

УДК 528.88:574.9

© М.О. Попов¹, д-р техн. наук;
І.Д. Семко¹, аспірант;
І. Козак² (I. Kozak), д-р біол. наук

¹Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі НАН України, м. Київ, Україна;

²The John Paul II Catholic University of Lublin, Lublin, Poland

ОЦІНЮВАННЯ ІНДЕКСУ ЛИСТКОВОЇ ПОВЕРХНІ ЗА ДАНИМИ АВІАЦІЙНОЇ ЛІДАРНОЇ ЗЙОМКИ

Проведено стислий огляд існуючих методів оцінювання індексу листкової поверхні LAI. Відзначено, що більшість методів виявляються малоефективними на великих площах рослинності. Для подібних випадків запропонована методика дистанційного оцінювання індексу листкової поверхні, в основі якої – регресійна модель зв'язку між значеннями індексу LAI і даними авіаційної лідарної зйомки. Побудовано рівняння множинної регресії. Наведено результати випробування запропонованої методики, які підтверджують її достатньо високу точність і перспективність.

Ключові слова: рослинність, індекс листкової поверхні, дистанційне оцінювання, авіаційна лідарна зйомка, множинна регресія.

1. Вступ

Рослинність – компонент біосфери, якому притаманні унікальні утворюючі, водозахисні, ґрунтозахисні та інші системні функції. Засвоюючи в процесі фотосинтезу двоокис вуглецю, воду, мінеральні компоненти, рослини утворюють органічні речовини – джерело енергії та їжі усіх живих організмів і виділяють життєво необхідний кисень. Значною є роль рослин в міграції хімічних елементів, у підтримці балансу існуючих в природі взаємозв'язків. Велике значення вони мають в утворенні ґрунтів та формуванні ландшафтів. За участю рослинності формується клімат, підтримуються водний баланс і необхідний для живих організмів склад приземної атмосфери тощо. Тому вивченню стану рослинності, достовірному і точному оцінюванню її кількісних та якісних показників завжди приділялась і приділяється велика увага.

Одним з основних показників активності процесів фотосинтезу рослинністю є індекс листкової поверхні (Leaf Area Index – LAI). Він був введений D. Watson ще у середині

минулого століття [1] для кількісного оцінювання фотосинтезуючої здатності листя і виявився одним з найбільш цінних, за своєю інформативністю і об'єктивністю, морфоструктурних параметрів рослинних екосистем. Індекс LAI сьогодні широко використовується при вивченні особливостей взаємодії рослинності з атмосферою, в моделях вуглецевого циклу, при оцінюванні продуктивності лісів, розрахунках фітомаси, тощо [2–4].

Індекс LAI визначається кількісно, як площа загальної поверхні освітлених листків (сонячним або іншим випромінюванням), що приходить на одиницю поверхні ґрунту [3], тобто:

$$LAI = S / G,$$

де S – площа освітлених листків, G – площа ґрунту.

Формально LAI – величина безрозмірна, але з фізичної точки зору вона вимірюється як m^2/m^2 . Для отримання величини індексу LAI рослинності існує багато різних методів, які поділяють на наземні і дистанційні [5, 6].

Серед наземних методів визначення LAI є такі, що потребують фізичного контакту з рослиною, а є такі, де це не потрібно. Наземні методи першої групи відносять до прямих, методи другої групи називають безконтактними, або непрямими.

Зміст найбільш процедурно простого методу прямих наземних вимірювань LAI полягає у тому, що на певній земельній ділянці з рослинністю зрізують все листя, збирають і підраховують його загальну площу. А далі шляхом ділення (половини) підсумованої загальної площі зібраного листя на площу ділянки отримують шукану величину LAI [5]. Підрахунок загальної площі листів важко провести інакше, ніж вручну, а це вимагає багато часу. Тому вказана процедура орієнтована переважно на вимірювання величини LAI для невеличких за своєю площею ділянок рослин, в основному “короткого” зростання (трав, сільськогосподарських культур). Разом з тим, відомі дослідження із застосуванням прямих наземних вимірювань для оцінювання LAI рослинності лісових масивів [7].

Головна перевага наземних прямих вимірювань – максимальна відповідність (наближеність) оцінок LAI дійсному стану рослинності, тому саме основані на таких вимірюваннях методи звичайно використовують для калібрування інших методів і технологій вимірювання LAI, зокрема дистанційних [8, 9].

Наземні безконтактні, або непрямі методи оцінювання LAI, базуються на аналізі особливостей проходження світла (сонячного та/або розсіяного атмосферою), що падає на купол дерева, через прогалини між листками. Ці особливості, у вигляді світлових сегментів і плям різних геометричних розмірів і інтенсивності, відображаються на загальній картині просторового розподілу інтенсивності світла внизу, під кроною дерева. Така картина може бути зареєстрована, наприклад, методом фотографування, а потім оброблена спеціальною комп'ютерною програмою, виходом якої є конкретне значення LAI.

Відомо багато наземних способів і відповідних приладів для реєстрування картини розподілу світла і проведення необхідних світлових вимірювань [4–6]. Найбільш поширеними

є спосіб фотографування Digital Hemispherical Photography (DHP) і спосіб аналізу рослинного пологую Plant Canopy Analysis (PCA).

