

РОЗРОБЛЕННЯ МОДЕЛЕЙ ОЦІНКИ НАДЗЕМНОЇ ФІТОМАСИ ЗА ДАНИМИ ДЗЗ

*Д.В. Гілітуха, аспірант**

А.Ю. Терентьев, кандидат сільськогосподарських наук

*О.В. Шевчук, здобувач**

Висвітлено результати моделювання запасів надземної фітомаси соснових деревостанів за даними мультиспектральних космічних знімків SPOT-5 з просторовим розрізненням 10 м. Запропоновано алгоритм обробки та аналізу просторової інформації для отримання кількісних показників надземної фітомаси на рівні одного пікселя.

Дані ДЗЗ, надземна фітомаса, вегетаційні індекси, класифікація зображення.

Протягом останнього десятиліття зростання дефіциту ресурсно-енергетичного потенціалу, виснаження запасів невідновлювальних джерел енергії і глобальні кліматичні зміни зумовили загострення уваги на задоволенні майбутніх потреб в енергоносіях, а також на зменшенні та стабілізації обсягів викидів парникових газів. Вирішення цих питань частково можливе завдяки збільшенню обсягів використання альтернативних, відновлюваних джерел енергії, одними з яких є лісові ресурси, а саме – їх фітомаса [3]. Ліс є одним із головних стабілізуючих компонентів взаємодії основних екологічних систем біосфери. Водночас виникло серйозне занепокоєння щодо посилення впливу на ліси негативних чинників, таких як глобальні кліматичні зміни, радіаційне забруднення, різноманітні види антропогенного навантаження.

Баланс між екологічними, соціальними та ресурсно-енергетичними потребами можливий тільки за умови раціонального та збалансованого використання лісових ресурсів, збереження їх стійкості та продуктивності, зниження рівня викидів CO₂ в атмосферу.

Результативність та ефективність здійснення такого кроку істотно залежить від забезпеченості інформацією про запаси лісової фітомаси та її просторовий розподіл. Тенденція щодо поліпшення актуальності інформації в нашій країні все ще характеризується фрагментарністю і залишається недостатньою. Статистика лісових ресурсів, що здійснюється при проведенні лісовпорядних робіт, часто не відображає актуальні зміни в лісовому покриві. Враховуючи ситуацію, що склалася останніми роками актуальними в оцінці надземної фітомаси лісів стали дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1, 3, 10–12]. Вони є найпрактичнішою і економічно ви-

* Науковий керівник – доктор сільськогосподарських наук, професор П.І. Лакида
© Д.В. Гілітуха, А.Ю. Терентьев, О.В. Шевчук, 2012

гідною альтернативою наземним методам отримання інформації про запаси і динаміку фітомаси як на національному, так і на регіональному рівнях. У лісовому господарстві методи дистанційної оцінки подолали довгий шлях, починаючи від інструменту глобального моніторингу до рівня окремого насадження і навіть дерева. Нові космічні апарати дають змогу проводити зйомку поверхні Землі з дуже високим просторовим розрізненням, забезпечуючи більш точну оцінку якісних і кількісних показників.

Мета дослідження – запропонувати алгоритм обробки та аналізу просторової інформації для оцінки надземної фітомаси соснових деревостанів за даними мультиспектральних космічних знімків SPOT-5 з просторовим розрізненням 10 м.

Матеріали та методика дослідження. За результатами попередніх досліджень [3, 5, 10–13] встановлено, що моделі для оцінки запасів фітомаси за даними ДДЗ, здебільшого, розробляються з використанням кореляційних співвідношень (множинного регресійного аналізу, часткових найменших квадратів, нейронних мереж) наземної інформації про запаси фітомаси і структури поверхні вегетаційного покриву. Вважається, що різні за структурою і породним складом деревостани мають різні значення спектральних характеристик, що також залежить від фізико-хімічних властивостей листя, їх структури, вмісту хлорофілу і води.

Методи оцінки надземної фітомаси лісових насаджень, за даними ДЗЗ в оптико-електронному діапазоні, переважно були спрямовані на дослідження зв'язку між спектральними характеристиками відбитого або власного випромінювання деревостанів у різних довжинах хвиль між їх біофізичними параметрами [3]. Варто також зазначити, що зі збільшенням запасу фітомаси і щільності рослинного полог, значення її яскравості зростає у ближній інфрачервоній зоні та зменшуються у червоній [1]. Це твердження слугувало основою для розрахунку вегетаційних індексів, тобто відносних показників властивостей рослинності в певному пікселі знімка, що в подальшому можуть бути інтерпретовані з використанням наземних показників.

