

**ДИНАМІКА ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ
ВІДЧУЖЕННЯ ЗА ДАНИМИ ГЛОБАЛЬНОЇ КАРТИ ЛІСОВИХ
ЕКОСИСТЕМ ВИСОКОГО РОЗРІЗНЕННЯ**

С.В. Зібцев, доктор сільськогосподарських наук

В.В. Миронюк, Д.В. Гілітуха, кандидати сільськогосподарських наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

У статті обґрунтовано передумови використання матеріалів космічної зйомки для моніторингу лісів на територіях, які зазнали радіоактивного забруднення. На основі даних власних досліджень виконано класифікацію глобальної карти лісових екосистем та визначено динаміку площі лісів на території Чорнобильської зони відчуження протягом 2000–2013 років.

***Ключові слова:** класифікація даних ДЗЗ, глобальна карта змін лісового покриву, зімкнутість лісового намету, площа лісів.*

Технології спостереження за станом земного покриву з космосу набувають в сучасних умовах все більшого значення. Переконливим свідченням ефективності використання космічних знімків для практичних і наукових цілей є постійне розширення спектра задач, які вирішують завдяки результатам обробки космічних знімків. Більшість завдань моніторингу лісів неможливо реалізувати без використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а для територій, які зазнали значного радіоактивного забруднення в результаті катастрофи на Чорнобильській АЕС, вони відіграють виключно важливе значення [1].

Під час космічного моніторингу лісів основна увага традиційно відводиться супутникам, що забезпечують мультиспектральну зйомку та широке охоплення території. Перші дослідження рослинного покриву Землі були пов'язані із запуском супутника NOAA з системою AVHRR, яка забезпечувала щоденну зйомку земної поверхні з просторовим розрізненням

1 км. На початку 1990-х років на основі цих даних була створена перша глобальна карта земного покриття GLC (Global Land Cover). Під час створення карти використано 17 типів земної поверхні, які визначалися за допомогою індексу *NDVI*. Приблизно через 10 років робота була повторена за даними сенсора SPOT Vegetation [3].

Новий етап досліджень розпочався після запуску на початку 2000-х років гіперспектральної системи MODIS, встановленої на супутнику Terra, а дещо пізніше – й Aqua. Вона забезпечує щоденне вимірювання яскравості всієї земної поверхні в 36 спектральних діапазонах із просторовим розрізненням основних каналів до 250 і 500 м. У зв'язку з цим в університеті Меріленд, США було розроблено новий тип похідних продуктів MOD44, що представляє принципово інший підхід для характеристики рослинного покриття за допомогою, так званих, неперервних полів рослинності VCF (Vegetation Continuous Fields) [6]. Вони відображають процентне співвідношення трьох компонентів: деревної, трав'яної рослинності й некритих рослинним покривом ділянок земного покриття. Вчені наполягають, що перехід до неперервного тематичного картографування характеристик дискретних об'єктів спрощує їхній кількісний аналіз у часі.

Такий підхід добре узгоджується з завданням оцінки динаміки лісу як природного феномену, що має істотну мінливість таксаційних показників у просторі. У той час як традиційні методи класифікації дозволяють виявити, де знаходяться відповідні типи рослинних угруповань, VCF вказують скільки у відсотках від 0 до 100 % такого «лісу» або «трав'яної рослинності» існує на певній ділянці земної поверхні. Очевидно, що для лісових масивів цей показник має відповідати зімкнутості насаджень, а в районах із фрагментарним розміщенням лісів серед безлісних територій – лісистості території. Переваги запропонованого підходу були неодноразово підтвержені під час моделювання та моніторингу природних екосистем. Наприклад, вчені Інституту прикладного системного аналізу IIASA використали дані VCF під час створення гібридних продуктів, які крім основних типів земного покриття дозволяють визначати

більш детальні характеристики (для лісу – це переважаючі деревні види, вік, запас тощо) [9].