Спосіб DHP надає можливість отримати цифрове фотографічне зображення з наочною цілісною картиною розташування, форми і розмірів прогалин у листві дерева. Але для одержання такої картини фотографувати треба з-під дерева в надир і при цьому має бути охоплено уся верхня півсфера. Щоб задовольнити останню вимогу, використовують цифрову фотокамеру з об'єктивом "риб'яче око" (останній забезпечує кут поля зору у 180 градусів). Для забезпечення необхідного орієнтування у просторі та стабілізації в момент знімання звичайно фотокамеру закріплюють на тринозі.

Спосіб оцінювання LAI через вимірювання та аналіз рослинного пологую PCA реалізовано в аналізаторі Plant Canopy Analyzer LAI-2000 американської компанії LI-COR Inc. [10]. Теоретичним підґрунтям даного способу є відома формула, яка пов'язує величину LAI з кількістю сумарного сонячного світла, що проходить під різними кутами через прогалини у листві дерева [4]. В конструкції приладу LAI-2000 передбачено п'ять кільцевих за формою чутливої площадки фотодетекторів, причому площадки утворюють концентричні кільця. На ці фоточутливі в інтервалі довжин хвиль 400–490 нм площадки за допомогою спеціальної оптики збирається світловий потік, який проходить через листву дерева під кутами від 0 до 75 градусів. Фотодетектори перетворюють величини падаючих на них світлових потоків в електричні сигнали, останні аналізуються комп'ютером на предмет виявлення та оцінювання прогалин, що дозволяє далі розрахувати величину LAI. Завдяки такій конструкції і за допомогою спеціального програмного забезпечення аналізатор Plant Canopy Analyzer LAI-2000 видає достатньо точні оцінки LAI. Відзначимо, що на даний час компанією LI-COR Inc. випускається удосконалений аналізатор LAI-2200 в різних опціях [10].

Таким чином, безперечною перевагою всіх наземних методів оцінювання LAI є достовірність (відповідність реальності) одержуваних оцінок LAI при технічній і процедурній простоті їх отримання. Але застосування наземних методів зустрічає серйозні труднощі, коли потрібні оцінки рівня активності процесів фотосинтезу рослинності на достатньо великих площах, особливо в умовах обмеженого ресурсу часу. У подібних випадках все частіше звертаються до сучасних технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які дозволяють одержувати необхідні оцінки LAI шляхом формування та послідуочого комп'ютерного аналізу аеро- або космічних багатоспектральних зображень [11, 12].

У статті пропонується та досліджується дистанційний метод оцінювання індексу листової поверхні LAI за даними авіаційної лідарної зйомки, тобто на основі зображень рослинності, які формуються за допомогою встановленого на літаку лазерно-локаційного сканера – авіаційного лідара (Light Detection and Ranging – LiDAR).

2. Контекст і постановка задачі

В основі застосування методів дистанційного оцінювання LAI лежить явище спектрально-вибіркової реакції рослинності на падаюче оптичне випромінювання. Така вибірковість фіксується на багатоспектральних аерокосмічних зображеннях ландшафтів з рослинністю

і може бути оцінена за допомогою так званих вегетаційних індексів. Найбільш часто з цією метою використовують Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Reduced Simple Ratio (RSR) і Enhanced Vegetation Index (EVI) [12, 13].

Загальна схема отримання дистанційної оцінки LAI через вегетаційні індекси базується на побудові формули регресії. Так, проведене в [14] дослідження на знімках Landsat-5 показало, що значення NDVI і LAI непогано корелюють між собою, а цей статистичний зв'язок може бути із задовільною точністю описаний формулою лінійної регресії.

У роботі [15] встановлено, що точність оцінок LAI у деяких випадках може бути покращена, якщо розраховувати LAI через індекс RSR. Однак нещодавно було показано [16], що реальним є подальше підвищення точності оцінок LAI за допомогою знімків Landsat-7, якщо є адекватна модель формування оптико-спектрального сигналу та можливість додатково використовувати деякі програмні продукти, що створюються на основі багатоспектральних зображень з космічного апарату MODIS.

Індекс EVI багато років застосовується для розрахунків LAI в програмних продуктах Terra та MODIS [17], оскільки він менш чутливий до негативного впливу випромінювання атмосфери та ґрунту.

З появою гіперспектральних аерокосмічних бортових засобів виникла можливість синтезувати нові різноманітні вегетаційні індекси й завдяки цьому отримувати значно більш повну інформацію про реакцію рослини на падаюче оптичне випромінювання. Важливо також, що вегетаційні індекси на основі гіперспектра виявилися не такими чутливими до геометрії рослинності, як вегетаційні індекси на основі сигналів багатоспектральних зображень. В результаті, як показано в [18, 19], досягається підвищення точності оцінок LAI.

Таким чином, на сьогодні розроблено достатньо багато методів дистанційного оцінювання LAI на основі застосування багатоспектральних та гіперспектральних аерокосмічних знімків. Однак всім їм притаманні два такі недоліки: 1) більшість багатоспектральних і гіперспектральних аерокосмічних знімків, на які орієнтуються відомі методи дистанційного оцінювання LAI, мають відносно невисоку просторову розрізнявальну здатність; 2) всі оцінки LAI базуються на сигналах, відбитих лише верхнім шаром рослинності, тобто в розрахунках ніяк не враховується тривимірність рослинних об'єктів.

Щоб подолати вказані недоліки, у світовій практиці для отримання кількісних характеристик рослинності, зокрема LAI, все частіше звертаються до такого активного засобу ДЗЗ, як лазерне сканування ділянок земної поверхні з борта літака або космічного апарата [20, 21, 22]. LAI за даними лідара оцінується або шляхом статистичного аналізу картини лісового пологую [24], або за допомогою методів регресійного аналізу [23].