Як досліджувану територію вибрано регіон лісових масивів ВП НУБіП України «Боярська ЛДС», який розташований у південній частині Українського Полісся (Київська область), на площі близько 18 тис. га. Це одна з унікальних і найпродуктивніших лісових екосистем України. Насадження, в основному, представлені хвойними породами з переважанням сосни звичайної (*Pinus silvestris* L.) (85 %).

Оцінка надземної фітомаси була проведена на підставі аналізу мультиспектрального космічного знімка SPOT-5 станом на 1 травня 2010 року з просторовим розрізненням 10 м. Дані ДЗЗ отримані за підтримки проекту «Planet Action», що фінансується компанією Spot Image з 2007 року. Для відбору дослідних показників була використана таксаційна база даних лісів України за 2010 р. та створена цифрова карта лісових масивів за результатами лісовпорядкування 2008 року.

Щоб повністю реалізувати потенціал супутникових спектральних даних для аналізу лісової рослинності, космічний знімок потребував коре-

кції до величин, незалежних від атмосферних умов та перерахунку у показники наземного відбиття [2].

Для усунення впливу різних атмосферних чинників була використана методика атмосферної корекції даних Landsat/ETM+ (COST-метод) з використанням алгоритму, розробленого Chavez у 1988 році і надалі удосконаленого в 1996 році [6, 8]. Модель автоматизації атмосферної корекції для програмного забезпечення ERDAS Imagine була створена в Arizona Remote Sensing Center [9]. У ході нашої роботи ця модель була дещо змінена, з метою застосування її для космічних знімків SPOT-5.



Рис. 1. Знімок SPOT-5 території досліджень

Послідовність підготовки даних, необхідних для досягнення поставленої мети складалася з декількох етапів:

- проведення атмосферної корекції з використанням алгоритму, розробленого Chavez у 1996 році [8];
- відображення структури насадження, розрахованої за допомогою вегетаційних індексів (VI) як співвідношення яскравості відображення об'єктів у різних спектральних каналах (табл. 1);
- проведення керованої класифікації космічного знімку для території досліджень з метою створення «маски» хвойних насаджень (рис. 2а);
- отримання значень пікселів кожного спектрального каналу, що проводилося в межах створеної маски хвойних насаджень і карти лісових ділянок за точковими профілями центрів піксела (рис. 2б);
- групування значення пікселів за частотою повторення в певному виділі та відбір найхарактерніших пікселів (зустрічальність яких максимальна для кожного насадження) в межах $\pm 5\%$ від їх значень спектральної яскравості, вважаючи, що вони узгоджуються з середніми таксаційними показниками деревостанів;

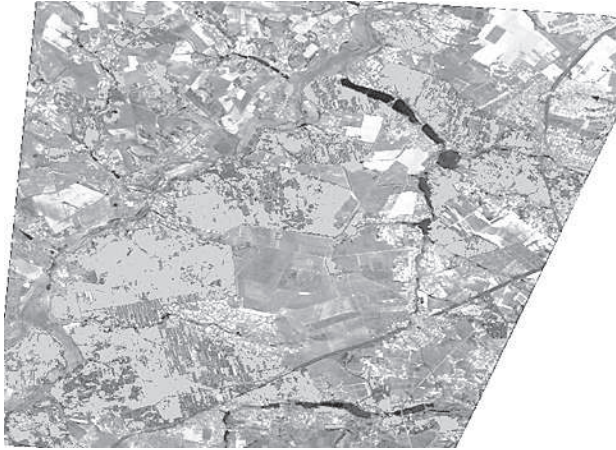


Рис. 2а. Виділення маски хвойних насаджень



Рис. 2б. Відбір значень пікселів по точкових профілях насаджень

- проведення розрахунку загальної фітомаси насаджень сосни звичайної в абсолютно сухому стані за даними моделей М.М. Петренка і П.І. Лакиди для соснових деревостанів Полісся України [6]:

$$Ph_t = 9,722 \cdot H^{1,037} \cdot P^{0,723},$$

де Н - висота, м;

Р - повнота насаджень.