Спочатку алгоритм створення продуктів MOD44 вимагав значного втручання спеціалістів під час інтерпретації окремих типів земного покриття. Завдяки сучасним методам машинного навчання його остання версія зводить суб'єктивний фактор до мінімуму. Навчальні набори даних формують за чотирма класами (0, 25, 50, 80+ %) після дискретної класифікації знімків Landsat за відсотком лісового покриття (або зімкнутістю намету). Одержані значення уточнюють за знімками з кращим просторовим розрізнення (Ikonos, QuickBird тощо) і за необхідності коригують. Після узагальнення даних до 250 м розрізнення створюють відповідну класифікаційну модель [5].

Подальший розвиток ідеї неперервного картографування лісових екосистем пов'язаний зі створенням більш детальних карт, що вдалося реалізувати в 2013 році в університеті Меріленд у вигляді глобальної карти змін лісового покриття (High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change) [7]. Вона розроблена на основі даних систем Landsat-5 TM та Landsat-7 ETM+ і відображає динаміку лісового покриття з 2000 по 2013 роки. Не зважаючи на певну критику цього продукту серед деяких науковців і представників державних організацій, карта забезпечує незалежне оцінювання стану лісового покриття з розрізненням 30 м. Зазначене робить її цінною для дослідження лісових екосистем не тільки на глобальному, а й локальному рівні. Особливий інтерес представляє глобальна карта лісових екосистем для вивчення динаміки лісів на територіях зі значним рівнем радіоактивного забруднення.

Мета досліджень – проаналізувати зміни в лісовому покриві Чорнобильської зони відчуження, які відбулися протягом 2000–2012 років, за даними неперервної карти лісових екосистем високого просторового розрізнення, розробленої в університеті Меріленд [7].

Матеріали та методика досліджень. Зона відчуження Чорнобильської АЕС розташована в північній частині Київської області у межах Поліського та

Іванківського адміністративних районів. Територія, на якій виконувалися дослідження площею 240,57 тис. га, підпорядкована державному спеціалізованому комплексному підприємству (ДСКП) «Чорнобильська пуща». Відповідно до даних лісовпорядкування станом на 2006 рік площа вкритих лісовою рослинністю ділянок складає 150013,2 га.

Із метою проведення аналізу й обробки інформації використано статистичну систему R, яка є вільним програмним забезпеченням. Геопросторова інформація, завдяки спеціальним пакетам для її обробки, може бути використана на серйозному рівні для вирішення різноманітних наукових задач. Істотно спрощує аналіз глобальної карти лісів, розробленої в університеті Меріленд, пакет *gfcanalysis*. Його було завантажено із загального репозиторію системи CRAN (Comprehensive R Archive Network) [10].

Глобальний набір даних [7] складається з фрагментів (тайлів), розділених сіткою розміром $10 \times 10^\circ$. Після завантаження масиву вихідних даних виявилось, що територія Чорнобильської зони відчуження потрапляє одночасно у два фрагменти в діапазоні $50\text{--}60^\circ \text{ N}$ і $20\text{--}40^\circ \text{ E}$. Для кожного з них було отримано п'ять файлів: *treecover2000* – дані про зімкнутість намету деревної рослинності заввишки понад 5 м станом на 2000 рік у формі неперервного зображення зі значеннями вихідного растру від 0 до 100; *loss* – інформація про загальні втрати лісів, тобто будь-якої форми перетворення вкритих лісовою рослинністю ділянок на непокриті протягом 2000–2013 рр. (закодована як 1 – є втрати, 0 – втрати відсутні); *gain* – аналогічна інформація про загальне збільшення площі лісів для періоду 2000–2012 рр. (1 – є відновлення, 0 – відновлення відсутнє); *lossyear* – щорічна втрата лісів для періоду 2000–2013 рр. (0 – втрати відсутні, значення 1–12 – щорічні втрати лісів протягом зазначеного періоду); *datamask* – три значення, що представляють такі площі: 0 – інформація відсутня, 1 – земна поверхня, 2 – водні об'єкти. Для отримання даних про динаміку лісів використано спеціальний алгоритм для системи R:

```
> # Створення багатоканального растру із даних карти лісів для АОІ
> gfc_extract <- extract_gfc(aoi, output_folder,
+                             filename = "chornobyl_UTM.tif")
> # Класифікація даних глобальної карти лісів
```

```

> gfc_thresholded <- threshold_gfc(gfc_extract, forest_threshold = 20,
+                               filename = "Chornobyl_thresholded.tif")
> # Розрахунок щорічної статистики про динаміку лісів у гектарах
> gfc_stats <- gfc_stats(aoi, gfc_thresholded)
> # Збереження щорічної динаміки лісів у вигляді окремих растрів
> gfc_annual_stack <- annual_stack(gfc_thresholded)
> writeRaster(gfc_annual_stack, filename="Chornobyl_annual.tif",
+            format="GTiff", bylayer = T)