Необхідно звернути увагу, що поки не вдалося розробити універсальний метод оцінювання індексу LAI, який би можна було застосовувати напряму для даних незалежно від типу лідара. Крім того, невідомим елементом кожної лідарної технології ДЗЗ оцінювання біофізичних параметрів рослинності є проведення наземних завіркових вимірювань на території дослідження. В силу цих двох чинників вирішення практично кожної задачі оцінювання LAI за даними лідарної зйомки потребує розробки додаткового

науково-методичного забезпечення з урахуванням специфіки вхідних даних, властивостей об'єктів інтересу, регіональних умов і т. д.

Мета даного дослідження – розробити методику оцінювання індексу листкової поверхні LAI на заданій території за даними авіаційної лідарної зйомки, а також провести експериментальну перевірку її можливостей.

3. Територія дослідження і вхідні дані

Дослідження щодо можливостей оцінювання індексу листкової поверхні LAI за даними авіаційної лідарної зйомки проводилися на базі ділянки лісу площею порядку 25 га на території лісництва Мартев надлісництва Тучно Західнопоморського воєводства Польщі, (координати центру ділянки: E16°05'42" N53°11'38"). Особливості ділянки – переважає хвойна рослинність (соснові деревостани) з різним віковим складом. На означену ділянку було отримано лідарні дані, напівсферичні фотографії та аерофотознімки.

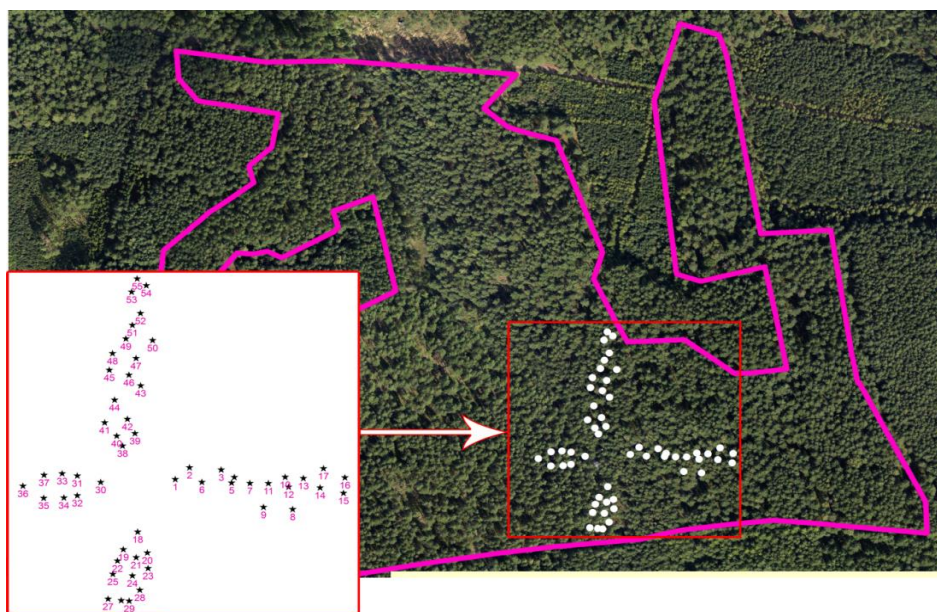


Рис. 1 – Територія дослідження та пункти DHP

Лідарні дані були одержані за допомогою авіаційного лазерно-локаційного сканера Optech ALTM з такими характеристиками [www.optech.com]:

- робоча довжина хвилі – 1,064 мкм;
- розрізненість по висоті – від 5 до 35 см (в залежності від висоти знімання);
- розрізненість на місцевості – близько 40 точок на 1 кв. м;
- можливість роздільної фіксації 4-х імпульсів за дальністю;
- динамічний діапазон сигналу – 12 бітів.

Фотографії DHP були одержані за допомогою фотокамери D3000 з матрицею 10 мегапікселів та об'єктивом Fisheye-Nikkor “Риб’яче око” 10.5mm f/2.8, який дає змогу охоплювати простір в куту до 180°. Загалом було задіяно 55 точок фотографування DHP (рис. 1),

кожна з яких була геопозиціювана. Висота знімання, обиралась, як правило, на рівні висоти грудей людини, тобто 1,3 м. Всі фотографії DHP були зроблені в ранковий період часу до сходу Сонця, як це рекомендовано в [25].

Аерофотознімки використовувалися в роботі для полегшення вивчення території досліджень і визначення місць точок наземного фотографування.

4. Методика оброблення даних: схема і експериментальні результати

Методика дистанційного оцінювання LAI за даними авіаційного лідара реалізується за схемою, представленою на рис. 2. Згідно зі схемою, цифрове оброблення фотографій DHP та лідарних даних здійснюється окремо і незалежно.

