4. ЛІСОВА ТАКСАЦІЯ ТА ЛІСОВПОРЯДКУВАННЯ

Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/412032>

Article received 2020.07.18

Article accepted 2020.12.28

ISSN 1991-606X print

ISSN 2616-5015 online

@ ✉ Correspondence author

Petro Lakyda

lakyda@nubip.edu.ua

Heroyiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine

УДК 528.8 : 633.877.3

Оцінка точності визначення надземної фітомаси дистанційними методами

П. І. Лакида¹, В. М. Ловинська², Ю. В. Бучавий³

Надано результати оцінювання надземної фітомаси соснових деревостанів, отриманої за допомогою дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). На основі мультиспектральних зображень супутника Sentinel-2 здійснено обробку спектральних характеристик із розрахунком вегетаційних індексів та біофізичних параметрів соснових деревостанів регіону Байрачного Степу України. Підґрунтям для побудови регресійних моделей залежності надземної фітомаси від отриманих спектральних характеристик використано результати польових досліджень. Найвищі кореляційні коефіцієнти фіксуються між показниками загальної і стовбурової фітомаси з вегетаційними індексами NDVI, TVI та біофізичними параметрами FARAP і FCOVER.

Для побудови моделей залежності надземної фітомаси соснових деревостанів використовували як одно-, так і двофакторні моделі, з яких найоптимальнішими виявились ті, що містили як предиктори NDVI окремо та за поєднання з FCOVER. Фактичні показники фітомаси сосняків на ТПП знаходились у межах від 27,6 до 287,6 т·га⁻¹. Прогнозовані значення загальної надземної фітомаси для моделі із залученням NDVI становили від 32,5 до 236,3 т·га⁻¹.

Здійснено картографування надземної фітомаси соснових деревостанів Байрачного Степу за допомогою мультиспектральних знімків Sentinel-2, а саме, отриманих спектральних характеристик їх похідних (вегетаційних індексів, біофізичних параметрів). Дослідження продемонструвало обнадійливі результати для впровадження лісового картування надземної фітомаси соснових насаджень у регіоні за допомогою ресурсів вільного доступу.

Ключові слова: *Pinus sylvestris* L.; Sentinel-2; мультиспектральні супутникові знімки; вегетаційні індекси; Байрачний Степ України.

¹ Лакида Петро Іванович – академік Лісівничої академії наук України, перший віце-президент ЛАН України, професор, доктор сільськогосподарських наук, директор навчально-наукового інституту лісового і садово-паркового господарства НУБІП України. Національний університет біоресурсів та природокористування України, вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна. Тел.: 044-527-85-28, +38-067-462-80-43. E-mail: lakyda@nubip.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3639-2969>

² Ловинська Вікторія Миколаївна – кандидат біологічних наук, доцент кафедри садово-паркового господарства. Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. С. Єфремова, 25, м. Дніпро, 49060, Україна. Тел.: +38-067-729-63-29. E-mail: glub@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7359-9443>

³ Бучавий Юрій Володимирович – кандидат біологічних наук, доцент кафедри екології та технологій захисту навколишнього середовища. Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», вул. Д. Яворницького, 19, м. Дніпро, 49005, Україна. Тел.: +38-066-224-38-66. E-mail: buchavyu@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3282-2810>

Вступ. У зв'язку зі всесвітніми глобальним потеплінням і зміною клімату, для вчених усього світу пріоритетним завданням є розробка методів, за допомогою яких стало б можливим максимально точно оцінити просторове розміщення і динамічні зміни у лісових екосистемах (Chave, Andalo, Brown, & Cairns, 2005; Bonan, 2008). Дані щодо біомаси лісів необхідні під час здійснення фундаментальних досліджень вуглецевого циклу, а також для оцінювання потоків парникових газів у системі *ліс-атмосфера* (Dai et al., 2013; Canadell & Schulze, 2014; Niemelä et al., 2017; Li et al., 2017; Pohjola, Laturi, Lintunen, & Uusivuori, 2018). Моніторинг надземної біомаси лісів є необхідною умовою реалізації міжнародних угод з питань клімату, адже отримані результати мають сенс під час обґрунтування стратегічних рішень як на національному, так і регіональному рівнях.