```

В основу класифікації глобальної карти лісів для зони Полісся України покладено дослідження зімкнутості низькоповнотних насаджень, що детально описані у роботі [2]. Для обчислення змін у лісовому фонді зони відчуження за період 2000–2012 рр. під час класифікації глобальної карти лісів використано порогове значення зімкнутості намету 20 %, яке згідно з нашими дослідженнями за умов Полісся України відповідає повноті насаджень 0,3 [2].

Результати досліджень. На основі глобальної карти лісів встановлено динаміку зміни площі лісів у зоні відчуження та її загальне збільшення завдяки лісовідновленню. Враховуючи поступовість процесу лісовідновлення, його площу за даними глобальної карти лісів обчислено лише загалом за весь період (7114 га). Детальну інформацію про динаміку лісового покриву в зоні відчуження представлено в табл. 1.

1. Динаміка лісового фонду Чорнобильської зони відчуження за даними ДЗЗ

Рік	Вкриті лісовою рослинністю, га	Втрати лісів, га	Рік	Вкриті лісовою рослинністю, га	Втрати лісів, га
2000	163077	–	2007	161727	90
2001	163003	74	2008	161660	67
2002	162954	49	2009	161505	155
2003	162808	146	2010	161361	144
2004	162632	176	2011	160784	577
2005	162472	160	2012	160326	458
2006	161817	655			

Наведені дані дозволяють простежити динаміку змін лісового покриву на території зони відчуження за тринадцятирічний період. Відзначимо, що за винятком 2006 року протягом останніх років втратити лісів істотно зросло. В першу чергу це пояснюється поширенням осередків хвороб та спалахів розвитку шкідників лісу, що призводить до загибелі деревостанів.

Площа лісів за даними ДЗЗ дещо перевищує офіційні дані. Зазначена обставина пояснюється, в першу чергу, невідповідністю інтерпретації поняття «ліс» наземними і дистанційними методами. Із метою оцінювання точності класифікації використано статистичний підхід. Матрицю помилок було створено після співставлення результатів класифікації даних ДЗЗ та аналітичного дешифрування 1000 вибірових одиниць (точкових об'єктів), випадково розміщених на космічному знімку RapidEye (дата зйомки – 02.05.2013 р.). Із метою актуалізації карти лісів станом на 2013 рік від базового шару *treecover2000* було віднято всі втрати лісів, які сталися протягом 2000–2013 років, і додано сумарну площу лісовідновлення за цей період (рис. 1).

