

ИНДЕКС ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ: МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е.И. Голубева, М.В. Зимин, О.В. Тутубалина, Ю.И. Тимохина, А.С. Азарова

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва

egolubeva@gmail.com, ziminmv@mail.ru, olgatut@mail.ru, timokhina2701@gmail.com, ale4ka.azar2@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются методы полевых инструментальных измерений и использование материалов дистанционного зондирования для измерения индекса листовой поверхности растительного покрова, их возможности и ограничения, верифицированные при исследовании в северных лесах. Индекс листовой поверхности LAI (leaf-area index) – отношение площади листьев (одной их стороны) и/или хвои всех растений к площади почвы, занимаемой данной экосистемой. LAI представляет важный параметр, отражающий материальный и энергетический обмен в процессах фотосинтеза, дыхания, круговорота углерода и питательных веществ растений в экосистемах, прогнозирования их роста и продуктивности. Индекс листовой поверхности является ключевой переменной, функционально связанной с производством фитомассы, круговоротом воды и питательных веществ в конкретных микроклиматических условиях. Достоверная оценка LAI имеет большое значение для мониторинга и анализа различных биофизических процессов в экосистемах, это комплексный показатель, количественно отражающий сомкнутость древесного полога, проективное покрытие кустарникового, кустарничкового, травяного, мохово-лишайникового ярусов естественных экосистем или посевов агроценозов. Показатель индекса листовой поверхности используется в экологических исследованиях, направленных на изучение состояния растительного покрова для решения научных и прикладных задач. Глобальный индекс листовой поверхности равен 4,5, его значения зависят как от природных условий, преимущественно гидротермических, так и от особенностей и степени антропогенного воздействия. Рассмотрены теоретические основы изучения индекса листовой поверхности и различные методы его измерения. При натурных исследованиях индекс листовой поверхности определяется либо с помощью специальных приборов, либо деструктивным способом: ассимиляционная площадь листьев определяется методом «высечек» фиксированной площади, а накопление сухого вещества – весовым методом с последующим высушиванием вегетативной массы растений до воздушно-сухого или абсолютно-сухого состояния. Весьма перспективно использование данных дистанционного зондирования, когда по цифровым изображениям растительного покрова можно определять LAI различных типов растительности без изъятия фитомассы и оценить их состояние.

Ключевые слова: индекс листовой поверхности, дистанционное зондирование, фитомасса, экологическое состояние.

Введение

Индекс листовой поверхности LAI – (leaf-area index) представляет важный параметр, отражающий материальный и энергетический обмен в процессах фотосинтеза, дыхания, круговорота углерода и питательных веществ растений в экосистемах, прогнозирования их роста и продуктивности. Индекс листовой поверхности является ключевой переменной, функционально связанной с производством фитомассы, круговоротом воды и питательных веществ в конкретных микроклиматических условиях. Достоверная оценка LAI имеет большое значение для мониторинга и анализа различных биофизических процессов в экосистемах, это комплексный показатель, количественно отражающий сомкнутость древесного полога, проективное покрытие кустарникового, кустарничкового, травяного, мохово-лишайникового ярусов естественных экосистем или посевов агроценозов. Показатель индекса листовой поверхности используется в экологических исследованиях, направленных на изучение состоя-

ние растительного покрова для решения научных и прикладных задач. LAI – это отношение площади листьев (одной их стороны) и хвои к площади почвы биоценоза. В хвойных лесах он может достигать 28, на лугах – до 30, в степях снижается до 2,5 [1–4] Глобальный индекс листовой поверхности равен 4,5. Для расчета продуктивности фотосинтеза индексы каждого дня вегетации суммируются, и эта сумма называется фотосинтетическим потенциалом (в м²/га). По цифровым изображениям растительного покрова можно определять LAI различных типов растительности и оценивать их состояние. Так, определение LAI позволило определить категории состояния древостоев [5]. Также по данным государственного лесного реестра решалась и обратная задача – был определен индекс листовой поверхности лесов России в целом [6].

В настоящем исследовании рассматриваются методы бесконтактного (неразрушительного) инструментального метода измерения индекса листовой поверхности на примере лесов Кольского

полуострова и Центральной Якутии, возможности и ограничения его определения по данным космических снимков различного разрешения.