Методи оцінювання біомаси лісів базуються на їх наземних і космічних вимірах. Кількісне оцінювання продуктивності лісових екосистем потребує комплексного системного підходу із залученням наземних досліджень фітомаси деревостанів, що є вкрай необхідним для забезпечення точності отриманих супутникових знімків (Chen, Ren, Zhang, Wang & Xi, 2018; Tanaka et al., 2015). Загалом, найефективнішим підходом для отримання актуальної та об'єктивної оцінки лісового покриття на великих територіях є використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) на основі побудови емпіричних моделей, отриманих у результаті здійснення польових наземних досліджень (Field, Randerson, & Malmstrom, 1995; Jakubauskas & Price, 1997; Labrecque, Fournier, Luther, & Piercey, 2006; Forrester et al., 2017). Для детального дослідження фітомаси насаджень засобами ГІС-технологій зазвичай проводять розрахунки спектральних характеристик та біофізичних параметрів, отриманих у результаті дешифрування супутникових знімків (Forkuor et al., 2020). Картографування, здійснене на основі спектральних параметрів, може використовуватись для моніторингу стану лісів, визначення місць зрубування лісів, деградації лісів тощо (Domingo, Lamelas-Gracia, Montealegre-Gracia & de la Riva-Fernández, 2017).

Під час оцінювання фітомаси лісів методами ДЗЗ в оптико-електронному діапазоні, більшість методів спрямована на встановлення зв'язку між спектральними характеристиками відбитого або власного випромінювання деревостанів у різних довжинах хвиль (Drusch et al., 2012; Wittke, Karjalainen, Hyypä, & Puttonen, 2019). При цьому найдодільнішими каналами є червоний та ближній інфрачервоний діапазони (Chen et al., 2018). Більші значення фітопродукції мають вищу спектральну яскравість ближньої інфрачервоної зони, адже тут фіксується максимум відбиття (Nazari, Yasuoka, Ito & Dye, 2005).

Спектральний аналіз за участі супутникових зйомок є особливо складним для оцінювання нагромадження фітомаси хвойними лісами, для яких характерні значні коливання ефективності улов-

лювання світла за збереження структури намету і займаної асиміляційною поверхнею площі (Усольцев, 2010; Wittke et al., 2019).

Сосна звичайна є одним із найпоширеніших деревних лісотвірних видів у Європі і в Україні (Krakau, Liesebach, Aronen, Lelu-Walter & Schneck, 2013), а її частка у зоні Байрачного Степу становить чверть вкритих лісовою рослинністю ділянок.

Таким чином, розроблення нового підходу оцінювання поточного стану соснових лісонасаджень в умовах степової зони на основі аналізу даних мультиспектральних супутникових знімків є *актуальною проблемою*, розв'язання якої дасть змогу швидше отримувати точнішу інформацію щодо кількісних характеристик лісових ділянок, без проведення деструктивних заходів. Робота зорієнтована на вивчення питання можливості використання багатоспектральних космічних знімків для встановлення біопродуктивності соснових лісів у ще не дослідженому у цьому аспекті регіоні Байрачного Степу України.

Матеріали й методи. *Об'єкт дослідження* – соснові деревостани Байрачного Степу України. *Предмет дослідження* – відображення показників надземної фітомаси через спектральні індекси супутникових знімків. *Метою дослідження* було розроблення моделей оцінювання фітомаси соснових деревостанів Північного Степу України методами ДЗЗ.

Оцінювання надземної фітомаси соснових лісів (*Ph*) здійснено шляхом поєднання наземних і дистанційних методів досліджень. Польові дослідження здійснювали із використанням апробованої методики (Лакида, 2002; Лакида, Васишин, Лашенко, Терентьев, 2011) на тимчасових пробних площах (ТПП) в умовах Байрачного Степу України (на прикладі Дніпропетровського регіону) (рис. 1).

Для розрахунку вегетаційних індексів та біофізичних показників рослин на досліджених територіях використовували набір мультиспектральних знімків із оптичного супутника Sentinel-2 <https://uk.wikipedia.org/wiki/Sentinel-2> за період 2015-2019 рр. Набір мультиспектральних знімків дослідженої території було отримано з Центру відкритого доступу Copernicus <https://scihub.copernicus.eu/> та з архіву Геологічної служби США <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Характеристика знімків наведена у табл. 1.

Для попередньої обробки знімків використовували програму SNAP із додатковими модулями з метою вирішення наступних завдань.

Sen2Cor – для проведення атмосферної корекції знімків та попередньої класифікації земної поверхні (другий рівень обробки даних 2А).

Sen2Three – для просторово-часового синтезу зображень на базі набору знімків з атмосферною корекцією, отриманих у різний час. У результаті обробки вхідних знімків за досліджені періоди отримано єдиний синтезований знімок за усередненими показниками та з усуненням некоректних пікселів, що виникли через хмарність, засвічування або тінь від навколишніх об'єктів.