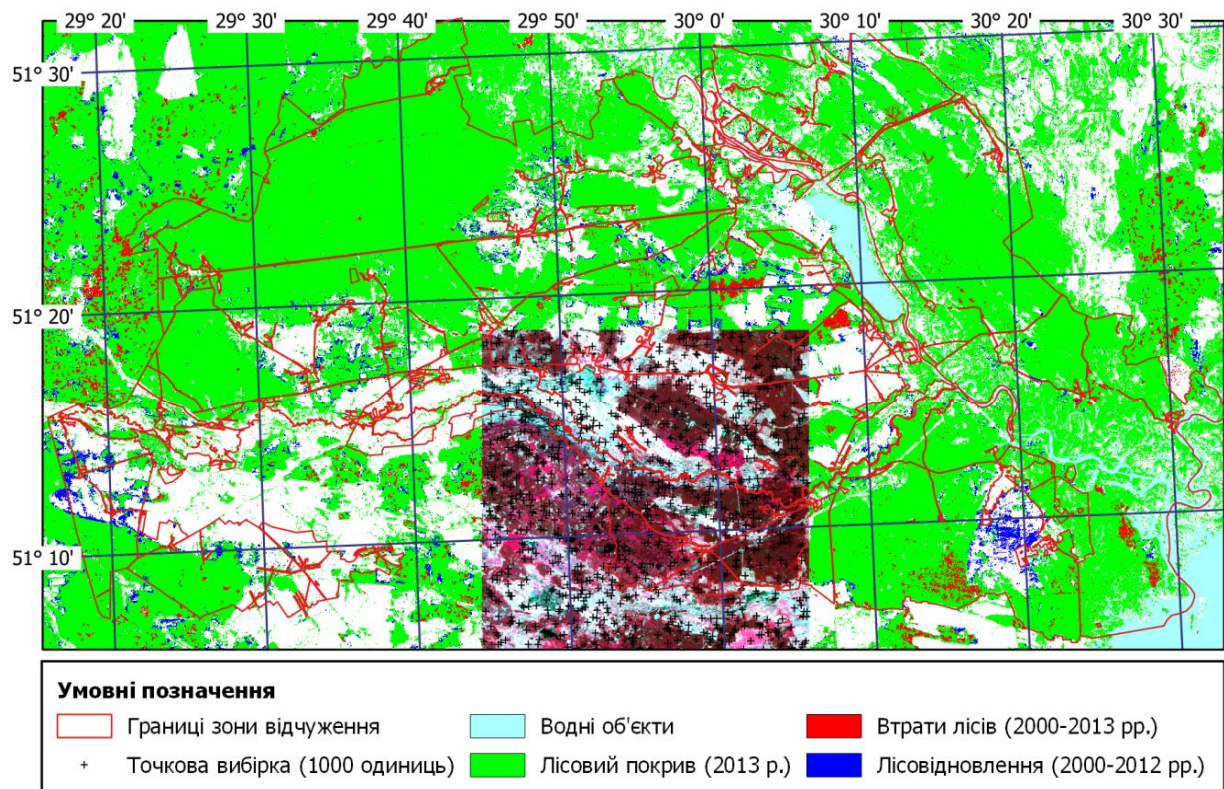


Рис. 1. Оцінювання точності карти лісового покриття Зони відчуження за знімком RapidEye

Після аналізу кожної точки було побудовано матрицю помилок (табл. 2), яка дає змогу оцінити основні показники точності бінарної класифікації даних [4]. У цілому треба відзначити високу точність класифікації території зони відчуження за даними глобальної карти лісів, розробленої в університеті

Меріленд. Загальна точність класифікації становить близько 91 %, а значення статистики Каппа – 0,81. Одночасно з табл. 2 можна простежити, що частка вкритих лісовою рослинністю ділянок відповідно до результатів класифікації є недооціненою (сума рядка n_h менша порівняно з сумою відповідної колонки n_l). Звідси випливає, що частина точок, які дійсно належать до вкритих лісовою рослинністю ділянок, потрапили до іншого класу.

2. Розподіл вибірових одиниць за класами земного покритву

Страта (h)	Клас (l)				Разом	
	вкриті лісовою рослинністю ділянки		невкриті лісовою рослинністю ділянки			
	$n_{h,l}$	$P_{h,l}$	$n_{h,l}$	$P_{h,l}$	n_h	P_h
Вкриті лісовою рослинністю ділянки	554	0,936	38	0,064	592	100
Невкриті лісовою рослинністю ділянки	54	0,132	354	0,868	408	100
Разом (n_l / P_l)	608	0,608	392	0,392	1000	100

Із джерел літератури відомо, що помилки тематичної класифікації можна виправити на основі ймовірності їхньої появи відповідно до матриці помилок. Такий підхід використовується в системі статистичної інвентаризації лісів Фінляндії для коригування неточності карт під час обчислення показників лісового фонду для невеликих територій [8]. Її ідея полягає в наступному.

Після класифікації космічних знімків отримують певну кількість однорідних страт h , для кожної з яких визначається частка ($P_{h,l}$) класу l :

$$P_{h,l} = \frac{n_{h,l}}{n_h} \quad (1)$$

Відштовхуючись від того, що помилки класифікації рівномірно розміщені на карті, частку $P_{h,l}$ можна використовувати для коригування оцінок площі класу l як для всієї території, так і її частини:

$$A'_l = \sum_h P_{h,l} \cdot A_h \quad (2)$$

де A'_l – незміщена оцінка площі для класу l ;

A_h – площа страти h відповідно до тематичної карти.

