

## ЛІСОВА ТАКСАЦІЯ ТА ЛІСОВА ПОЛІТИКА

УДК 630\*5:528.8

### КАРТУВАННЯ НАДЗЕМНОЇ ФІТОМАСИ СОСНОВИХ ДЕРЕВОСТАНІВ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ ЗНІМКІВ SPOT-5

*Д.В. Гілітуха, здобувач\**

*П.І. Лакида, доктор сільськогосподарських наук*

*Подано результати картування запасів надземної фітомаси соснових деревостанів за даними мультиспектральних космічних знімків SPOT-5 з просторовим розрізненням 10 м. Зокрема, розроблено математичні моделі кількісних показників надземної фітомаси та запропоновано алгоритм обробки та аналізу супутникових знімків для картографування отриманих даних.*

*Дані ДЗЗ, супутниковий знімок SPOT-5, надземна фітомаса, соснові деревостани, вегетаційні індекси, класифікація зображення.*

Статистика лісових ресурсів, яку одержують при проведенні лісовпорядних робіт, часто не відображає актуальні зміни в лісовому покриві. Враховуючи сучасні тенденції розвитку в системі адаптивного лісоуправління, охороні лісів, збереження біотичного різноманіття, за останні роки актуальними в оцінці надземної фітомаси лісів стало впровадження нових, більш ефективних методів, таких як дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [1, 2, 7, 10]. Вони є найбільш практичною і економічно вигідною альтернативою наземним методам, а також незалежним джерелом отримання інформації про запаси і динаміку фітомаси.

**Мета дослідження** – дослідити особливості та розробити алгоритм опрацювання та аналізу просторової інформації для картування надземної фітомаси соснових деревостанів за даними мультиспектральних космічних знімків SPOT-5 з просторовим розрізненням 10 м.

**Матеріали та методика дослідження.** У роботі використано мультиспектральний супутниковий знімок SPOT-5 (дата зйомки 01.05.2010) з просторовим розрізненням 10 м, який покриває лісові масиви ВП НУБіП України «Боярська ЛДС». Дані ДЗЗ отримано за підтримки проекту «Planet Action» [9], що фінансується компанією Spot Image з 2007 року. Для відбору дослідних показників було використано таксаційну базу даних лісів України за 2010 р. та створено цифрову карту лісових масивів за результатами лісовпорядкування 2008 року.

Методи оцінки надземної фітомаси лісових насаджень ґрунтувалися на використанні множинного регресійного аналізу наземної інформації про запаси фітомаси і структури поверхні вегетаційного покриву [2]. Як і за

---

\* Науковий керівник – доктор сільськогосподарських наук, професор П.І. Лакида

© Д.В. Гілітуха, П.І. Лакида, 2013

результатами попередніх досліджень [2, 3, 10], досліджувалися зв'язки між спектральними характеристиками відбитого або власного випромінювання деревостанів у різних довжинах хвиль.

Щоб повністю реалізувати потенціал супутникових знімків, компенсувати атмосферні спотворення, викликані наявністю водяної пари і аерозолів в атмосфері та забезпечити можливість порівняння даних за різні періоди, ми провели атмосферну корекцію даних ДЗЗ [1].

Першочергово, коефіцієнти яскравості в кожному спектральному каналі повинні пройти конвертацію показників випромінювання на сенсорі ( $L_{\lambda j}$ ). Ці значення вимірюються в безрозмірних одиницях  $W/(m^2 \cdot ster \cdot \mu m)$  і є пропорційні кількості висхідного випромінювання, що потрапляє на сенсор. Для даних SPOT-5 значення  $L_{\lambda j}$  розраховуються за формулою:

$$L_{\lambda, j} = \frac{L_j}{G} + B, \quad (1)$$

де  $L_{\lambda}$  – значення кожного пікселя для  $j$  каналу зображення;

$G$  та  $B$  – калібрувальні коефіцієнти, що можна отримати з метаданих космічного знімка (PHYSICAL\_GAIN та PHYSICAL\_BIAS відповідно).

Для усунення впливу різних атмосферних факторів 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].

Розраховані вегетаційні індекси (VI) дають відносні оцінки властивостей рослинного покриву, які в подальшому будуть інтерпретовані із залученням наземних показників (табл. 1).