Результаты и их обсуждение

Методы вычислений индекса листовой поверхности. Как уже отмечалось, методы измерения LAI можно разделить на два типа: традиционные прямые измерения (деструктивные) и косвенные. При использовании косвенных методов измерений используют ДДЗ или наземные инструментальные измерения, проводимые непосредственно в полевых условиях [7]. В этих случаях используются камеры с широким углом обзора, например, Garmin Virb 360 и камеры со специальными объективами типа рыбий глаз (FishEye), обеспечивающие получение полусферических фотографий и их последующую обработку в специализированном ПО (CAN-EYE). При использовании подобных камер ведется съемка с поверхности земли с ориентацией на небесный свод. Также используются специальные измерительные приборы (AccuPAR LP-80, LI-Cor LAI 2200C и др.), работа которых основана на использовании оптических сенсоров, последовательно помещаемых под пологом растительности и над его поверхностью, что в связи с характеристиками по местоположению и времени реализации съемки позволяет получать высокоточные результаты измерений. При использовании материалов дистанционного зондирования используются индексные подходы.

С помощью прибора AccuPAR LP-80, фиксируется линейное фотосинтетическое активное излучение (PAR) и индекс листовой поверхности (LAI), это реализовано с помощью сенсоров, на которые падают прямой и проникающий солнечный свет – значения фотосинтетически активного излучения над поверхностью растительного покрова и под ним, ниже уровня расположения ассимиляционных органов растений. На основе математического аппарата в приборе производятся расчеты зенитного угла солнца, прямого солнечного излучения (Fb) и TAU (переменная в инверсионных уровнях LAI). Для выполнения всех расчетов, производимых прибором, перед началом полевых работ, вводятся географические координаты объекта исследований и точное время, а также вспомогательная информация – индекс распределение листьев по поверхности. Данный индекс дает поправку на форму произрастания исследуемой растительности: вертикальный, горизонтальный, квадратный, сферический (например, сомкнутые леса, поля пшеницы и др.).

Измерения проводились в лесах Кольского полуострова, в Хибинском горном массиве и в Центральной Якутии на тестовых площадках 20 x 20 м.

В лесах трудно получить данные о величине верхнего PAR (необходимо поместить прибор над уровнем древесной растительности), поэтому использована методика расчета значения верхнего PAR по падающей солнечной радиации, полученной верхним сенсором параллельно работающего спектрометра Spectro Sense 2+ установленного на открытом месте и синхронизированного по времени. Далее результаты измерений с обоих приборов сопоставляются статистическими методами регрессионного анализа по отдельности для пересчетов высоких, средних и низких значений верхнего PAR. Выведенные уравнения были проанализированы, и в результате проведенного анализа было принято решение отказаться от уравнения для средних значений, так как уравнение для высоких значений более показательно для обоих случаев.

Расчет индекса листовой поверхности проводится по следующей формуле:

$$S = \frac{[(1 - \frac{1}{2K})f_b - 1] \ln}{A(1 - 0.47f_b)} \quad (1)$$

Формула (1) состоит из нескольких переменных: доли падающего PAR (f_b); параметра A; поглощающей способности листа в полосе PAR (которая принята за константу $a = 0,9$); коэффициента экстинкции для купола (K) и переменной τ .

Перед расчетами индекса, выполняется расчет переменных – коэффициента экстинкции для купола K имеет две формулы для расчетов. В нашем случае используется более простая (2), где имеется только одна переменная (Θ – зенитный угол Солнца):

$$K = \frac{1}{2\cos\Theta} \quad (2)$$

параметр A рассчитывается по формуле 3, используя поглощающую способность листа в полосе PAR:

$$A = 0.283 + 0.785a - 0.159a^2 \quad (3)$$

Формула, представленная в инструкции пользования прибором для расчета переменной τ (4), менее точная, чем та, по которой производится расчет самим прибором. Переменная τ представляется как деление нижнего значения PAR на высокое значение PAR:

$$\tau = f_b \exp(-\sqrt{a}) + (1 - f_b) \exp(-0.87\sqrt{a}) \quad (4)$$

уравнение доли падающего PAR, который является лучом (f_b) в инструкции пользования прибором не представлено, для расчета используется формула (5) из статьи разработчиков прибора:

$$f_b = 1,395 + r(-14,43 + r(48,57 + r(-59,024 + 24,835))) \quad (5)$$

В дальнейшем полученные значения были добавлены в пространственную базу данных.

Помимо измерений при помощи прибора AccuPAR LP-80, производились работы с использованием широкоугольных камер с целью получения полусферических фотографий. Полевая съемка производилась по тем же тестовым участкам что и инструментальные измерения с использованием камеры Garmin Virb 360 и объективом типа рыбий глаз для мобильных устройств. При выполнении съемки камера или объектив должны быть направлены вертикально вверх и располагаться как можно ближе к поверхности грунта, высота такой съемки должна быть не более 20–30 см, от этого зависит охват участка и рассчитываемое значение LAI. Также, важно отсутствие бликов во время съемки, их наличие делает невозможной дальнейшую обработку, поэтому необходимо тщательно выбрать время съемки (как правило, утреннее, либо вечернее). На изображениях должны отсутствовать любые антропогенные объекты, так как они могут повлиять на значения LAI.

