

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСА ЛИСТОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ КРОНЫ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ КАТЕГОРИЙ СОСТОЯНИЯ ДЕРЕВЬЕВ

В.В. БОНДАРЕНКО, доц. МГУЛ, канд. биол. наук⁽¹⁾,
О.В. КОРМИЛИЦЫНА, доц. МГУЛ, канд. с.-х. наук⁽¹⁾,
Д. КООЛЕН, проф. Вагенинген Университета (Нидерланды)⁽²⁾

caf-soil@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса»
141005, Московская обл., г. Мытищи-5, ул. 1-я Институтская, д. 1

⁽²⁾ Wageningen UR Corporate headquarters, Droevendaalsesteeg 4, 6708 PB Wageningen (The Netherlands)

Определены индексы листовой поверхности (LAI) деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata*) в условиях антропогенного воздействия г. Москвы с использованием специализированного программного обеспечения для обработки цифровых изображений кроны. Этот количественный показатель позволяет установить динамику состояния отдельных деревьев и насаждения в целом. Его определение основано на расчете значений следующих фракций: листовая поверхность («Leaves»), ствол и ветви («Stem»), просветы в кроне («Sky»). Функциональная зависимость между индексом листовой поверхности (LAI) и указанными фракциями позволяет проводить оценку изменения данного показателя на разных стадиях вегетационного периода. В начальной стадии вегетационного периода значения индексов листовой поверхности (LAI) варьируют в пределах 2,16–3,99, что характерно для сильно ослабленных деревьев и деревьев без признаков ослабления соответственно. В дальнейшем происходит развитие листовой поверхности до максимальных значений 2,59–4,48 соответствующих категорий состояния. На завершающей стадии периода вегетации происходит снижение значений данного показателя у сильно ослабленных деревьев до 1,77, а у деревьев без признаков ослабления – до 3,49. Определены взаимосвязи между значениями индекса листовой поверхности (LAI), категориями состояния деревьев, запасом влаги в почве корнеобитаемой зоны, количеством осадков. Установлено, что в начальной стадии вегетационного периода на участках с сильно ослабленными деревьями запас почвенной влаги в слое 1 м в 1,7–2,9 раза меньше оптимальных значений, наблюдаемых на участках с деревьями без признаков ослабления. Показана возможность сопоставления категорий состояния деревьев (визуальная оценка) и значений индекса листовой поверхности (LAI).

Ключевые слова: индекс листовой поверхности, оценка параметров кроны деревьев, анализ цифровых изображений кроны, запас влаги в почве, осадки, индексы листовой поверхности липы мелколистной, категории состояния деревьев.

Исследование состояния зеленых насаждений и отдельных деревьев является важной частью мониторинга состояния городской среды. Учитывая ведущую роль зеленых насаждений в поддержании благоприятной экологической обстановки, особенно в условиях интенсивного антропогенного воздействия, необходимо использовать такие количественные показатели оценки, которые позволят установить динамику состояния как отдельных деревьев, так и насаждения в целом.

Одним из таких показателей является индекс листовой поверхности (Leaf Area Index, LAI), определяемый как отношение общей площади «односторонней» («освещенной») листовой поверхности к единице площади горизонтальной проекции кроны на

поверхность земли [1]. Данный показатель используется для оценки таких важнейших процессов, как фотосинтез, эвапотранспирация, транспирация, распределение и перехват осадков, потоки углерода [2]. В условиях долгосрочного мониторинга индекс листовой поверхности позволяет определять изменения продуктивности растений и влияние климатических и эдафических факторов на их рост и развитие, а также выступать в качестве индикатора состояния растений, находящихся под воздействием стрессовых антропогенных факторов [3, 4].