### 1. Вегетаційні індекси та формули їх розрахунку

Вегетаційний індекс	Алгоритм розрахунку
Нормалізований вегетаційний індекс (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = (RED - NIR) / (RED + NIR)$
Нормалізований водний індекс (Normalized Difference Water Index)	$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$
Модифікований нормалізований водний індекс (MNDWI)	$MNDWI = (GRN - SWIR) / (GRN + SWIR)$
Нормалізований водний індекс (Normalized Difference Water Index of Mc Feeters or Green Index)	$NDWIF = (GRN - NIR) / (GRN + NIR)$

Умовні позначення: *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.

Оцінка надземної фітомаси насаджень базується на показниках, які залежні від терміну вегетаційного періоду. Найбільш стабільні значення вегетаційного індексу *NDVI* спостерігаються в період максимального розвитку фотосинтетично активної фітомаси і припадають на середину вегетаційного періоду [2]. Оскільки математичні моделі побудовані на основі травневих знімків, коректніші результати можна буде отримати для іден-

тичного періоду. Виходячи з даної ситуації, ми прийняли рішення відобразити значення спектральної яскравості каналів космічного знімка та вегетаційних індексів у відносних величинах ( $k_{vi}$ ), використавши наступну формулу:

$$k_{vi} = \frac{x_j - BI_{\min}}{BI_{\min} - BI_{\max}} \quad (2)$$

Таким чином, більш коректно буде відображатися тенденція розподілу даних ДЗЗ у межах дослідної породи. Проте однозначного висновку щодо уніфікації та порівнюваності даних ДЗЗ за будь який період – зробити неможливо. У першу чергу, точність залежатиме від роздільної здатності космічного знімка та відсутності домішки листяних порід у класі одного пікселя.

Значну увагу приділено відбору дослідних даних та отримання значень пікселів кожного спектрального каналу, в межах виділу та маски хвойних насаджень, створеної в результаті керованої класифікації супутникового знімка. Відбір найхарактерніших пікселів здійснювався методом групування їх значення за частотою повторення в певному виділі та в межах  $\pm 5\%$  від середньозважених величин спектральної яскравості, вважаючи, що вони відповідають середнім таксаційним показникам досліджуваних деревостанів.

Розрахунок загальної фітомаси насаджень сосни звичайної в абсолютно сухому стані здійснено за математичними моделями П.І. Лакиди для соснових деревостанів Полісся України [3].

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 дослідних даних і велику дисперсію їх значень, наступним підготовчим етапом для моделювання стало групування даних за висотою і повнотою з урахуванням ваги частоти повторюваності кожного з цих показників в межах обраних класів. Варіація кожного з показників здебільшого не перевищувала 15 %.

Важливим етапом роботи був пошук відповідних незалежних змінних, які б краще описували дослідні дані. Для встановлення тісноти зв'язків між якісними параметрами фітомаси деревостанів, спектральними характеристиками відбиття та вегетаційними індексами у межі елемента розрізнення пікселя проведено їх кореляційний аналіз (табл. 2). У результаті проведеного аналізу встановлено, що найтісніший кореляційний зв'язок на 5 %-му рівні значущості спостерігається між висотою ( $H$ ) і запасом надземної фітомаси ( $Ph_{\text{нас}}$ ) ( $r=0,97$ ), компоненти фітомаси стовбура ( $q_{cm}$ ) та гілок ( $q_{gin}$ ) зі значенням спектральної яскравості в ближньому інфрачервоному спектральному діапазоні ( $NIR$ ) ( $r=-0,81$ ) та висотою.

Враховуючи значну середньоквадратичну помилку та варіацію вхідних показників, подальше моделювання окремих компонентів фітомаси вважаємо недоцільним.