Обработка проводилась в ПО ImageJ, на основе использования голубого канала с дальнейшим экспертным выделением пороговых значений для разбивки содержания на черные и белые пиксели, листовую поверхность и открытый небосвод. Далее при помощи скриптов в GNU Octave проводилось вычисление LAI, которое учитывало особенности объектива различных фотографирующих приборов [8].

После выполнения квантования и расчета индекса листовой поверхности, по полученным значениям LAI вычисляется среднее значение по территории площадки 20 x 20 или 50 x 50 метров и пределах одного пикселя съемочной системы спутника Sentinel2 MSI 10 x 10 метров. Осреднение значений индекса листовой поверхности выполняется для сопоставления с индексом NDVI, так как в один пиксель снимка попадает несколько значений LAI.

Метод вычисления LAI по данным **дистанционного зондирования** основывался на его прямой связи с вегетационным нормализованным относительным индексом растительности (NDVI). Известно, что нормализованный вегетационный индекс NDVI связан с величиной LAI положительной связью (которая ослабевает при высоких LAI), кроме того, NDVI может быть рассчитан по большинству многозональных космических снимков. Также наличие связи между индексами позволит понять возможности масштабирования полевых значений LAI через NDVI от точечных измерений к характеристикам территории, охваченной космическим снимком. Так, сопоставление индексов на основе ДДЗ, полученных в лесном массиве Окутама, позволило получить уравнение связи между ними [9]:

$$LAI = 0,57 * \exp(2,33 * NDVI) (R^2 = 0,46). \quad (8)$$

Полученное уравнение показывает наличие экспоненциальной связи между двумя индексами. Экспоненциальные отношения индексов NDVI и LAI, были выведены американскими учеными в виде другой формуле: $LAI = (1 + NDVI)/(1 - NDVI) * NDVI^{0.5}$ [8]. При расчетах корреляции между индексами NDVI и LAI на примере растительности на водоразделе реки Шилин во Внутренней Монголии и Китае, за два года измерений [10], было найдено два типа отношений между данными:

$$\text{линейный тип } (LAI = -0,0879 + 1,424 \cdot NDVI) \quad (10)$$

$$\text{экспоненциальный } (LAI = 0,128 \cdot \exp(NDVI/0,311)) \quad (11)$$

Индекс NDVI при использовании для оценки индекса LAI, имеет ограничение при сопоставлении в более высоких значениях LAI, в этом случае NDVI не может использоваться для обнаружения каких-либо различий в LAI. Поэтому кривая экспоненциальной регрессии часто используется для исследования взаимосвязи между этими двумя параметрами [11].

Нами на основе полевых данных рассчитывались формулы связи между значениями LAI измеренными в полевых условиях и NDVI, полученных по космическим снимкам. Для этого были выбраны космические снимки Sentinel 2 MSI с пространственным разрешением 10 м и уровнем обработки 1C (без атмосферной коррекции). Снимки выбирались на даты проведения полевых работ или максимально близкие к ним. Для всех снимков (4 на территорию Кольского полуострова и 4 на Центральную Якутию), последовательно были выполнены атмосферная коррекция и расчет индекса NDVI. Далее результаты обработки снимков совмещались с полевыми материалами и на основе статистических выборок в пределах тестовых площадок (50 x 50 м.) усреднялись. Полученные данные, легли в основу расчетных таблиц для построения линий тренда, по которым можно производился анализ взаимосвязей между величинами. При построении линии тренда по сформированным данным была обнаружена экспоненциальная связь, как для значений LAI, померенных AccuPAR, так и для значений LAI, полученных по полусферическим фотографиям с объективом типа рыбий глаз. В целях получения статистически-однородных данных было принято решение по работе с выборками, основанными на разделении на типы растительности с различными, специфическими особенностями [12]. Было получено несколько выборок по нормальному стандартному отклонению, по качеству фотографий для измерения LAI, по преобладающему виду растительности и по состоянию растительности. Графики строились в программе Graph, в этой же програм-

ме на основе линий трендов выводились формулы связи индексов, а также коэффициент детерминации. По всем полученным формулам был рассчитан индекс листовой поверхности и сопоставлен со значениями полученными другими формулами.