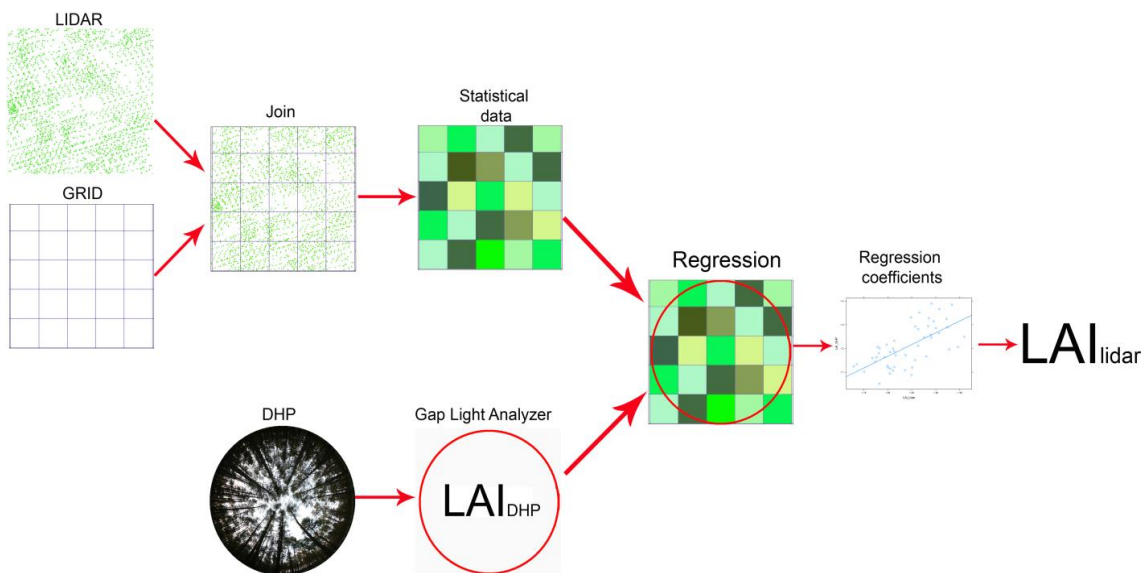


Рис. 2 – Схема оцінювання LAI за даними авіаційного лідара

Оброблення даних DHP проводилося програмним продуктом Gap Light Analyzer (GLA). За його допомогою кожне зображення DHP (рис. 3А) розділялося на три псевдоканали, що спільно утворюють RGB-представлення (червоний, зелений та синій), з яких далі відбирався канал з найбільшою інформативністю. У якості такого був відібраний синій канал, оскільки він, як показано в [26, 27], забезпечує найбільш чітке розмежування між рослинністю, небом і змішаними пікселями, тому як фотозинтезуючі фітоелементи (листя, голки) мають набагато менший коефіцієнт відбиття і пропускання в синій області оптичного спектру. У бінарному вигляді це зображення представлено на рис. 3Б. Використовуючи це зображення, програма GLA дозволила автоматично виділити прогалини, оцінити їх площі, провести інші необхідні обчислення і на виході видати оцінку LAI.

Обчислення LAI проводилися програмою GLA у двох варіантах: 1) аналізується розподіл випромінювання в межах просторового кута $\pm 60^\circ$; 2) аналізується розподіл випромінювання в межах просторового кута $\pm 75^\circ$. Результат, що отримується у першому варіанті, позначається в програмі GLA як LAI4, другий результат – як LAI5 [28].

У нашому дослідженні оцінка величини індексу за даними лідару обчислювалась як середнє цих двох результатів:

$$LAI_{DHP} = \frac{LAI4 + LAI5}{2}.$$

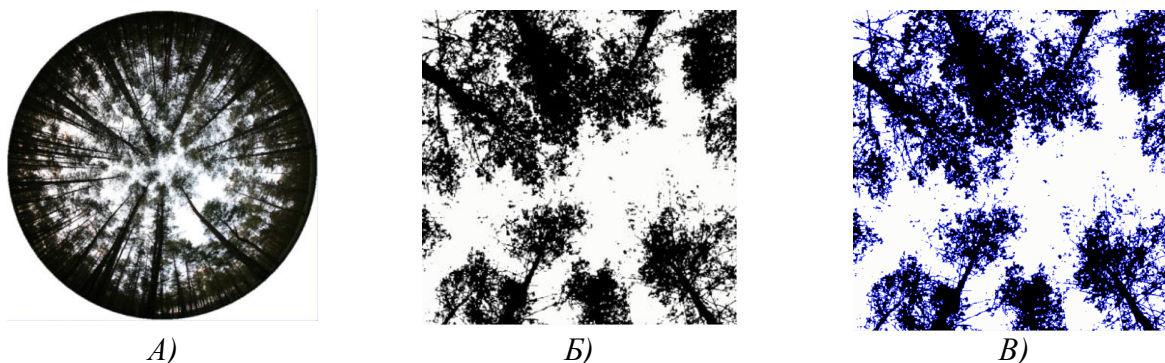


Рис. 3: А) Фотографія DHP; Б) Бінарне зображення у синьому діапазоні;
В) Результат оброблення бінарного зображення програмою GLA
(чорний колір – рослинність, білий – небо, синій – суміжні пікселі)

Процес оброблення лідарних даних реалізований за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення TerraScan фінської компанії Terrasolid. Процес починається з визначення та фільтрації точок, що належать до ґрунту (Gr). При вирішенні цієї задачі виявилось, що в простих ситуаціях програма TerraScan здатна це робити в автоматичному режимі, але у разі складної морфології потрібно було втручання в програму TerraScan та налаштування певних параметрів.

Точки, що залишилися, діляться на два класи в залежності від висоти розташування: що розташовані вище ґрунту до висоти 1,3 м включно (Other) та ті, що розташовані вище вказаної висоти (Veg).