## 2. Кореляційна матриця основних лісотаксаційних показників та даних аналізу космічних знімків SPOT-5

Показники	Вегетаційні індекси				Таксаційні показники деревостанів				
	<i>NIR</i>	<i>NDWI</i>	<i>MNDWI</i>	<i>NDVI</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>A</i>	<i>H</i>	<i>M</i>
<i>NIR</i>	1,00								
<i>NDWI</i>	0,79	1,00							
<i>MNDWI</i>	0,74	0,62	1,00						
<i>NDVI</i>	0,48	0,82	0,15	1,00					
<i>P</i>	0,30	0,38	0,29	0,32	1,00				
<i>D</i>	-0,80	-0,74	-0,65	-0,50	-0,49	1,00			
<i>A</i>	-0,78	-0,75	-0,62	-0,52	-0,52	0,96	1,00		
<i>H</i>	-0,85	-0,73	-0,69	-0,46	-0,42	0,95	0,92	1,00	
<i>M</i>	-0,83	-0,68	-0,67	-0,41	-0,22	0,89	0,84	0,97	1,00
<i>q<sub>ст</sub></i>	-0,81	-0,69	-0,66	-0,42	-0,21	0,89	0,85	0,97	0,99
<i>q<sub>дз</sub></i>	-0,33	-0,22	-0,17	-0,11	0,47	0,35	0,24	0,26	0,35
<i>q<sub>хв</sub></i>	-0,17	-0,08	-0,04	-0,02	0,58	0,18	0,08	0,07	0,18
<i>q<sub>гіл</sub></i>	-0,80	-0,72	-0,62	-0,47	-0,38	0,98	0,91	0,91	0,86
<i>Ph<sub>нас</sub></i>	-0,81	-0,69	-0,66	-0,43	-0,21	0,90	0,86	0,97	0,99

В основі моделювання загального запасу надземної фітомаси покладено залежність між *H* та значень (*NIR*) і вегетаційних індексів (*MNDWI* та *NDWI*), оскільки висота має меншу варіацію порівняно із середнім діаметром, віком та запасом [3, 4]. Розподіл висоти деревостану та значень *NIR* характеризується найменшою дисперсією й наближається до експоненціальної функції.

Підґрунтям в підборі коректних математичних моделей був графічний аналіз розподілу даних аналізу супутникових знімків та шуканих лісотаксаційних показників (рис. 1).

Після проведення необхідних розрахунків, найбільш адекватною моделлю, яка описує залежну змінну *H*, виявилася така:

$$H_{\text{мод}} = 52,140 \cdot \exp(-2,246 \cdot NIR - 0,209 \times NDWI) \quad (3)$$

Досить високі коефіцієнти детермінації ( $R^2 = 0,78$ ) між висотою та *NIR* було отримано в роботах Р. Propastina з оцінки параметричної структури тропічних лісів за даними Landsat ETM+ [10].

Залежність фітомаси від змодельованої висоти і ВІ адекватно описана наступним рівнянням (4), про що також свідчить коефіцієнт детермінації ( $R^2 = 0,78$ ).

$$Ph_{\text{нас}} = 21 + 247,2 \cdot (1 - \exp(-0,101 \cdot (H_{\text{мод}} - 4)))^{2,696} \quad (4)$$

Середньоквадратична помилка ( $\sigma$ ) оцінки прогнозованих показників за даними ДЗЗ становила 17 % або 3,5 м за висотою насадження та 27 % або 43 т·га<sup>-1</sup> за запасом надземної фітомаси.

Графічний аналіз моделі, представлений на рис. 2, підтверджує ефективність використаного рівняння під час моделювання запасів надземної фітомаси від висоти деревостану.