В ходе наших исследований проводилось определение индекса листовой поверхности 139 деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata*), находящихся в условиях антропогенного воздействия г. Москвы (ул. Ха-

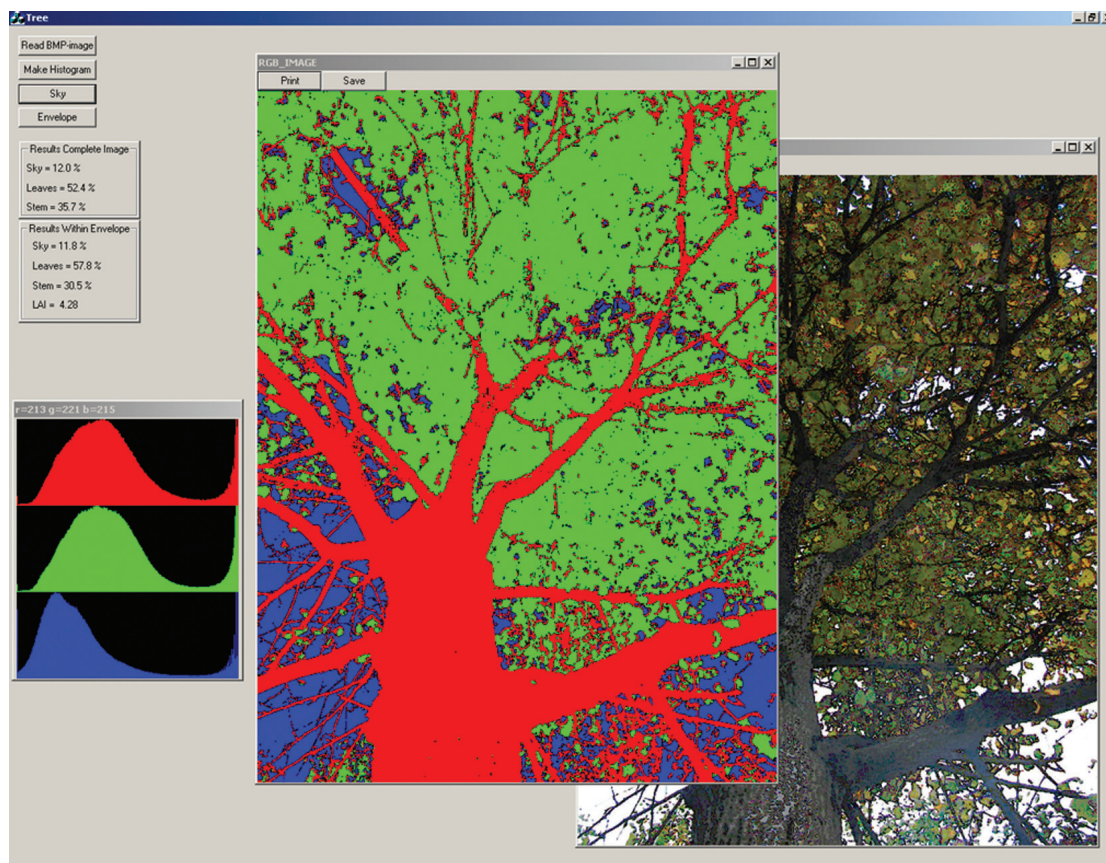


Рис. 1. Фрагмент результатов комплексного анализа цифровых изображений крон деревьев для определения индекса листовой поверхности (LAI)

Fig. 1. A fragment of the results of a complete image for LAI estimation

баровская, проспект Академика Сахарова, ул. Стромынка). Определение индекса листовой поверхности (LAI) осуществлялось на основе цифровой обработки изображений крон деревьев, полученных с помощью цифровой камеры, и проводилось в несколько этапов за период 2004–2014 гг. [5, 6].

Для определения объемной влажности почвы использовался почвенный влагомер (Soil moisture meter HH2, Eijkelkamp). Определение этого показателя проводилось в пятикратной повторности, для каждого слоя мощностью 10 см до глубины 1 м, с последующим определением запасов почвенной влаги в корнеобитаемой зоне деревьев.

На первом этапе, для повышения точности результатов оценки, были получены по четыре изображения разных сторон кроны для каждого дерева липы мелколистной (*Tilia cordata*) в течение разных стадий вегетационного периода. Это дало возможность полу-

чить значительный объем исходных данных (3336 цифровых изображений).

На втором этапе проводилась обработка и анализ цифровых изображений с помощью специализированного программного обеспечения, разработанного Я. Мюлеманом, Вагенинген Университет, г. Вагенинген, Нидерланды (J. Meuleman, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands). Значения индексов листовой поверхности (LAI) определялись на основе комплексного анализа цифрового изображения кроны дерева и установления значений фракций, занятых листовой поверхностью («Leaves»), стволом и ветвями («Stem»), просветами в кроне («Sky»), а также использования функциональной зависимости между индексом листовой поверхности (LAI) и указанными фракциями [7]. Фрагмент результатов комплексного анализа цифровых изображений крон деревьев для определения индекса листовой поверхности (LAI) представлен на рис. 1.