Наступним етапом оброблення двох виділених шарів лідарних даних було визначення математичних змінних (регресорів) для побудови рівняння множинної регресії [29]. Для цього на територію дослідження спочатку було побудовано сітку (grid) з кроком 1 x 1 м. Проте виявилось, що у багатьох випадках кількість лазерних точок в чарунці такого розміру була менше 10, що впливало на точність значень отриманих змінних; тому було вирішено збільшити розмір кроку сітки до 3 м. Після об'єднання (join) сітки та лідарних даних для кожної чарунки було визначено такі метричні і статистичні параметри: щільність та кількість відбиття імпульсів випромінювання; середнє значення висоти (mean); мінімальне значення висоти (min); максимальне значення висоти (max); стандартне відхилення (stdv); коефіцієнт варіації (cv); процентилі висоти (5, 10, 25, 50, 75, 90, 95).

При побудові регресійної залежності кожний з цих параметрів може розглядатися як регресор. Крім того, у якості регресора може виступати індекс проникнення лазерного випромінювання (Laser Penetration Index – LPI), який визначається як [30]:

$$LPI_{ij} = \frac{Gr_{ij}}{Gr_{ij} + Veg_{ij}},$$

де Gr_{ij} – щільність точок ґрунту; Veg_{ij} – щільність точок рослинності.

Оскільки необхідні дані про щільність точок ґрунту та рослинності можуть бути отримані з результатів проведеної нами раніше класифікації масивів точок, то індекс LPI також може застосовуватися як змінна при побудові формули регресії.

На рис. 4 показано розподіл цього індексу на територію дослідження; тут значеннями LPI, близькими до 0, відображені ділянки з густою рослинністю, зі зростанням значень LPI збільшується рівень відкритості місцевості.



Рис. 4 – Розподіл індексу LPI на території дослідження

Будемо шукати оцінку LAI, що отримується за допомогою даних авіаційної лідарної зйомки, через модель множинної регресії [30], а саме у вигляді:

$$y_i = b_0 + b_1x_{i1} + b_2x_{i2} + \dots + b_px_{ip}; \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

Тут через y_i позначено відповідну оцінку величини індексу листкової поверхні за даними лідарної зйомки, тобто LAI_{LIDAR} ; x_1, x_2, \dots, x_p – незалежні змінні (регресори); b_0, b_1, \dots, b_p – коефіцієнти регресії; p – кількість регресорів; n – кількість вимірювань; $n \gg p$.

Для побудови шуканого рівняння множинної регресії необхідно вирішити дві задачі: 1) відібрати найбільш інформативну сукупність регресорів з числа всіх можливих; 2) визначити коефіцієнти регресії.

Основні труднощі викликає перша задача, для її вирішення було застосовано метод послідовного виключення [29]. Розрахунки коефіцієнтів регресії проводилися із застосуванням методу найменших квадратів.

Суть методу послідовного виключення полягає в тому, що спочатку в модель множинної регресії включаються всі можливі регресори (їх кількість p береться максимальною). Далі за допомогою певного критерію (у нашому дослідженні був використаний F-критерій) оцінюється внесок кожного регресора в підвищення точності. Якщо найменше значення критерію менше за обране попередньо деяке критичне значення, то відповідна змінна виключається з моделі (величина p зменшується на одиницю). Модель перераховується, і знову обчислюються значення частинного F-критерію з порівнянням з критичним значенням і т. д. Процедура формування інформативної сукупності регресорів закінчується тоді, коли отримане найменше значення критерію буде більшим за критичне.

Зазначимо, що аналіз всіх змінних і вибір найбільш інформативних регресорів за описаними вище правилами був проведений з використанням програмного забезпечення JMP SAS software.

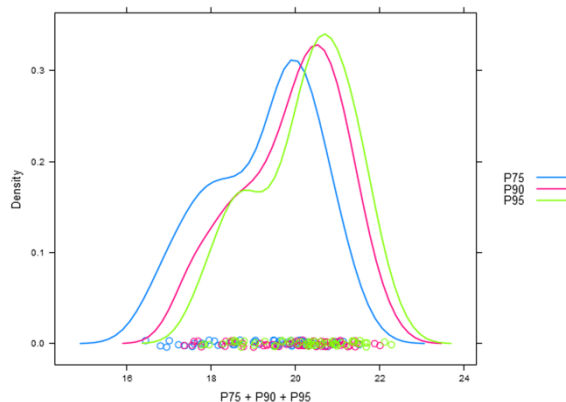


Рис. 5 – Графік щільності значень процентилей

Після проведеного аналізу найбільш інформативними для побудови рівняння множинної регресії виявилися: CV (тобто $stdev/min$), LPI та процентилі P25, P50, P75, P90, P95. Проте, проаналізувавши останні три процентилі P75, P90, P95 (рис. 5), виявилось, що їх значення практично дублюють один одного. Тому було вирішено до рівняння множинної регресії включати тільки один з них – P75, як верхній квартиль.

На рис. 6 у формі блочної матриці зображено зв'язок діаграм розсіювання обраних регресорів та коефіцієнта детермінації. Інші регресори не показали прийнятної кореляції з LAI_{DHR} .