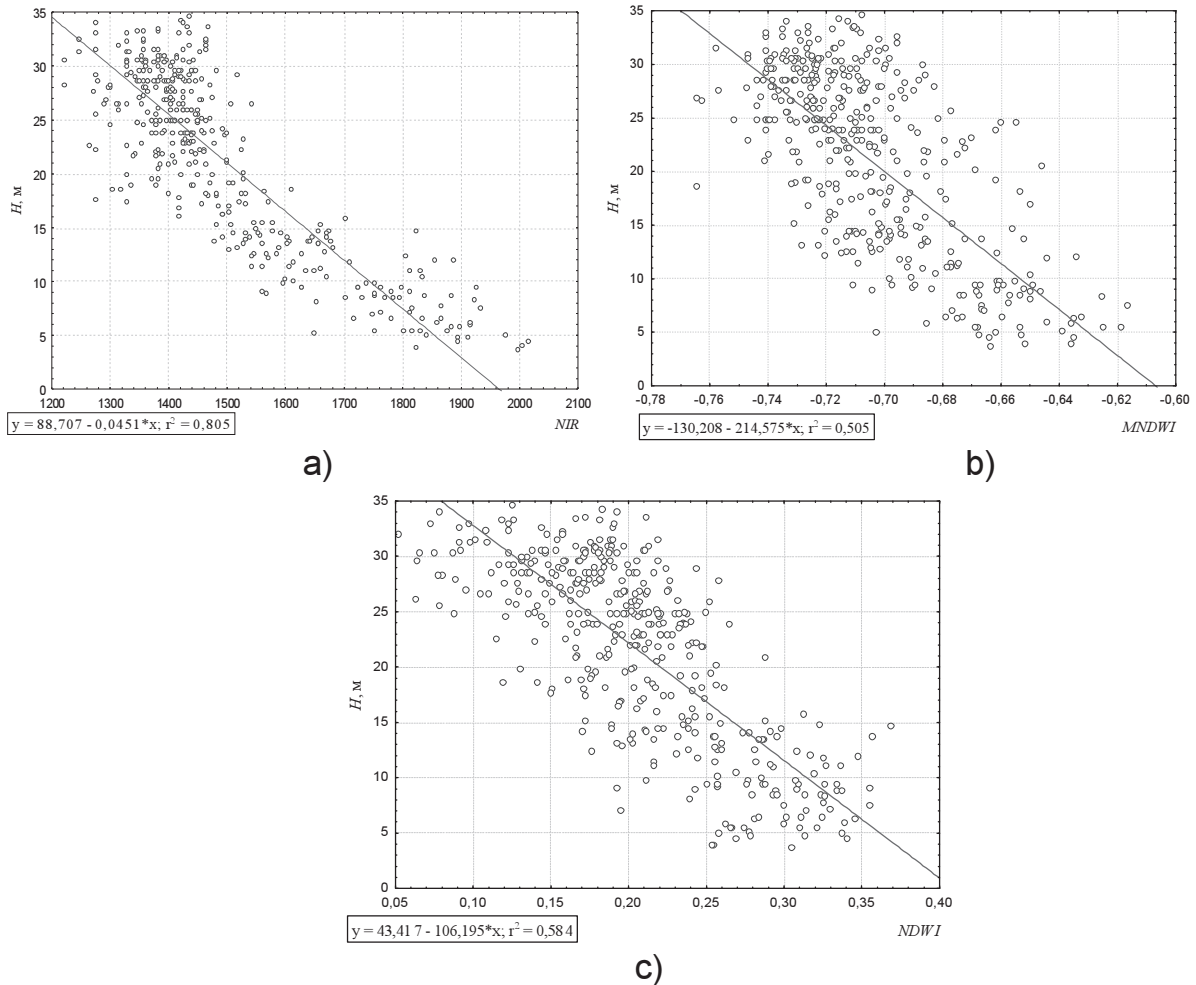


Рис. 1. Графічний аналіз розподілу лісотаксаційних показників і значень вегетаційних індексів (a – між  $H$  та NIR, b – між  $H$  та MNDWI, c – між  $H$  та NDWI)