Рис. 1. Розміщення тимчасових пробних площ регіону досліджень

Таблиця 1

Характеристики аерофотознімків для визначення вегетаційних індексів

№	Дата знімку	ID (назва файлу)	Хмарність, %
1	2015/08/06	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_EPA__20150806T084942_20160827T015954_A000633_T36UXU_N02_04_01	2,96
2	2015/08/26	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_EPA__20150826T084947_20160930T133348_A000919_T36UXU_N02_04_02	0
3	2015/09/05	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_EPA__20150905T084946_20161012T095728_A001062_T36UXU_N02_04_01	7,89
5	2015/12/24	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MTI__20151224T084711_20151224T104716_A002635_T36UXU_N02_01_01	0
6	2016/07/31	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS__20160731T084835_20160731T123122_A005781_T36UXU_N02_04_01	0,8759
7	2016/07/21	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS__20160721T084726_20160721T123307_A005638_T36UXU_N02_04_01	3,2259
8	2016/08/10	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS__20160810T084714_20160810T122652_A005924_T36UXU_N02_04_01	0,4828
9	2016/08/30	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS__20160830T084722_20160830T122619_A006210_T36UXU_N02_04_01	5,8707
10	2016/09/19	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_SGS__20160919T084734_20160919T122648_A006496_T36UXU_N02_04_01	6,6226
11	2019/03/03	L1C_T36UXU_A010386_20190303T084011	0,00510
12	2019/03/18	L1C_T36UXU_A019509_20190318T083954	0,0311
13	2019/04/27	L1C_T36UXU_A020081_20190427T083603	0
14	2019/06/16	L1C_T36UXU_A020796_20190616T084207	1,2669
15	2019/06/26	L1C_T36UXU_A020939_20190626T083926	0,0875
16	2019/07/01	L1C_T36UXU_A012102_20190701T084549	1,0158
17	2019/08/10	L1C_T36UXU_A012674_20190810T084403	2,8681
18	2019/08/20	L1C_T36UXU_A012817_20190820T084332	6,3572
19	2019/08/30	L1C_T36UXU_A012960_20190830T084008	0
20	2019/11/23	L1C_T36UXU_A023084_20191123T084306	4,1563

Biophysical Processor – для визначення біофізичних характеристик рослин (вміст хлорофілу, вміст вологи, індекс площі листя, фракція адсорбованого випромінювання, фракція покриття) у вигляді шарів растрових зображень.

Результати та обговорення. На основі опрацьованих таксаційних даних з ТПП отримано результати із кількісної характеристики надземної фітомаси соснових деревостанів, діапазон значень якої знаходився у межах від 6,22 ($D_{1,3}=5$ см) до 287,5 ($D_{1,3}=22$ см) тга⁻¹. Середня величина розрахованого показника фітомаси становила $190,3 \pm 18,1$ тга⁻¹.

З метою оцінювання надземної фітомаси у соснових лісах Байрачного Степу на основі використання даних супутникових знімків *Sentinel-2* для пікселів зображень, в яких знаходились ТПП, розраховані наступні показники: *NDVI* (вегетаційний індекс фотосинтетично активної біомаси), *TVI* (трансформований вегетаційний індекс), *LAI* (індекс площі листової поверхні), *FAPAR* (фракція адсорбованого фотосинтетично активного випромінювання), *FCOVER* (частка рослинного покриття), *CAB* (вміст хлорофілу *a* і *b* в листі [хвої]) та *CW* (вміст води у кроні). Отримані спектральні величини підлягали статистичній обробці даних (табл. 2).

Таблиця 2

Статистичні показники вегетаційних індексів та біофізичних параметрів соснових насаджень Північного Степу

Показник	Значення			Статистики		
	<i>min</i>	<i>max</i>	$\bar{X}$	σ	<i>A</i>	<i>E</i>
<i>NDVI</i>	0,65	0,85	0,74	0,07	0,162	-1,460
<i>TVI</i>	1,07	1,16	1,11	0,03	0,139	-1,463
<i>LAI</i>	1,33	2,46	1,78	0,34	0,487	-0,983
<i>FAPAR</i>	0,43	0,70	0,54	0,08	0,440	-0,957
<i>CAB</i>	58,03	157,54	87,45	25,92	1,121	1,132
<i>CW</i>	0,03	0,06	0,05	0,01	0,396	-0,431
<i>FCOVER</i>	0,37	0,68	0,48	0,09	0,797	-0,370

Отже, розподіл отриманих величин у більшості випадків відповідає нормальному, з огляду на нижчі значення асиметрії та ексцесу, порівняно із критичними значеннями (Янцев, 2012). Виключення становлять показники асиметрії та ексцесу для вмісту хлорофілу *a* і *b*, а також значення ексцесу для *NDVI*, *TVI*, *LAI* і *FAPAR*. Від'ємний знак ексцесу усіх (крім *CAB*) спектральних характеристик

свідчить про плосковершинність кривої розподілу їх значень.