Далі були розраховані, з використанням методу найменших квадратів, коефіцієнти при відібраних регресорах, і, в результаті, рівняння множинної регресії отримало вигляд:

$$LAI_{LIDAR} = -1.14 + 3.31 \cdot LPI + 0.38 \cdot CV - 0.00766 \cdot P25 - 0.02 \cdot P50 - 0.14 \cdot P75.$$

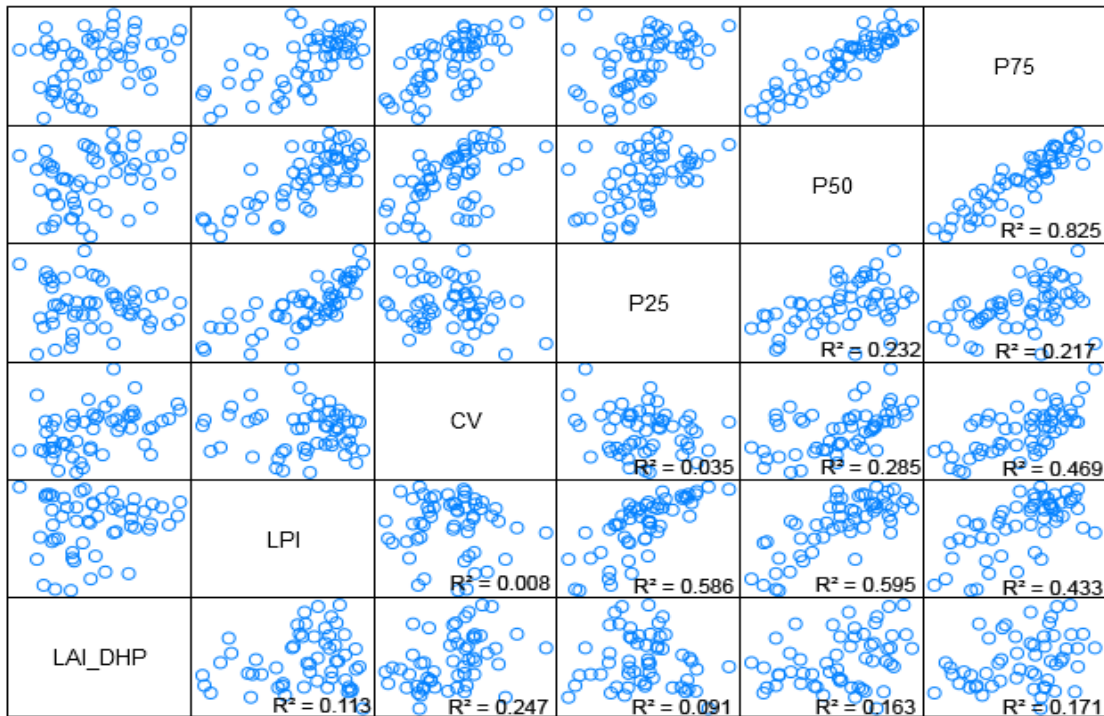


Рис. 6 – Матриця індивідуальної кореляції

Для оцінки точності було підраховано коефіцієнт детермінації ($R^2 = 0,638$) та середньоквадратичне відхилення коефіцієнта регресії від його істинного значення ($RMSE = 0,0964$). Загалом рис. 7 підтверджує наявність тісного кореляційного зв'язку між отриманими LAI з даних лідара та даних фотографування неба через навів.

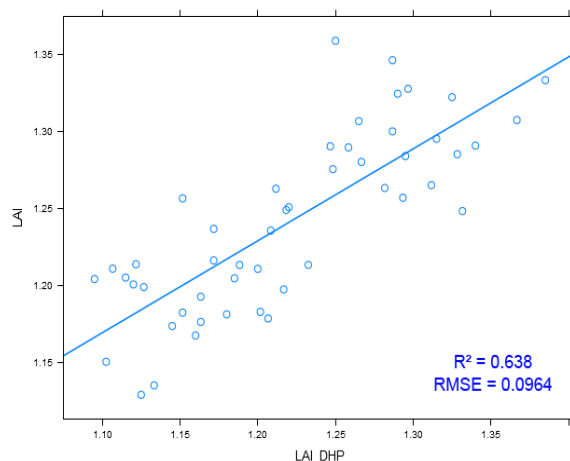


Рис. 7 – Лінійна регресія

На рис. 8 зображено результат оцінки LAI на територію дослідження з використанням одержаної регресійної моделі на момент проведення лідарної зйомки. Якщо, скажімо, відомі лідарні дані на різні періоди часу, то порівняння різночасових величин LAI надає можливість оцінювати зміни у стані рослинності і розробляти відповідні рекомендації.