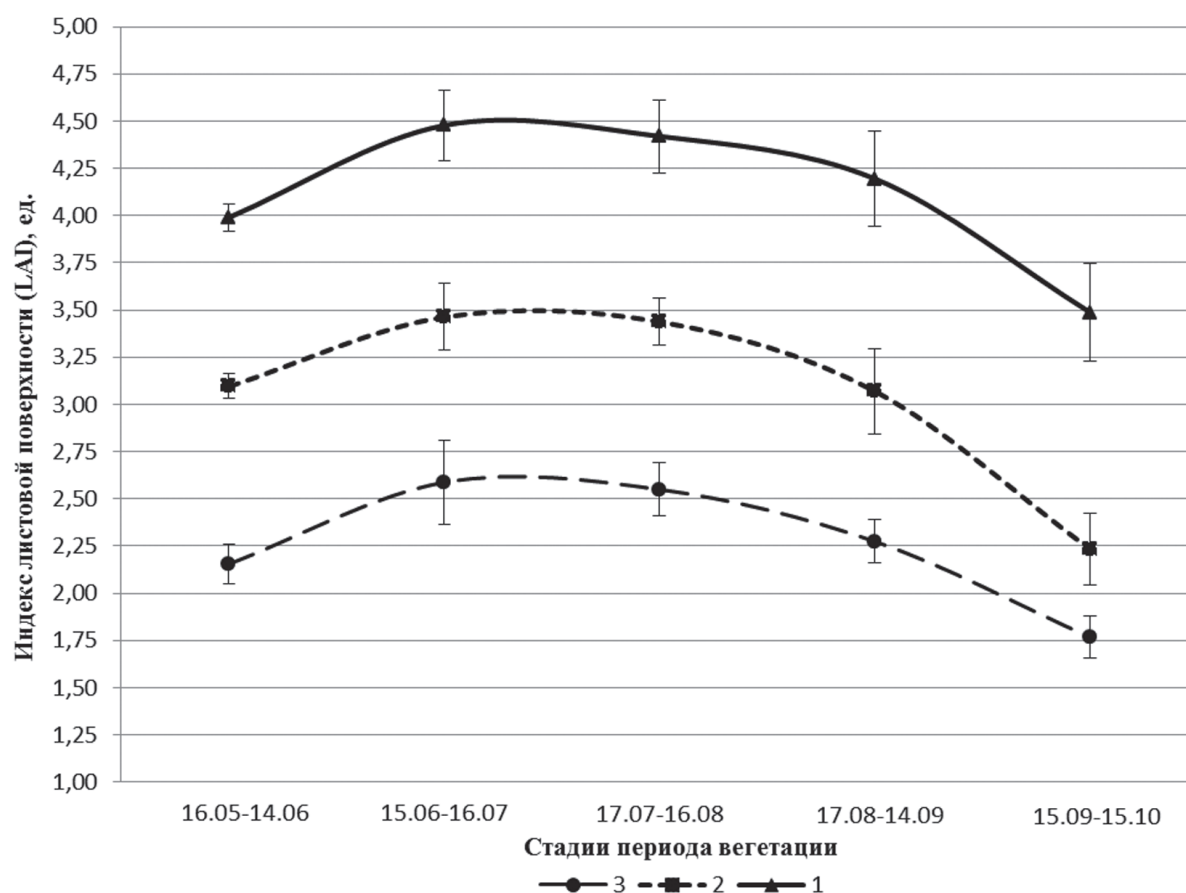


Рис. 2. Изменение индекса листовой поверхности (LAI) в период вегетации деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata*) разных категорий состояния: 1 – без признаков ослабления; 2 – ослабленные; 3 – сильно ослабленные

Fig. 2. The change of the leaf area index (LAI) during the growing season of Linden trees (*Tilia cordata*) in different status categories: 1 – no signs of weakening; 2 – weak; 3 – greatly weakened

В результате исследований удалось выяснить, что изменение индексов листовой поверхности в течение разных стадий вегетационного периода связано с категорией состояния деревьев (рис. 2) и зависит, в основном, от запаса почвенной влаги в корнеобитаемой зоне, особенно на начальной стадии периода вегетации, объема корнеобитаемой зоны (посадочного места), распределения осадков, а также качества почвенно-грунтовых условий.