Співставлення результатів польових вимірювань з вегетаційними і біофізичними показниками мультиспектральних знімків супутника *Sentinel-2* для досліджуваних ТПП показало, що між ними прослідковуються різної сили кореляційні зв'язки (табл. 3).

Таблиця 3

Коефіцієнти кореляції між компонентами надземної фітомаси соснових деревостанів та мультиспектральними показниками *Sentinel-2*

Фітомаса	<i>NDVI</i>	<i>TVI</i>	<i>LAI</i>	<i>FAPAR</i>	<i>CAB</i>	<i>CW</i>	<i>FCOVER</i>
<i>Ph</i>	0,83*	0,77*	0,83*	0,80*	0,78*	0,72*	0,79*
<i>Ph_{стов}</i>	0,82*	0,78*	0,84*	0,84*	0,80*	0,79*	0,81*
<i>Ph_{крони}</i>	0,22	0,13	0,13	0,03	0,10	0,13	0,10

* значення коефіцієнтів достовірні при $p < 0,05$

Спектральні характеристики мали сильнішу кореляцію з надземною фітомасою стовбурів (*Ph_{стов}*) та загальною фітомасою (*Ph*) соснових деревостанів. Найтіснішим зв'язок виявився для показника загальної фітомаси з *NDVI*, *LAI* та *FAPAR*. Проте варто відзначити наявність слабого взаємозв'язку наведених у роботі вегетаційних індексів із показниками компоненту крони (*Ph_{крони}*). Отримані дані

узгоджуються із результатами Foody et al. (2001), у публікації яких зазначається, що *NDVI* має слабкий взаємозв'язок із біомасою в контексті оцінювання лісової структури. Mganga & Lyaruu (2015), досліджуючи біомасу лісів Танзанії, також відзначають низький коефіцієнт взаємозв'язку між фотосинтетичною частиною фітомаси та *NDVI*, який досягає максимального значення 0,23. Низький рівень

кореляційних зв'язків між фотосинтетичною складовою біомаси та значеннями вегетаційних показників пояснюється, насамперед, геометрією намету, що, залежно від орієнтації та композиційної структури, може варіювати відповідно до спектрально-го профілю.

Наступним кроком стала побудова регресійних моделей залежностей надземної фітомаси (Ph) від показників спектральних характеристик. Як аналітичну форму отриманих результатів, використовували рівняння нелінійного (алометричного) типу, де вхідними аргументами слугували показники $NDVI$, LAI , $FAPAR$, TVI , $FCOVER$ (табл. 4).

Як видно із представлених даних, за допомогою побудованих регресійних моделей описується

близько 70% випадків. Найвищі показники коефіцієнта детермінації зафіксовано для залежності надземної фітомаси від індексу $NDVI$ окремо, а також за його поєднання з іншими предикторами ($NDVI + TVI$, $NDVI + FCOVER$). У таких моделях коефіцієнт детермінації загальної фітомаси сосняків сягає результату 0,71. Найнижча точність апроксимації встановлена у випадку побудови залежності надземної фітомаси сосняків від LAI .

Адекватність побудованих моделей встановлено в процесі їх перевірки на F -критерій Фішера. Отримані фактичні F -значення перевищували табличні величини як у випадку застосування однофакторних ($F_{\text{табл.}} = 9,33$), так і двофакторних ($F_{\text{табл.}} = 6,93$) моделей.

Таблиця 4

Моделі для оцінювання надземної фітомаси соснових деревостанів та їх статистична характеристика

Номер моделі	Вид рівняння	Коефіцієнт детермінації	F-критерій	
			$F_{\text{факт.}}$	$F_{\text{табл.}}$
1	$Ph = 563,620 \cdot NDVI^{1,251}$	0,70	30,72	9,33
2	$Ph = 240,241 \cdot LAI^{0,265}$	0,54	12,68	9,33
3	$Ph = 495,317 \cdot NDVI^{1,251} \cdot LAI^{1,098}$	0,64	7,13	6,93
4	$Ph = 550,474 \cdot NDVI^{1,140} \cdot FAPAR^{0,096}$	0,70	14,22	6,93
5	$Ph = 716,261 \cdot NDVI^{1,608} \cdot TVI^{-1,644}$	0,71	15,19	6,93
6	$Ph = 486,879 \cdot FCOVER^{0,554}$	0,64	23,67	9,33
7	$Ph = 556,648 \cdot NDVI^{1,936} \cdot FCOVER^{-0,350}$	0,71	14,49	6,93

Результати оцінювання показали, що встановлені регресійні моделі потенційно можуть бути використані для створення карти просторового розподілу надземної фітомаси соснових деревостанів, ґрунтуючись на отриманих засобами супутникової зйомки змінних, зокрема, $NDVI$.