1. Вегетаційні індекси та формули їх розрахунку

Вегетаційний індекс	Алгоритм розрахунку
Нормалізований водний індекс (Normalized Difference Water Index)	$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$
Модифікований нормалізований водний індекс (MNDWI)	$MNDWI = (GRN - SWIR) / (GRN + SWIR)$
Індекс відношення в ближньому і видимому діапазоні спектра (Shortwave infrared to visible ratio)	$SVR = SWIR / ((RED + GRN) / 2)$
Нормалізований водний індекс (Normalized Difference Water Index of Mc Feeters or Green Index)	$NDWIF = (GRN - NIR) / (GRN + NIR)$

NIR – відображення в ближній інфрачервоній зоні спектра; *RED* – відображення в червоній зоні спектра; *GRN* – відображення в зеленій зоні спектра; *SVIR* – відображення в середній інфрачервоній зоні спектра.

Вегетаційні індекси, що були розраховані, дають відносні оцінки властивостей рослинного покриву, які можуть бути інтерпретовані із залученням наземних показників [1, 3, 12].

Попередня обробка і подальший геопросторовий аналіз даних космічної зйомки виконаний з використанням програми ERDAS Imagine 10.1, Statistica 8.0 і ArcGis 9.2.

Результати дослідження. Враховуючи значну кількість дослідницьких даних і велику дисперсію їх значень, для моделювання, вихідні дані були згруповані за висотою і повнотою з урахуванням ваги частоти повто-

рюваності кожного з цих показників у межах обраних класів. Варіація кожного з показників не перевищувала 5 %.

Важливим етапом роботи був пошук відповідних незалежних змінних, які б краще описували дослідні дані. Для встановлення тісноти зв'язків між досліджуваними якісними параметрами фітомаси деревостанів, спектральними характеристиками відбиття та вегетаційних індексів у межі елемента розрізнення пікселя проведено їх кореляційний аналіз (табл. 2).

2. Кореляційна матриця

Веgetаційні індекси	Таксаційні показники деревостанів				
	вік	діаметр	висота	запас	фітомаса
NIR	-0,80	-0,85	-0,90	-0,87	-0,89
MNDWI	-0,70	-0,74	-0,78	-0,73	-0,75
NDWI	-0,77	-0,78	-0,77	-0,68	-0,72
SVR	0,45	0,47	0,57	0,50	0,53
Фітомаса	0,82	0,89	0,97	0,99	1,00

Враховуючи чималу кореляційну залежність між фітомасою і висотою (0,97), нами, насамперед, запропоновано провести моделювання висоти деревостанів (\tilde{H}) залежно від значень коефіцієнтів відбиття в ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні (NIR) і вегетаційного індексу (MNDWI). Кореляційний аналіз на 5 %-му рівні значущості (табл. 2) свідчить про наявність між цими показниками значного оберненого кореляційного зв'язку. Виходячи із значень множинного коефіцієнта детермінації ($R^2 = 0,85$) та аналізу залишків, найкращою моделлю, яка описує залежну змінну, виявилася така:

$$\tilde{H} = (94,903 - 248,906 \times MNDWI + 227,446 \times MNDWI^2) + (94,903 - 1036,0 \times NIR + 2142,085 \times NIR^2). \quad (1)$$

Залежність фітомаси від змодельованої висоти і ВІ адекватно описана таким рівнянням (2), про що також свідчить коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,83$.

$$Ph_z = (-1194,0 + 73,186 \times \tilde{H} - 0,997 \times \tilde{H}^2) + 1176,0 \times \exp(0,287 \times NDWI - 0,069 \times \tilde{H}). \quad (2)$$

Середньоквадратична помилка оцінки запасу надземної фітомаси, за даними ДЗЗ, обчислювалася за формулою ($\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_i - m)^2 / (n-1)}$) і становила 18 % або 34 тга^{-1} .

Перевірка адекватності моделі здійснювалася також за F -критерієм Фішера. Оскільки для запропонованої моделі розрахункова величина $F_{\text{факт}}$, яка більша за його критичне значення $F_{\text{крит}}$, це дає підстави з імовірністю 0,95 стверджувати про адекватність моделі вихідним даним. Графічна інтерпретація моделі оцінки запасу надземної фітомаси для соснових деревостанів наведена на рис. 3.