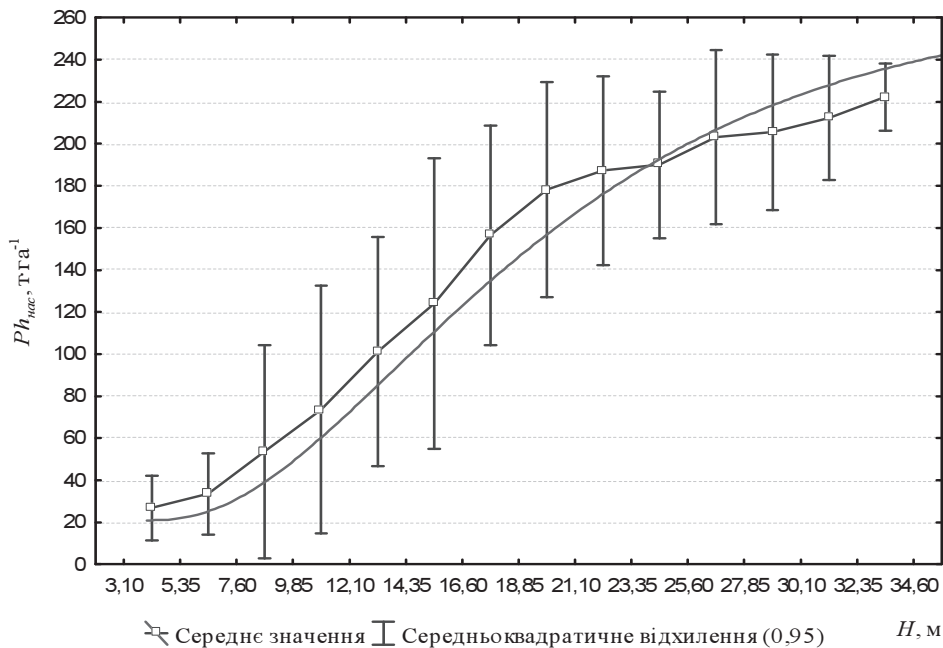


Рис. 2. Розподіл середніх значень запасів надземної фітомаси соснових деревостанів та їх відхилень

Як видно з рис. 2, розподіл експериментальних показників відносно змодельованих дещо нерівномірний. Лінія тренду моделі знаходиться в межах середньоквадратичного відхилення та в основному наближається до середніх значень. Також варто зазначити, що змодельовані значення запасів надземної фітомаси характеризуються значною дисперсією. 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 (10×10 м) залежить від густоти крон деревостанів та фенологічної фази їх розвитку.

Проведений порівняльний аналіз отриманих результатів із закордонними дослідженнями (табл. 3) свідчить про досить високу точність моделювання.

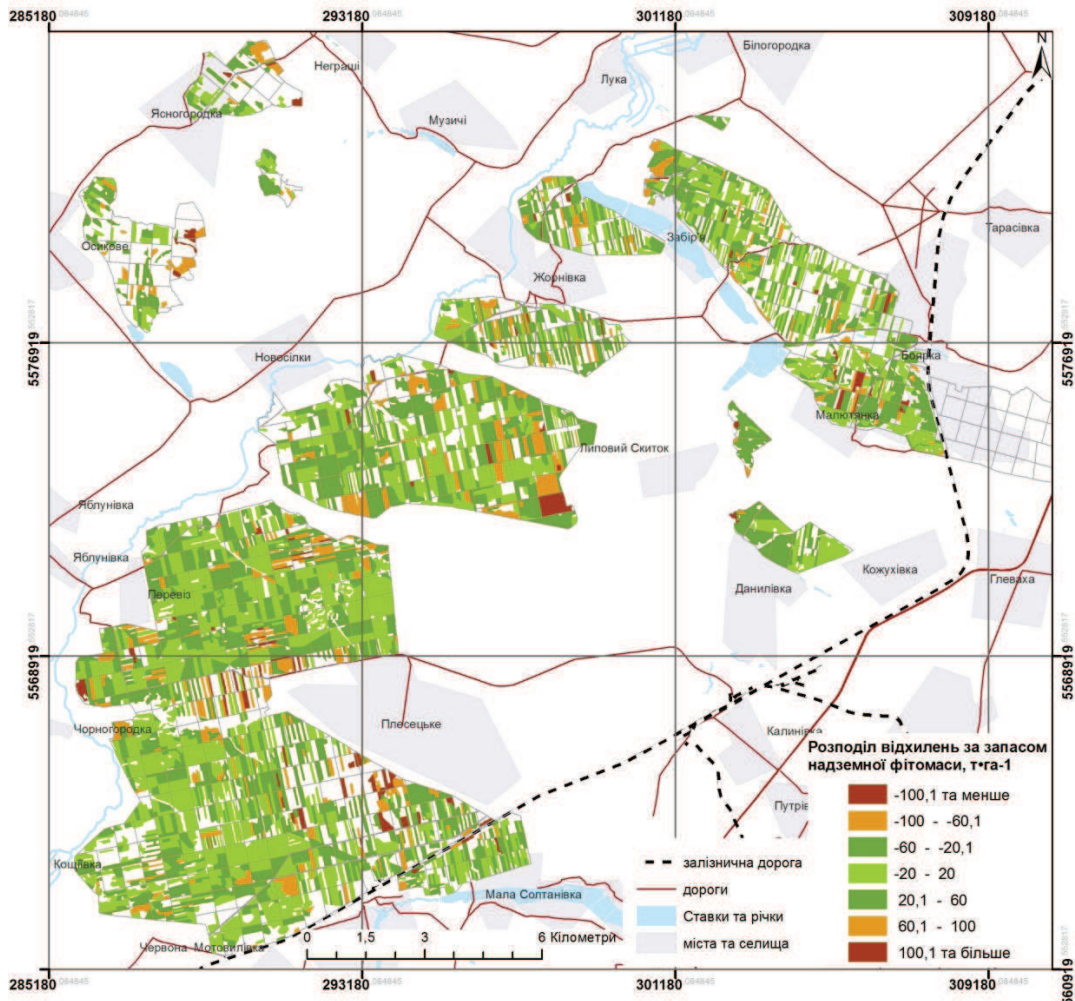
### 3. Аналіз методів дистанційної оцінки надземної фітомаси