Графічну інтерпретацію розрахунку фітомаси (на прикладі регресії №1, залежність від $NDVI$) сосняків відображено на рис. 2.

На представленому рисунку відображено неістотні відхилення змодельованих значень надземної фітомаси, порівняно із фактичними, що свідчить про достатньо точний опис моделлю емпіричних даних. Середня величина $NDVI$ для досліджуваних у регіоні соснових насаджень становить 0,42. За наведеними даними, акумулювання фітомаси сосняків у кількості від 150 до 250 т·га⁻¹ здійснюється за величини $NDVI$ у діапазоні від 0,4 до 0,5.

Отже, побудовані моделі може бути використано для оцінювання фітомаси соснових насаджень за даними Sentinel-2 для районів з подібними умовами.

Встановлена регресійна залежність стала предметом екстраполяції результатів оцінювання надземної фітомаси деревостанів сосни звичайної на територію досліджуваного регіону з побудовою відповідної карти. Для встановлення меж зазначеної території використано shape-files лісових під-

приємств Дніпропетровської області, а саме, кварталів і виділів Обухівського лісництва (<http://www.lisproekt.gov.ua/>).

Рис. 2. Залежність фактичних і змодельованих значень надземної фітомаси сосняків від показника $NDVI$

Для визначення показників біомаси ділянки лісового масиву у структурі Дніпровського держлісгоспу Байрачного Степу (на прикладі Обухівського лісництва) здійснено зонально-статистичний аналіз його кварталів за допомогою інструменту Spatial Analyst Tools у програмі ESRI ArcGIS. Карту просторового розподілу надземної фітомаси сосни звичайної у межах Обухівського лісництва наведено на рис. 3.

За наведеними даними, значення надземної фітомаси соснових насаджень Обухівського лісництва знаходяться у діапазоні від 75 до 310 т/га⁻¹. При цьо-

му більша частина території насаджень сосни звичайної (61% площі) нагромаджують фітомасу у діапазоні від 100 до 200 т/га⁻¹. Сумарна величина надземної фітомаси сосняків в умовах Обухівського лісництва, розрахована на основі обробки геоінформаційних даних, становить 195782,40 т, у той час як отриманий показник фітомаси, визначений наземним способом, становить 210861,95 т, що на 7,2% більше, порівняно із даними ДЗЗ. Таким чином, отримані розбіжності оцінювання фітомаси сосняків прямим (наземним) і непрямим (із використанням ГІС-технологій) методами є неістотними.

Рис. 3. Розподіл надземної фітомаси сосняків на території Обухівського лісництва

Висновки. Дані мультиспектральних знімків супутника Sentinel-2 мають тісний кореляційний зв'язок із величиною надземної фітомаси соснових деревостанів, отриманої наземним способом. Найтісніші кореляційні зв'язки встановлено між загальною надземною фітомасою сосни звичайної з вегетаційними індексами *NDVI* та *TVI*. Для отриманих біофізичних параметрів найвищі коефіцієнти кореляції спостережено для *FAPAR* та *FCOVER* із загальною надземною фітомасою та фітомасою стовбура.

Моделювання фітомаси сосняків за участю вегетаційних індексів, зокрема, *NDVI*, виявило високі результати їх перевірки на адекватність із отриманням достовірних коефіцієнтів детермінації та розрахованих *F*-значень.

Порівняльний аналіз продемонстрував наявність близьких фактичних і змодельованих значень надземної фітомаси залежно від *NDVI*, що дає змогу використовувати розроблену математичну модель на практиці.

Отримані результати демонструють перспективи запропонованого метода для оцінювання надземної фітомаси соснових насаджень на регіональному рівні, як ефективний засіб оперативного спостереження та управління лісовими ресурсами в умовах степової зони.

Список літератури

- Лакида, П.І. (2002). *Фітомаса лісів України*. Тернопіль: Збруч [Lakyda, P.I. (2002). *Live biomass of Ukrainian forests*. Ternopil: Zbruch (in Ukrainian)]
- Лакида, П.І., Васишин, Р.Д., Лашенко, А.Г., Терентьев, А.Ю. (2011). Нормативи оцінки компонентів надземної фітомаси дерев головних лісотвірних порід України: довідник (нормативно-виробниче видання). Київ: Екоінформ [Lakyda, P.I., Vasylyshyn R.D., Lashchenko A.H., & Terentiev A. Yu. (2011). *Normative assessment of the components of the aboveground phytomass of trees of the main forest species of Ukraine*. Kyiv: Ekoinform (in Ukrainian)]
- Усольцев, В.А. (2010). *Фитомасса и первичная продукция лесов Евразии*. Екатеринбург: УрО РАН [Usoltsev, V.A. (2010). *Phytomass and primary production of forests of Eurasia*. Yekaterinburg: Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (in Russian)]
- Янцев, А.В. (2012). *Выбор статистического критерия*. Симферополь: Таврический национальный университет [Yantsev, A.V. (2012). *Selection of statistical criteria*. Symferopol: Tavria National University (in Russian)]
- Bonan, G.B. (2008). Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of

