «ScienceRise»*. – 2018. – №9
16. Richards, J. A. and Jia, X. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction: monography* / res. editor Richards, J. A. Berlin: Springer 2006. 438 p. DOI 10.1007/3-540-29711-1
17. Congedo L. *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation* // ResearchGate. DOI: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>