Автор методики	Назва та тип супутникового апарату	Просторове розрізнення	Точність отриманих результатів
Методи, в основі яких використано дані ДЗЗ в оптико-електронному діапазоні			
Розроблена в межах даної роботи	SPOT-5	10 м	43 т·га <sup>-1</sup>
A. Leboeuf, A. Beaudoin et al., 2007 [8]	QuikBird	0,61 м (з агрегацією до 30)	2 т·га <sup>-1</sup>
R.J. Hall, R.S. Skakun et al., 2006 [7]	Landsat ETM+	30 м	18 т·га <sup>-1</sup>
Xiaoyang Zhang, Shobha Kondragunta, 2006 [14]	MODIS (продукти: LAI, VSF та LandCover)	1000 м на рівні регіону	53 т·га <sup>-1</sup>
Методи, в основі яких використано радарні дані (SAR)			
Svein Solberg, Rasmus Astrup et al., 2010 [12]	ALS (бортовий лазерний сканер) X-діапазон	1,4	40 т·га <sup>-1</sup>
Maurizio Santoro, Anatoly Shvidenko, Ian McCallum et al., 2006 [11]	ERS-1/2 C-діапазон	25 м	21 т·га <sup>-1</sup>
Oliver Cartus, Maurizio Santoro, Josef Kellndorfer, 2013 [1]	ALOS PALSAR L-діапазон	агрегація до 30 м 150 м агрегація до 1000 м на рівні регіону	80 т·га <sup>-1</sup> 40 т·га <sup>-1</sup> 25 т·га <sup>-1</sup> 13т·га <sup>-1</sup>

Таким чином, в основі розроблених моделей покладені спектральні та текстурні особливості об'єкта або групи об'єктів. У свою чергу, істотний вплив на ці показники відіграє зімкненість пологів. Якщо в середньовікових деревостанах спостерігається тенденція відповідності повноти до зімкненості, то в стиглих та перестійних насадженнях вона має значну варіацію.

На рис. 3 подано просторову інтерпретацію відхилення за запасом надземної фітомаси, розрахованої на основі даних ДЗЗ та за методикою П.І. Лакиди [3]. Оцінку фітомаси проводили на рівні окремого пікселя (ро-

зміром 10x10 м) у межах класифікованих соснових насаджень та згрупували за середнім значенням для окремого виділу.



**Рис. 3. Просторовий розподіл відхилень моделі оцінки запасу надземної фітомаси**

Проаналізувавши відповідність експериментальних даних змодельованим, можна відзначити, що подекуди відхилення становлять більше, ніж  $60 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ , що пояснюється неоднорідністю структури лісового пологю. Проте для насаджень, запас надземної фітомаси яких становить менш ніж  $250 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ , за модальної повноти 0,70–0,85 відхилення не перевищує  $40 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ .

Як бачимо з рис. 3, оцінка фітомаси на рівні пікселя в деяких випадках може призводити до некоректних результатів, в такому разі картування запасів фітомаси слід здійснювати на основі середньозважених значень для груп однорідних пікселів (тобто сегментованого зображення). Слід зазначити, що такий підхід також було використано в роботах R.J. Hall [7] та у методиці міжнародного проекту оцінки європейського потенціалу біомаси – CEUBIOM [13]. Після проведення сегментації зображення не обов'язково імітуватимуться традиційні границі виділу, але вона має важливе значення щодо виділення в його межах частини деревостанів, подібних за просторовою структурою й таксаційними характеристика-

ми. Обраховані в межах отриманих сегментів середні значення вегетаційних індексів та спектральних значень першочергово дозволять зменшити значну дисперсію та уникнути похибок, що характерні для попіксельної оцінки фітомаси.