- forests. *Science*, 320, 1444-1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>
- Canadell, J.G., & Schulze, E.D. (2014). Global potential of biospheric carbon management for climate mitigation. *Nat Commun*, 5, 5282-5294. <https://doi.org/10.1038/ncomms6282>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., & Cairns, M.A. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145, 87-99. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0100-x>
- Chen, L., Ren, C., Zhang, B., Wang, Z., & Xi, Y. (2018). Estimation of forest above-ground biomass by geographically weighted regression and machine learning with sentinel imagery. *Forests*, 9, 582-602. <https://doi.org/10.3390/f9100582>
- Dai, L., Jia, J., Yu, D., Lewis, B.J., Zhou, L., Zhou, W., Zhao, W., & Jiang, L. (2013). Effects of climate change on biomass carbon sequestration in old-growth forest ecosystems on Changbai Mountain in Northeast China. *Forest Ecology and Management*, 300, 106-116. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.06.046>
- Domingo, D., Lamelas-Gracia, M.T., Montealegre-Gracia, A.L., & de la Riva-Fernández, J. (2017). Comparison of regression models to estimate biomass losses and CO₂ emissions using low-density airborne laser scanning data in a burnt Aleppo pine forest. *European Journal of Remote Sensing*, 50, 384-396. <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1336067>
- Drusch, M., Bello, U.D., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F.,... Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Field, C.B., Randerson, J.T., & Malmstrom, C.M. (1995). Global net primary production: Combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 51, 74-88. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)00066-V](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)00066-V)
- Foody, G.M., Cutler, M.E., McMorrow, J., Pelz, D., Tangki, H., Boyd, D.S., & Douglas, I. (2001). Mapping the biomass of Bornean tropical rain forest from remotely sensed data. *Global Ecology and Biogeography*, 10 (4), 379-387. <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2001.00248.x>
- Forkuor, G., Benewinde Zougrana, J.-B., Dimobe, K., Ouattara, B., Vadrevu, K.P., & Tondoh, J.E. (2020). Above-ground biomass mapping in West African dryland forest using Sentinel-1 and 2 datasets – A case study. *Remote Sensing of Environment*, 236, 111496. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142737>
- Forrester, D.I., Tachauer, I.H., Annighoefer, P., Barbeito, I., Pretzsch, H., Peinado, R.,... Sileschi, G.W. (2017). Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecological Management*, 396, 160-175. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>
- Hazarika, M.K., Yasuoka, Y., Ito, A., & Dye, D. (2005). Estimation of net primary productivity by integrating remote sensing data with an ecosystem model. *Remote Sensing of Environment*, 94 (3), 298-310. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.004>
- Jakubauskas, M.E., & Price, K.P. (1997). Empirical relationships between structural and spectral factors of Yellowstone lodgepole pine forests. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63, 1375-1381.
- Krakau, U.K., Liesebach, M., Aronen T., Lelu-Walter M.A., & Schneck V. (2013). Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). In: Pâques L. (eds) Forest Tree Breeding in Europe. Managing Forest Ecosystems, 25. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6146-9_6
- Labrecque, S., Fournier, R.A., Luther, J.E., & Piercey, D. (2006). A comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland. *Forest Ecology and Management*, 226, 129-144. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.01.030>
- Li, P., Peng, Ch., Wang, M., Li, W., Zhao, P., Wang, P., Yang, Y., & Zhu, Q. (2017). Quantification of the response of global terrestrial net primary production to multifactor global change. *Ecological Indicators*, 76, 245-255. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.01.02>
- Lovynska, V. M. (2019). Evaluation standards of phytomass trunk components in pine stands of the Northern Steppe of Ukraine. *Bulletin of Poltava State Agrarian Academy*, 1, 11-17. <https://doi.org/10.31210/visnyk2019.01.01>
- Mganga, N.D., & Lyaruu, H. V. M. (2015). Applicability of satellite remote sensing in accounting above-ground carbon in Miombo Woodlands. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 4 (1). 1334-1343. <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.121>
- Niemelä, P., Kalliola, R., Kellomäki, S., Krug, J., Lehtikoinen, E., Roenkae, M.,... Tolvanen, H. (2015). Impacts of current and future climate change on terrestrial ecosystems. In book: *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* (pp. 399-409). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Pohjola, J., Laturi, J., Lintunen, J., & Uusivuori, J. (2018). Immediate and long-run impacts of a forest carbon policy – A market-level assessment with heterogeneous forest owners. *Journal of Forest Economics*, 32, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.jfe.2018.03.001>
- Tanaka, S., Takahashi, T., Nishizono, T., Kitahara, F., Saito, H., Iehara, T.,... Awaya, Y. (2015). Stand volume estimation using the k-NN technique combined with forest inventory data, satellite image data and additional feature variables. *Remote Sensing*, 7 (12), 378-394.
- Wittke, S., Yu, X., Karjalainen, M., Hyypä, J., & Puttonen, E. (2019). Comparison of two-dimensional

multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 76, 167-178.

Comparative analysis of the aboveground phytomass assessment of pine forest stands by ground and remote methods

P. Lakyda¹, V. Lovynska², Y. Buchavy³

One of the most efficient approaches to provide a current and objective assessment of forest cover over large areas is remote sensing data combining with an empirical models obtained from field ground research. For a detailed study of the phytomass of plantations by GIS technologies, calculations of spectral characteristics and biophysical parameters obtained as a result of decoding satellite images of monitoring objects are usually performed.

The object of study – pine stands of the ravine Steppe of Ukraine. The subject of research – bioproductivity of aboveground phytomass components of pine stands. The aim of the study to develop the models for pine stands phytomass assessing at the ravine Steppe of Ukraine by remote sensing.

The evaluation of aboveground phytomass pine forests was carried out by combining terrestrial and remote sensing methods. In order to estimate the aboveground biomass in the pine forests of the ravine Steppe based on the Sentinel-2 satellite imagery data for each pixel of images containing temporary sample plots (TSPs), the following indicators were calculated: NDVI, LAI, FAPAR, FCOVER, CAB and CW. In accordance with statistical analysis the distribution of spectral indices in most cases corresponds to normal, given the lower values of asymmetry and excess, compared with the critical values. Correlation analysis

revealed that the spectral characteristics obtained from satellite images had a stronger correlation with the aboveground phytomass of trunks and total phytomass, compared with the crown phytomass of pine wood stands.

With the help of the obtained geoinformation data, models of aboveground phytomass dependence on vegetation and biophysical parameters were designed with the help of which about 70 % of cases were subject to description. The NDVI, LAI, FAPAR, TVI, FCOVER indicators were used as input arguments. The equation of the dependence of the aboveground pine phytomass on the NDVI index is the most significant statistically from the designed equations. The lowest approximation accuracy is observed when the LAI index is included in the equation.

The comparison of the actual and simulated values of aboveground phytomass of pine stands obtained as a result of ground research revealed insignificant their deviation, which testifies to a rather accurate description of the empirical data model. The most intensive accumulation of pine phytomass at the amount from 150 to 250 t·ha⁻¹ is observed at NDVI values in the range from 0.4 to 0.5.

Based on the obtained data, the values of Scots pine aboveground phytomass were transformed into a forest area structure of the Dnieper state forestry of ravine Steppe (on the example of Obukhiv forestry) with the formation of a spatial distribution map of aboveground phytomass forestry. Values of aboveground phytomass pine plantations of Obukhiv forestry was estimated in the range from 75 to 310 t·ha⁻¹. At the same time, most of the Scots pine plantations territory (61 % of the area) has a phytomass in the range from 100 to 200 t·ha⁻¹.

It is estimated that the total value of aboveground phytomass of pines in Obukhov forestry, calculated on the basis of spatial data processing, is 195782.40 tons, while the obtained biomass, determined by ground estimation 210861.95 tons, which is 7.2% higher, compared with remote sensing data.

The obtained results demonstrate the prospects of the proposed method for the aboveground phytomass of pine plantations assessment at the regional level as an effective method of operational monitoring and management of forest resources in the Steppe zone.

Key words: *Pinus sylvestris* L.; Sentinel-2; satellite imagery data; vegetation indexes; ravine Steppe of Ukraine.