Наведений алгоритм дозволяє скоригувати площу лісів зони відчуження станом на 2013 р.

$$A_t^i = (160326 + 7114) \cdot 0,936 + (240570 - 163026 - 7114) \cdot 0,132 = 166377 \text{ га.} \quad (3)$$

Таким чином, протягом вказаного періоду площа лісів зони відчуження зростає понад як на 3000 га. Це відбулося за рахунок заліснення земель, які вийшли з-під сільськогосподарського користування. Саме неврахування площі лісових насаджень, які з'являються на землях сільськогосподарського призначення, є основною причиною розходження результатів дистанційних і наземних підходів. Одночасно не можна залишити поза увагою істотні втрати лісів у зоні, де заборонена будь-яка господарська діяльність. Цей факт вказує на погіршення стану лісових насаджень, а також наявність певних порушень законодавства щодо режиму використання територій, які зазнали радіоактивного забруднення.

Одним із перспективних напрямів використання матеріалів глобальної карти лісів [7] є можливість порівняння динаміки процесів знеліснення та лісовідновлення для різних територій у відносних величинах. Наприклад, на рис. 2 наведено зміни у лісовому покриві лісів зони відчуження та умовної 20-кілометрової буферної зони довкола неї.

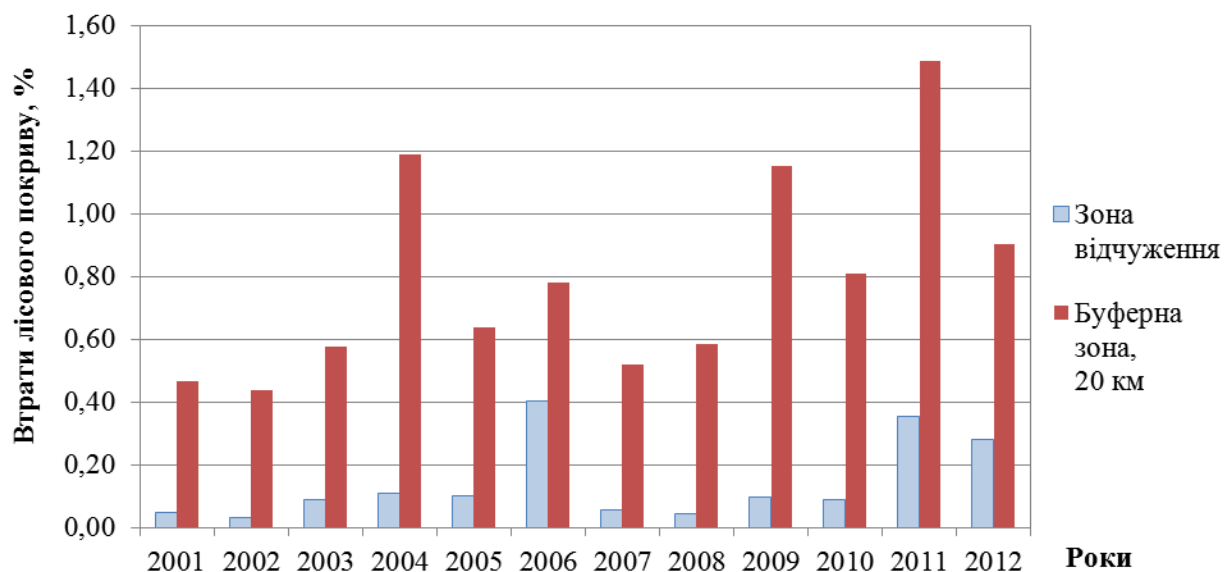


Рис. 2. Динаміка втрат лісового покриву в Чорнобильській зоні відчуження та 20-км буферній зоні

Висновки. Картографування лісового фонду на основі глобальних продуктів космічних систем має важливе значення для моніторингу стану лісів на значних територіях і потенціал для подальшого розвитку. В кожній країні під поняття лісової рослинності потрапляють різні типи ділянок земного покриву, у зв'язку з чим подібні продукти потребують вірної інтерпретації залежно від природно-кліматичних умов та породного складу лісів території. Порівняння результатів, встановлених дистанційними методами з даними наземних досліджень дозволяють виявити помилки не тільки картографування, а й матеріалів натурних досліджень.