### Висновки

1. Використана в роботі методика картування кількісних показників надземної фітомаси базується на регресійному аналізі спектральної характеристики відбитого випромінювання деревостанів у різних довжинах хвиль, структури поверхні вегетаційного покриву та параметричної структури соснових деревостанів.

2. Запропонований алгоритм опрацювання та аналізу просторової інформації сприяє отриманню достатньо точних моделей, порівняно із закордонними, визначенню запасів надземної фітомаси та вдосконаленню методів таксації деревостанів.

3. Точність картування надземної фітомаси за даними ДЗЗ з просторовим розрізненням 10 м значно залежить від структури насадження та вегетаційного періоду. З метою підвищення точності картування запасів надземної фітомаси соснових деревостанів та пошуку однорідних частин деревостану пропонується використовувати сегментацію даних ДЗЗ.

### Список літератури

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування : моногр. / за ред. В.І. Лялько, М.О.Попова. – К. : Наук. думка, 2006. – 360 с.

2. Гілітуха Д.В. Підходи до оцінки надземної фітомаси лісів з використанням даних дистанційного зондування Землі / Д.В. Гілітуха // Наук. вісн. ННУБіП України. – 2011. – Вип. 164, ч. 1. – С. 26–36.

3. Лакида П.І. Фітомаса лісів України : моногр. / П.І. Лакида – Тернопіль : Збруч, 2002. – 256 с.

4. Лакида П.І. Штучні соснові деревостани Полісся України – прогноз росту та продуктивності : моногр. / П.І. Лакида, А.Ю. Терентьев, Р.Д. Васишин. – К. : Майдаченко І.С., 2012. – 171 с.

5. Cartus O. Mapping forest aboveground biomass in the Northeastern United States with ALOS PALSAR dual-polarization L-band / O. Cartus, M. Santoro, J. Kellndorfer // Remote Sensing of Environment.– 2012. – Vol. 124. – P. 466–478.

6. 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.

7. Hall R.J. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume / R.J. Hall, R.S. Skakun, E.J. Arsenault, B.S. // Case Forest Ecology and Management. – 2006. – Vol. 225. – P. 378–390.

8. Leboeuf , A. A shadow fraction method for mapping biomass of northern boreal black spruce forests using QuickBird imagery / A. Leboeuf , A. Beaudoin, R.A. Fournier, L. Guindon, J.E. Luther, M.-C. Lambert // Remote Sensing of Environment. – 2007. – Issue 110. – P. 488–500.



9. Planet Action project [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.planet-action.org/web/85-project-detail.php?projectID=7816> . – Заголовок з экрана.

10. 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.

11. Santoro M. Properties of ERS-1/2 coherence in the Siberian boreal forest and implications for stem volume retrieval / M. Santoro, A. Shvidenko, I. McCallum, J. Askne // Remote Sensing of Environment. – 2007. Vol.106. – P. 1054–172.

12. Solberg, S. Estimating spruce and pine biomass with interferometric X-band SAR / Svein Solberg, Rasmus Astrup, Terje Gobakken, Erik Næsset, Dan J. Weydahl // Remote Sensing of Environment. – 2010. Issue 114. – P. 2353–2360.

13. WP2 – Streamlining research results into a common methodology for using EO biomass potential asesment. Study on SAR potential for direct biomass assessment // European Commission Framework Programme 7. Deliverable D.2.2. – Germany, 2009. – 83 p.

14. Zhang X. Estimating forest biomass in the USA using generalized allometric models and MODIS land products / X. Zhang, S. Kondragunta // Geophysical research letters. – 2006. – Vol. 33(9). – P. 1–5.

*Представлены результаты картирования запасов надземной фитомассы сосновых древостоев по данным мультиспектральных космических снимков SPOT-5 с пространственным разрешением 10 м. В частности, разработаны математические модели количественных показателей надземной фитомассы и предложен алгоритм обработки и анализа спутниковых снимков для картографирования полученных данных.*

***Данные ДЗЗ, надземная фитомасса, вегетационные индексы, классификация изображения.***

*This paper presents the results of estimation and methodological approaches for modeling and mapping of ABG biomass using SPOT-5 satellite image (10 metres resolution). In particular, the mathematical model of quantitative indicators aboveground biomass were developed. The algorithm for processing and analysis of satellite imagery for mapping of output data was proposed.*

***Remote sensing data, SPOT-5 satellite data, above ground biomass, pine stands, vegetative indices, image classification.***