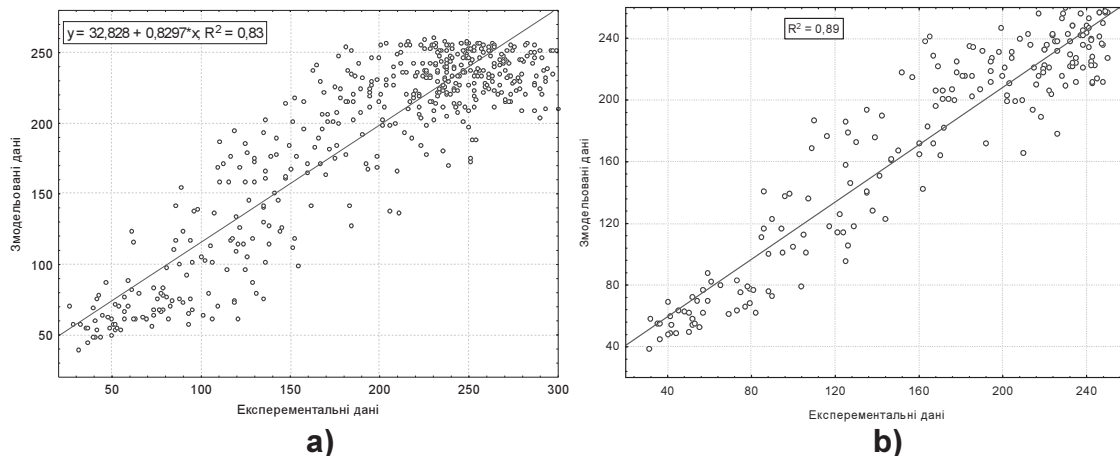


Рис. 3. Аналіз моделі оцінки запасу надземної фітомаси:

а) для всього діапазону значень; б) для насаджень, запас фітомаси яких менший $250 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, з повнотою у межах $0,70\text{--}0,85$

Як видно з рис. 3 розподіл експериментальних показників щодо змодельованих нерівномірний. Зі збільшенням запасу фітомаси точність її оцінки зменшується. Це можна пояснити тим, що ці насадження мають нерівномірну просторову структуру. Кількість фітомаси на одиницю площі, що потрапляє в межі елемента розрізнення пікселя ($10 \times 10 \text{ м}$) залежить від щільності рослин та фенологічної фази їх розвитку. Отже, потрібно враховувати зімкнутість крон деревостанів, оскільки цей показник істотно впливає на відображення їх спектральної яскравості. Якщо в середньовікових деревостанах спостерігається тенденція відповідності повноти до зімкнутості, то в стиглих та перестійних насадженнях - вона має значну варіацію.

Суттєво впливає на відбивальну здатність однорідних за таксаційними характеристиками насаджень нерівномірна зімкнутість крон деревостанів, що є особливо характерним для стиглих та перестійних насаджень.

Проаналізувавши відповідність експериментальних даних змодельованим для насаджень, запас надземної фітомаси яких менший $250 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, з повнотою в межах $0,70\text{--}0,85$ ми бачимо, що коефіцієнт детермінації збільшився до $0,89$. Це свідчить про те, що наша модель описує понад 89% емпіричних показників у діапазоні з насиченням фітомаси до $250 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ при модальній повноті $0,70\text{--}0,85$.

Висновки

1. Запропонований алгоритм обробки та аналізу просторової інформації для отримання кількісних показників надземної фітомаси на рівні одного пікселя завбільшки $10 \times 10 \text{ м}$ може слугувати основою для оцінки та моніторингу лісової фітомаси як на національному, так і регіональному рівні.

2. Точність оцінки надземної фітомаси за даними ДЗЗ з просторовим розрізненням 10 м значно залежить від структури насадження, а її поліпшення потребує більш детального вивчення зімкнутості крон деревостанів.

3. Космічні знімки з просторовим розрізненням в 10 м не забезпечують потрібної інформативності про структуру насадження у перестійному віці, через низьку зімкнутість пологую та діаметри крон дерев, що значно перевищують розмір пікселя. При більш низькому розрізненні, наприклад 30 м для Landsat-5 TM, точність оцінки фітомаси для стиглих і перестійних деревостанів може поліпшитися внаслідок кращого захоплення просторової структури насадження та погіршитися для молодших вікових груп, що пов'язано з перемішуванням різних за породним складом та зімкнутістю деревостанів.

4. Застосування даних ДЗЗ з більш високим розрізненням, 5 м і менше, є утруднений та потребуватиме розроблення інших методичних підходів. Такі дані не можуть відображати структури деревостану на рівні одного пікселя, оскільки піксель покриватиме тільки частину крони, а тінюві піксели, що характеризуватимуть прогалини між кронами вноситимуть значну похибку.