¹ Petro Lakyda – full Member of Forestry Academy of Sciences of Ukraine, first vice president FAS of Ukraine, Professor, Doctor of Agricultural Sciences, Director of Education and Research Institute of Forestry and Landscape-Park Management, National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Heroyiv Oborony str., 15, Kyiv, 03041, Ukraine. Tel.: 044-527-85-28; +38-067-462-80-43. E-mail: lakyda@nubip.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3639-2969>

² Viktoriia Lovynska – PhD of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Garden and Parks, Dniprovsk State Agrarian and Economic University, S. Yephremova str., 25, Dnipro, 49060, Ukraine. Tel.: +38-067-769-63-29; E-mail: glub@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7359-9443>

³ Yuriy Buchavy – PhD of Biological Sciences, Associate Professor of Department of Ecology and Technologies of Environmental Protection, Dnipro University of Technology, av. Dmytro Yavornytskyi, 19, Dnipro, 49005, Ukraine. Tel.: +38-066-224-38-66. E-mail: buchavy@gmail.com ORCID:0000-0003-3282-2810

Оценка точности определения надземной фитомассы дистанционными методами

П. И. Лакида¹, В. Н. Ловинская², Ю. В. Бучавый³

Оценку надземной фитомассы сосновых лесов осуществлено путем объединения наземных и дистанционных методов исследований. На основе использования данных спутниковых снимков Sentinel-2 для точек изображений, в которых находились временные пробные площади (ВПП), рассчитаны следующие показатели: NDVI, LAI, FAPAR, FCOVER, CAB и CW. По статистическому анализу данных, распределение спектральных показателей в большинстве случаев соответствует нормальному, учитывая низкие значения асимметрии и эксцесса, по сравнению с критическими величинами. Корреляционный анализ данных выявил, что полученные по спутниковым снимкам спектральные характеристики имели более сильную корреляцию с надземной фитомассой стволов и общей фитомассой, по сравнению с фитомассой кроны сосновых древостоев.

С помощью полученных геоинформационных данных построены модели зависимости надземной

фитомассы от вегетационных и биофизических параметров, с помощью которых описанию подлежали около 70% случаев. В качестве вводных аргументов использовали показатели NDVI, LAI, FAPAR, TVI, FCOVER. Наиболее статистически значимым с построенных уравнений оказалось уравнение зависимости надземной фитомассы сосняков от индекса NDVI. Самая низкая точность аппроксимации наблюдается при включении в уравнение индекса LAI.

Сравнение полученных фактических и смоделированных значений надземной фитомассы сосновых древостоев показало несущественные их отклонения, что свидетельствует о достаточно точном описании модели эмпирических данных. Наиболее интенсивное аккумулятивное фитомассы сосняков в количестве от 150 до 250 т·га⁻¹ осуществляется при величине NDVI, значения которого находятся в диапазоне от 0,4 до 0,5.

Осуществлена трансформация рассчитанных значений надземной фитомассы древостоев сосны обыкновенной на участок лесного массива в структуре Днепровского лесхоза Байрачной Степи (на примере Обуховского лесничества) с формированием карты пространственного распределения надземной фитомассы в пределах лесничества. Значение надземной фитомассы сосновых насаждений Обуховского лесничества находятся в диапазоне от 75 до 310 т·га⁻¹. При этом большая часть территории насаждений сосны (61% площади) имеют фитомассу в диапазоне от 100 до 200 т·га⁻¹.

Суммарная величина наземной фитомассы сосняков в условиях Обуховского лесничества, рассчитанная на основе обработки геоинформационных данных, составляет 195782,40 т, в то время как полученный показатель фитомассы, определенный наземным способом – 210861,95 т, что на 7,2% больше по сравнению с данными ДЗЗ.

Полученные результаты демонстрируют перспективы предложенного метода для оценки надземной фитомассы сосновых насаждений на региональном уровне, как эффективный метод оперативного наблюдения и управления лесными ресурсами в условиях степной зоны.

Ключевые слова: *Pinus sylvestris* L.; Sentinel-2; мультиспектральные спутниковые снимки; вегетационные индексы; Байрачная Степь Украины.

¹ Лакида Петр Иванович – академик Лесной академии наук Украины, первый вице-президент ЛАН Украины, профессор, доктор сельскохозяйственных наук, директор учебно-научного института лесного и садово-паркового хозяйства НУБіП Украины. Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 15, г. Киев, 03041, Украина. Тел.: (044) 527-85-28, +38-067-462-80-43. E-mail: lakyda@nubip.edu.ua ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3639-2969>

² Ловинская Виктория Николаевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры садово-паркового хозяйства, Днепровский государственный аграрно-экономический университет, ул. С. Ефремова, 25, г. Днепр, 49060, Украина. Тел.: +38-067-769-63-29; E-mail: glub@ukr.net ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7359-9443>

³ Бучавый Юрий Владимирович – кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и технологий защиты окружающей среды. Национальный технический университет «Днепро-вская политехника», ул. Д. Яворницкого, 19, г. Днепр, 40005, Украина. Тел.: +38-066-224-38-66. E-mail: buchavyu@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3282-2810>