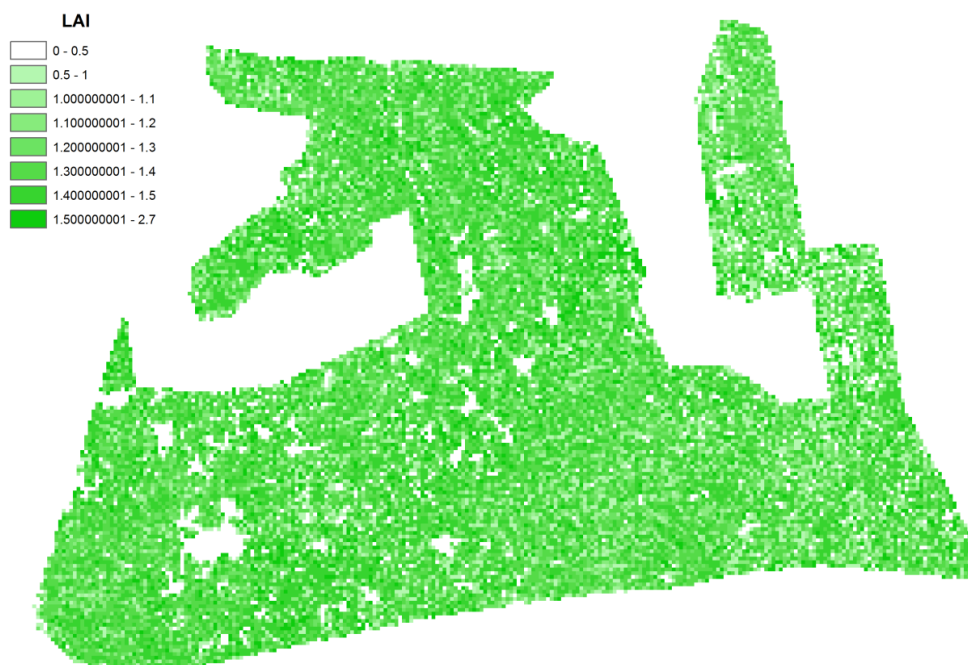


Рис. 8 – Розподіл оцінок LAI на територію дослідження

5. Висновки

У роботі проведено стислий огляд існуючих методів оцінювання індексу листкової поверхні LAI і відзначено, що більшість методів виявляються малоефективними, якщо потрібно мати оцінки активності процесів фотосинтезу рослинності на великих площах. У подібних випадках приходять на допомогу дистанційні методи, й один з таких методів оцінювання індексу листкової поверхні розглянутий в роботі. Запропонована методика дистанційного оцінювання індексу LAI, в основі якої – регресійна модель зв'язку між значеннями індексу LAI і даними авіаційної лідарної зйомки.

Наведено результати випробування запропонованої методики, які підтверджують її працездатність та перспективність для оцінювання LAI рослинності на великих площах.

Актуальними питаннями для подальших досліджень є збільшення точності дистанційних оцінок LAI за лідарними даними, забезпечення інваріантності оцінок до просторового масштабу зйомки, а також вивчення можливостей дистанційного визначення інших показників активності процесу фотосинтезу рослинності на основі лідарних даних.

Дослідження було підтримано Фондом фундаментальних досліджень України в рамках наукового проекту № Ф54.2/019 “Оцінювання характеристик рослинних об'єктів на основі комплексування даних спектрополяризаційних вимірювань і матеріалів аерокосмічних зйомок”.

Автори також висловлюють вдячність Анджею Венглю та Павлу Стшелінському за надання даних лідарної зйомки та інших матеріалів, що були отримані в рамках наукового проекту NN 309 014638 “Застосування моделі FORKOME до прогнозування алокації і акумуляції біомаси в деревостанах сосни звичайної (*Pinus sylvestris* L.)” за підтримки Міністерства науки і вищої освіти Польщі.

Список використаної літератури

1. Watson D.J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. Variation in net assimilation rate and leaf areas between species and varieties, and within and between years / D.J. Watson // *Annals of Botany*, 1947, 11, pp. 41–76.
2. Lakida P. Estimation of Forest Phytomass for Selected Countries of the Former European USSR / P. Lakida, S. Nilsson, A. Shvidenko // WP-95-79. – Laxenburg, Austria: IIASA, 1995. – 33 p.
3. Chen J.M. Defining leaf area index for non-flat leaves / J.M. Chen, T.A. Black // *Plant, Cell & Environment*, 1992. 15 (4), pp. 421–429.
4. Chen J.M. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements / J.M. Chen, P.M. Rich, S.T. Gower, J.M. Norman, S. Plummer // *Journal of Geophysical Research*, 1997. Vol. 102, No. D24, pp. 29,429–29,443.
5. Breda N.J.J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies / N.J.J. Breda // *Journal of Experimental Botany*, 2003. Vol. 54, No. 392, pp. 2403–2417; doi: 10.1093/jxb/erg263.
6. Jonckheere I. Review of methods for in-situ leaf area index determination. Part 1. Theories, sensors and hemispherical photography / I. Jonckheere, S. Fleck, K. Nackaerts, B. Muys, P. Copin, M. Weiss, F. Baret // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004. 121, pp. 19–35.
7. Hutchison B.A. The architecture of a deciduous forest canopy in eastern Tennessee, U.S.A. / B.A. Hutchison, D.R. Matt, R.T. McMillen, L.J. Gross, S.J. Tajchman, J.M. Norman // *Journal of Ecology*, 1986, Vol. 74, pp. 635–646.
8. Garrigues S. Validation and intercomparison of global Leaf Area Index products derived from remote sensing data / S. Garrigues, R.Lacaze, F. Baret, J.T. Morisette, M. Weiss, J.E. Nickeson, R. Fernandes, S. Plummer, N.V. Shabanov, R.B. Myneni, Y. Knyazikhin, W. Yang // *Journal of Geophysical Research*, 2008, Vol. 113, G02028; doi:10.1029/2007JG000635.
9. Попов М.О. Оцінювання характеристик зелених насаджень з використанням засобів дистанційного зондування Землі / М.О. Попов, І.Д. Семко // Зб. наукових праць “Екологічна безпека та природокористування”. – К.: КНУБА, 2012. Вип. 12. С. 51–62.
10. LAI-2000 plant canopy analyzer: operating manual // LI-COR Inc., Nebraska, U.S.A. 1990. www.licor.co.za/manuals/LAI-2200_Manual.pdf
11. Zheng G. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors / G. Zheng, L.M. Moskal // *Sensors*, 2009, 9, pp. 2719–2745; doi:10.3390/s90402719
12. Багатоспектральні методи ДЗЗ в задачах природокористування / За ред. В.І. Лялька і М.О. Попова. – К.: Наук. думка, 2006. – 360 с.
13. Myneni R.B. The Interpretation of Spectral Vegetation Indexes / R.B. Myneni, F.G. Hall, P.J. Sellers, A.L. Marshak // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, Vol. 33, No. 2, pp. 481–486.
14. Turner D.P. Relationships between leaf area index and Landsat TM spectral vegetation indices across three temperate zone sites / D.P. Turner, W.B. Cohen, R.E. Kennedy, K.S. Fassnacht, J.M. Briggs // *Remote Sensing of Environment*, 1999, Vol. 70, pp. 52–68.