При визуальном сравнении построенных кривых по настоящему исследованию и по формулам из статей выявлено, что графики, основывающиеся на полевых данных более приближены к оси *x* и сильнее, отдаляются от оси *y*. На кривые сильное влияние оказывает начальный набор данных, который имеет свои региональные особенности.

По найденным формулам были рассчитаны значения LAI, и сопоставлены со значениями, вычисленными по полевым данным. В результате значения, вычисленные по фотографиям, значительно ниже и слабо, коррелируют как со значениями NDVI, так и со значениями LAI, рассчитанными по формулам. Слабая корреляция указывает на недостаток данных для анализа, а также необходимость выполнять отбор данных при анализе. При выполнении отбора данных по статистически достоверным данным корреляция между значениями слабо возрастает, однако при отборе по видовому составу и по качеству фотографий она остается слабой. При этом состояние растительности не оказывает значительного влияния на связь между индексами.

Стоит отметить, что, если выполнять корреляцию по выборке значений, выполненной по одному критерию отбора данных, то существенных изменений в тесноте связи между значениями не произойдет. Использование нескольких критериев отбора данных повышает корреляцию между значениями. Выборка данных по статистически достоверным значениям и по качеству фотографии значительно повышает тесноту связи, делая ее почти высокой (0,701). Выборка данных по видовому составу и по качеству фотографий, также повышает тесноту связи, но в этом случае, она является заметной (0,55).

Заключение. На основании анализа корреляции вегетационного индекса NDVI, рассчитанного по космическим снимкам и индекса листовой поверхности LAI, полученного инструментальными измерениями, можно сделать вывод, о наличии высокой корреляции, при условии выполнения качественной выборки данных инструментальных измерений LAI.

Работа выполнена при поддержке Проекта РФФИ «Методология оценки состояния и динамики наземных экосистем Арктики в условиях антропогенного воздействия по данным ДЗЗ» (18-05-60221, номер ЦИТИС АААА-А18-118120790054-2).

Список литературы.

1. Шульгин И.А. Растения и солнце. – Л.: Гидрометеиздат, 1973.-251 с.
2. Уткин А.И. Биологическая продуктивность лесов (методы изучения и результаты), в кн.: Итоги науки и техники. Сер. Лесоведение и лесоводство, т. 1, М., 1975.
3. Быков Б.А. Геоботаника. Алма-Ата, 1978. 288 с.
4. Полевая геоботаника. М.; Л., 1976. Т. 5. 320 с.
5. Бондаренко В.В., Кормилицина О.В., Кооленд Д. Определение индекса листовой поверхности на основе цифровых изображений кроны и его использование для оценки категорий состояния деревьев. Вестник Моск. гос. ун-та леса. Т.20, № 1, 2016, с.94–98.
6. Грабовский В. И., Зукерт Н.В., Корзухин М.Д. Оценка индекса листовой поверхности для территории России по данным государственного лесного реестра. Лесоведение. 2015. № 4. С. 255–25.
7. Feng W. et al. "An optimized non linear vegetation index for estimating leaf area index in winter wheat" // Precision Agriculture (2019) 20:1157–1176.
8. Rees G. "Calculating LAI from a fisheye photograph" // 2018.
9. Saito K. et al. "Estimates of LAI for forest management in Okutama" // Paper presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5–9 November 2001, Singapore. Copyright (c) 2001 Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore; Singapore Institute of Surveyors and Valuers (SISV); Asian Association on Remote Sensing (AARS).
10. Fan L. et al "Investigating the relationship between NDVI and LAI in semiarid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurement" // Theor. Appl. Climatol. (2009) 95: 151–15.
11. Lu L., Li X., Ma M.G., Che T., Huang C.L., Veroustraete F., Dong Q.H., Ceulemans R., Bogaert J. (2004) Investigating relationship between Landsat ETM_p data and LAI in a semiarid grassland of Northwest China. Int Geosci Remote Sens Symp (IGARSS) 6: 3622–3625.
12. Stenberg P., Rautiainen M., Manninen T., Voipio P. & Smolander H. 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. 2004. Silva Fennica 38(1): 3–14.