Проведені дослідження вказують на перспективність використання неперервних даних для картографування лісового фонду дистанційними методами. Просторове розрізнення використаної в аналізі глобальної карти лісових екосистем 30 м дозволяє з високою достовірністю оцінити динаміку лісів у зонах, які зазнали радіоактивного забруднення. Хоча під час інтерпретації цих даних можуть виникати певні розходження з офіційною статистикою про лісовий фонд, беззаперечною є можливість аналізу процесів заліснення колишніх сільськогосподарських угідь і загибелі насаджень для територій, де перебування людини є небажаним, а також порівняльного аналізу цих процесів.

Список літератури

1. Інструкція з впорядкування лісового фонду України. – Ч. 1: Польові роботи. – Ірпінь, 2006. – 75 с.
2. Лакида П. І. Аналіз та інтерпретація карти високого просторового розрізнення лісових екосистем Полісся України / Лакида П. І., Миронюк В. В., Гілітуха Д. В. // Збалансоване природокористування. – 2014. – № 4. – С. 5–9.
3. Bartholome E. GLC2000: a new approach to global land cover mapping from Earth observation data / E. Bartolome, A. S. Belward // International Journal of Remote Sensing. – Vol. 26/9. – 2005. – P. 1956–1977.

4. Congalton R. Assessing the accuracy of remotely sensed data : Principles and practices / R. Congalton, K. Green. – NY, 2008. – 183 pp.

5. DiMiceli C. M. Annual Global Automated MODIS Vegetation Continuous Fields (MOD44B) at 250 m Spatial Resolution for Data Years Beginning Day 65, 2000–2010. Collection 5 Percent Tree Cover University of Maryland, College Park, MD, USA / C. M. DiMiceli, M. L. Carroll, R. A. Sohlberg at all. – 2011. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://glcf.umd.edu/data/vcf> .

6. Global percent tree cover spatial resolution of 500 meters: first results of the MODIS Vegetation Continuous Fields algorithm / M. C. Hansen, R. S. DeFries, J. R. G. Townshend at al. // Earth Interactions. – 2003. – Vol. 7. – P. 1–15.

7. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change / M. C. Hansen, P. V. Potapov, R. Moore // Science. – 2013. – Vol. 342. – P. 850–853.

8. Kalita M. Correcting Map Errors in Forest Inventory Estimates for Small Areas / M. Kalita // Forest Inventory: Managing Forest Ecosystems. – 2006. – Vol. 10. – P. 225–233.

9. Schepaschenko D. A new hybrid land cover dataset for Russia: a methodology for integrating statistics, remote sensing and in situ information / D. Schepaschenko, A. Shvidenko, S. Fritz at all. // Journal of Land Use Science. – 2011. – Vol. 6. – № 4. – P. 245–259.

10. The Comprehensive R Archive Network. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://cran.r-project.org> .

В статье обоснованы предпосылки использования материалов космической съемки для мониторинга лесов на территориях, подвергшихся радиоактивному загрязнению. На основе данных собственных исследований выполнено классификацию глобальной карты лесных экосистем и определено динамику площади лесов на территории Чернобыльской зоны отчуждения в течение 2000-2013 годов.

Ключевые слова: классификация данных ДЗЗ, глобальная карта изменения лесного покрова, сомкнутость лесного полога, площадь лесов.

The preconditions of application of remote sensing for forest monitoring on territories contaminated by radionuclides were analyzed. Based on the results of our previous studies classification of global forest map of 30 m resolution was developed. As a result the dynamics of forest cover on a territory of the Chernobyl exclusion zone was estimated during 2000-2013 years.

Key words: *Chornobyl Exclusion Zone, classification of remote sensing data, global forest change map, forest cover, forest area.*