15. Stenberg P. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands / P. Stenberg, M. Rautiainen, T. Manninen, P. Voipio, H. Smolander // *Silva Fennica*, 2004. 38 (1). pp. 3–14.
16. Ganguly S. Generating global Leaf Area Index from Landsat: Algorithm formulation and demonstration / S. Ganguly, R.R. Nemani, G. Zhang, H. Hashimoto, C. Milesi, A. Michaelis, W. Wang, P. Votava, A. Samanta, F. Melton, J.L. Dungan, E. Vermote, F. Gao, Y. Knyazikhin, R.B. Myneni // *Remote Sensing of Environment*, 2012, Vol. 22, pp. 185–202; doi:10.1016/j.rse.2011.10.032
17. Huete A. MODIS VEGETATION INDEX (MOD13). Algorithm theoretical basis document / A. Huete, C. Justice, W. van Leeuwen // NASA, MODIS-WEB. Version 3, 1999; http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf
18. Fernandes R. Evaluating image-based estimates of leaf area index in boreal conifer stands over a range of scales using high-resolution CASI imagery / R. Fernandes, J.R. Miller, J.M. Chen, I.G. Rubinstein // *Remote Sensing of Environment*, 2004, Vol. 89, pp. 200–216.
19. Schlerf M. Derivation of Forest Leaf Area Index From Multi- and Hyperspectral Remote Sensing Data / M. Schlerf, C. Atzberger, M. Vohland, H. Buddenbaum, S. Seeling, J. Hill // *EARSeL eProceedings* 3, 3/2004, pp. 405–413.
20. Leblanc S.G. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests / S.G. Leblanc, J.M. Chen, R. Fernandes, D.W. Deering, A. Conley // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005. Vol. 129, pp. 187–207.
21. Медведев Е.М. Лазерная локация земли и леса. 2 изд. / Е.М. Медведев, И.М. Данилин, С.Р. Мельников // Красноярск: Геокосмос; Ин-т леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 229 с.
22. Measures R.M. Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications. / R.M. Measures // – Malabar, Florida: Krieger Publ. Company, 1992. – 510 p.
23. Zhao K. Lidar-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA / K. Zhao, S. Popescu // *Remote Sensing of Environment*, 2009. Vol. 113, pp. 1628–1645.
24. Morsdorf F. Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction / F. Morsdorf, B. Kötz, E. Meier, K. Itten, B. Allgöwer // *Remote Sensing of Environment*, 2006. Vol. 104, pp. 50–61.
25. Chianucci F. Digital hemispherical photography for estimating forest canopy properties: current controversies and opportunities / F. Chianucci, A. Cutini // *iForest –Biogeosciences and Forestry*, 2012. Vol. 5, pp. 290–295.
26. Jonckheere I. Assessment of automatic gap fraction estimation of forests from digital hemispherical photography / I. Jonckheere, K. Nackaerts, B. Muys, P. Coppin // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005. Vol. 132, pp. 96–114.
27. Leblanc S. Methodology comparison for canopy structure parameters extraction from digital hemispherical photography in boreal forests / S. Leblanc, J. Chen, R. Fernandes, D. Deering, A. Conley // *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005. Vol. 129, pp. 187–207.

28. Frazer G.W. Gap Light Analyzer (GLA): Imaging software to extract canopy structure and gap light transmission indices from true-colour fisheye photographs / G.W. Frazer // Simon Fraser University, Burnaby, British Columbia, CANADA; Institute of Ecosystem Studies, Millbrook, N.Y., USA, 1999, pp. 20–21.

29. Seber G.A.F. Linear Regression Analysis. 2 ed. / G.A.F. Seber, A.J. Lee // N.Y.: Wiley & Sons, 2003. – 582 p.

30. Barilotti A. La tecnologia LiDAR per lo studio della biomassa negli ecosistemi forestali / A. Barilotti, S. Turco, R. Napolitano, E. Bressan // 15th Meeting of the Italian Society of Ecology, Torino, Italy, 2005.

Стаття надійшла до редакції 24.01.14 українською мовою

© М.А. Попов, И.Д. Семко, И. Козак

**ОЦЕНКА ИНДЕКСА ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПО ДАННЫМ АВИАЦИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ СЪЕМКИ**

Проведен краткий обзор существующих методов оценки индекса листовой поверхности LAI. Отмечено, что большинство методов оказываются малоэффективными на больших площадях растительности. Для подобных случаев предложена методика дистанционного оценивания индекса листовой поверхности, в основе которой – регрессионная модель связи между значениями индекса LAI и данными авиационной лидарной съемки. Построено уравнение множественной регрессии. Приведены результаты испытания предложенной методики, подтверждающие ее достаточно высокую точность и перспективность.

© M.O. Popov, I.D. Semko, I. Kozak

ASSESSING OF LEAF AREA INDEX USING LIDAR DATA

The brief review of methods for assessing of leaf area index (LAI) is presented. It is stated that most of known methods are underefficiency if we have matter with vegetation on acred area. For similar cases a method for LAI remote assessing is proposed. The method is based on regression model which couples LAI values and LiDAR data. Multiple regression equation is constructed. Proposed method was validated; the results of experimental investigation confirm its correctness and perspectiveness.