Список літератури

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: [монографія] / За ред. В.І. Лялько, М.О. Попова. – К.: Наук. думка, 2006. – 360 с.
2. Гілітуха Д.В. Особливості використання супутникових мультиспектральних знімків SPOT-5 для аналізу лісової рослинності / Д.В. Гілітуха // Ліс, довкілля, технології: наука та інновації : Міжнародна науково-практична конференція, 29 березня 2012 р. : тези доп. – К. : НУБіП України, 2012. – С. 60–61.
3. Гілітуха Д.В. Підходи до оцінки надземної фітомаси лісів з використанням даних дистанційного зондування Землі / Д.В. Гілітуха // Наук. вісн. НУБіП України. – 2011. – Вип. 164, Ч. 1. – С. 26–36.
4. Лакида П. І. Перспективи використання біомаси лісів України для біоенергії / П. І. Лакида, Р. Д. Василишин // Лісове господарство, лісова, паперова і деревообробна промисловість : міжвід. наук.-техн. зб. НЛТУ. – 2006. – Вип. 30. – С. 225–228.
5. Лакида П.І. Фітомаса лісів України: [монографія] / Лакида П.І. – Тернопіль: Збруч, 2002. – 256 с.
6. Петренко М. М. Динаміка фітомаси та депонованого вуглецю в штучних насадженнях сосни Полісся України : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. с.-г. наук : спец. 06.03.02 „Лісовпорядкування та лісова таксація” / М.М.Петренко. – К., 2002. – 17 с.
7. Chavez P. S. An Improved Dark-Object Subtraction Technique for Atmospheric Scattering Correction of Multispectral Data / P.S. Chavez // Remote Sensing of the Environment. – 1988. – № 24. – P. 459-479.
8. Chavez P.S. Image-based atmospheric corrections—revisited and revised / P.S. Chavez // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1996. – Vol. 62(9). – P. 1025–1036.
9. Landsat 5 Atmospheric and Radiometric Correction [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://arsc.arid.arizona.edu/resources/image_processing/landsat/ls5-atmo.html
10. LeToan T. Relating radar remote sensing of biomass to modeling of forest carbon budgets / T. LeToan, S. Qugan, I. Woodward [et al.] // Climatic Change. – 2004. – Vol. 67. – P. 379–402.

11. Lu D. The potential and challenge of remote sensing-based biomass estimation / D. Lu // International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27(7). – P. 1297–1326.
12. Propastin P. Relations between landsat ETM+ imagery and forest structure parameters in tropical rainforests: a case study from lore-lindu national park in sulawesi, Indonesia / P. Propastin // EARSeL eProceedings. – 2009. – Vol. 8.2. – P. 93–106.
13. Wolter P.T. Estimation of forest structural parameters using 5 and 10 meter SPOT-5 satellite data / P.T. Wolter, P.A. Townsend // Sturtevant Remote Sensing of Environment. – 2009. – Vol. 113. – P. 2019–2036.

Отражены результаты моделирования запасов надземной фитомассы сосновых древостанов по данным мультиспектральных космических снимков SPOT-5 с пространственным разрешением 10 м. Предложен алгоритм обработки и анализа пространственной информации для получения количественных показателей надземной фитомассы на уровне одного пиксела.

Данные ДЗЗ, надземная фитомассы, вегетационные индексы, классификация изображения.

This paper presents the results of estimation and methodological approaches for modeling and mapping of ABG biomass using 10 meter SPOT-5 satellite data.

Remote sensing data, above ground biomass, vegetative indices, image classification.

УДК 630*228:630*54.0

ОПТИМІЗАЦІЯ ЛІСОКОРИСТУВАННЯ У ЛІСАХ ВП НУБІП УКРАЇНИ «БОЯРСЬКА ЛДС»

***О.А. Гірс, доктор сільськогосподарських наук, професор
Р.В. Содолінський, М.М. Кутя, А.А. Веркопуло, аспіранти****

Проаналізовано прийняту розрахункову лісосіку та здійснено оптимізацію лісокористування на підставі ревізії режиму господарювання у деревостанах чинних категорій захисності лісів ВП НУБІП України «Боярська лісова дослідна станція».

Ліси Боярської ЛДС, оптимізація лісокористування, розрахункова лісосіка, вікова структура деревостанів, категорії захисності.

Ліси мають визначне екологічне і природоохоронне значення, та, насамперед, – це легені нашої Землі, адже саме ліси продукують кисень, що є основою існування всього живого на планеті. Крім того, у зв'язку з ін-

* Науковий керівник – доктор сільськогосподарських наук, професор О.А. Гірс
© О.А. Гірс, Р.В. Содолінський, М.М. Кутя, А.А. Веркопуло, 2012