LEAF AREA INDEX: METHODS OF FIELD INSTRUMENTAL MEASUREMENTS AND USING REMOTE SENSING MATERIALS

E.I. Golubeva, M.V. Zimin, O. V. Tutubalina, Y.I. Timokhina, A.S. Azarova

M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow

egolubeva@gmail.com, ziminmv@mail.ru, olgatut@mail.ru, timokhina2701@gmail.com, ale4ka.azar2@gmail.com

Abstract. The article discusses the methods of field instrumental measurements and the use of remote sensing materials for measuring the leaf area index of vegetation cover, their capabilities and limitations, verified during research in northern forests. The leaf area index LAI is the ratio of the area of leaves (one of their sides) and/or needles of all plants to the soil area occupied by a given ecosystem. LAI is an important parameter that reflects material and energy metabolism in the processes of photosynthesis, respiration, the cycle of carbon and plant nutrients in ecosystems, predicting their growth and productivity. LAI is a key variable functionally related to phytomass production, water cycle and nutrient cycle under specific microclimatic conditions. A reliable estimate of LAI is one of great importance for monitoring and analyzing various biophysical processes in ecosystems; it is a complex indicator that quantitatively reflects the closeness of the tree canopy, the projective cover of shrub, grass, moss-lichen layers of natural ecosystems or crops of agrocenoses. The LAI is used in environmental studies aimed at studying the state of the vegetation cover for solving scientific and applied problems. The global LAI is 4.5, its values depend both on natural conditions, mainly hydrothermal, and on the characteristics and degree of anthropogenic impact. The theoretical foundations of studying LAI and various methods of its measurement are considered. In field studies, LAI is determined either with the help of special devices or in a destructive way: the assimilation area of leaves is determined by the method of "incisions" of a fixed area, and the accumulation of dry matter – by the gravimetric method, followed by drying of the vegetative mass of plants to an air-dry or absolutely dry state... The use of remote sensing data is very promising to determine LAI of various types of vegetation without removing phytomass and to assess their condition.

Keywords: leaf area index, remote sensing, phytomass, ecological conditions.

References

1. *Shulgin I.A.* Rasteniya i solntse. [Plants and sun] – L.:Gidrometeoizdat, 1973. – P 251. (In Russian)
2. *Utkin A. I.* Biologicheskaya produktivnost' lesov (metody izucheniya i rezul'taty) [Biological productivity of forests (research methods and results)], v kn.: Itogi nauki i tekhniki. Ser. Lesovedeniye i lesovodstvo [in the book: Results of science and technology. Ser. Forestry and forestry], M., 1975. (In Russian)
3. *Bykov B.A.* Geobotanika [Geobotany]. Alma-Ata, 1978. P 288. (In Russian)
4. *Polevaya geobotanika* [Field geobotany]. M.; L., vol.5, 1976. P 320. (In Russian)
5. *Bondarenko V.V., Kormilitsina O.V., Koolend D.* Opredeleniye indeksa listovoy poverkhnosti na osnove tsifrovyykh izobrazheniy krony i yego ispol'zovaniye dlya otsenki kategoriy sostoyaniya derev'yev [Determination of the leaf area index based on digital images of the crown and its use to assess the categories of tree condition]. Vestnik Mosk.gos. un-ta lesa [Moscow State Bulletin un-that forest]. vol.20, № 1, 2016, P.94–98. (In Russian)
6. *Grabovskiy V.I., Zukert N.V., Korzukhin M.D.* Otsenka indeksa listovoy poverkhnosti dlya territorii Rossii po dannym gosudarstvennogo lesnogo reyestra [Estimation of the leaf surface index for the territory of Russia according to the data of the state forest register]. Lesovedeniye. 2015. № 4. P. 255–25 (In Russian)
7. *Feng W. et al.* "An optimized non linear vegetation index for estimating leaf area index in winter wheat" // Precision Agriculture (2019) 20:1157–1176
8. *Rees G.* "Calculating LAI from a fisheye photograph" // 2018
9. *Saito K. et al.* "Estimates of LAI for forest management in Okutama" // Paper presented at the 22nd Asian Conference on Remote Sensing, 5–9 November 2001, Singapore. Copyright (c) 2001 Centre for Remote Imaging, Sensing and Processing (CRISP), National University of Singapore; Singapore Institute of Surveyors and Valuers (SISV); Asian Association on Remote Sensing (AARS)
10. *Fan L. et al.* "Investigating the relationship between NDVI and LAI in semiarid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurement" / Theor. Appl. Climatol. (2009) 95: 151–15
11. *Lu L., Li X., Ma M.G., Che T., Huang C.L., Veroustraete F., Dong Q.H., Ceulemans R., Bogaert J.* (2004) Investigating relationship between Landsat ETM_p data and LAI in a semiarid grassland of Northwest China. Int Geosci Remote Sens Symp (IGARSS) 6: 3622–3625
12. *Stenberg P., Rautiainen M., Manninen T., Voipio P. & Smolander H.* 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands. 2004. Silva Fennica 38(1): 3–14.