Значения индексов листовой поверхности (LAI) с середины мая до середины июня (16.05–14.06) варьируют в пределах 2,16–3,99. Минимальные и максимальные значения этого показателя на данной стадии вегетационного периода соответствуют разным категориям состояния деревьев липы мелколистной (*Tilia cordata*), от сильно ос-

лабленных до деревьев без признаков ослабления соответственно. На данной стадии вегетационного периода наибольшую роль играет запас почвенной влаги в корнеобитаемой зоне, а также количество осадков и распределение их в почве [8].

По нашим данным, на участках с сильно ослабленными деревьями запас почвенной влаги в слое 1 м составлял 104–164 мм, что в 1,7–2,9 раза меньше оптимальных значений (280–300 мм), наблюдаемых на участках с деревьями без признаков ослабления. Запас почвенной влаги на участках с ослабленными деревьями составлял 221–185 мм. Количество осадков в этот период составляло в среднем 49–62 мм. Большое влияние на перехват значительной части влаги оказывали травянистые растения (газон), препятствующие проникновению влаги в корнеобитаемую

**Взаимосвязь категорий состояния деревьев (визуальная оценка)
и значений индекса листовой поверхности (LAI)**

Relationship of the conditions of trees (visual estimate), and the values of leaf area index (LAI)

Категории состояния	Значения индекса листовой поверхности (LAI)
Без признаков ослабления	3,6–4,5 и > 4,5 (до 6,0*)
Ослабленные	3,5–2,9
сильно ослабленные	2,8–4
Усыхающие	1,3–0,6
сухой текущий год	< 0,6
сухой прошлых лет	

* – для значений LAI > 6,0 погрешность определения увеличивается

зону деревьев. При этом объемная влажность почвы на участках с сильно ослабленными деревьями составляла 10,4–16,4 %, что ниже критических значений влажности исследуемых почв (24 %), а в ряде случаев приближалась к влажности устойчивого завядания (10,5 %). На участках с ослабленными деревьями объемная влажность почвы составляла 18,5–22,1 %, в то время как на участках с деревьями без признаков ослабления она была выше критических значений на 4–6 %.

Дальнейшее развитие листовой поверхности до максимальных значений 2,59–4,48 происходит с середины июня до середины июля (15.06–16.07), при этом количество осадков увеличивается в среднем до 75–83 мм, а в отдельные годы до 190–244 мм, что отражается на влажности почвы корнеобитаемой зоны, которая увеличивалась на 10–17 %, по сравнению с предыдущей стадией вегетационного периода.

В дальнейшем происходит стабилизация значений индекса листовой поверхности и постепенное снижение его значений, связанное с уменьшением площади листовой поверхности за счет регуляторных механизмов растений, уменьшающих транспирирующую поверхность для сохранения влаги и восстановления температурного баланса.

На завершающей стадии периода вегетации (15.09–15.10) происходит снижение значений индекса листовой поверхности (LAI). При этом темпы его снижения у деревьев разных категорий отличаются. Индекс листовой поверхности (LAI) у сильно ослабленных и ослабленных деревьев снижается до значе-

ний $1,77 \pm 0,26$ и $2,23 \pm 0,19$ соответственно, т. е. на 32–37 % меньше по сравнению с максимальными значениями для этой категории состояния. У деревьев без признаков ослабления снижение индекса листовой поверхности происходит в среднем на 22 % до значения $3,49 \pm 0,11$. Также не следует забывать об эстетической функции (декоративности), которая у деревьев без признаков ослабления сохраняется практически до окончания вегетационного периода, в то время как у деревьев других категорий она резко снижается.

По результатам ряда исследований [9–11], индекс листовой поверхности дерева (LAI), рост и развитие которого происходит в условиях незначительного стресса или его отсутствия, в среднем составляет 3,5–4,5.

При неблагоприятных факторах окружающей среды, в том числе и в условиях города, в большинстве случаев происходит уменьшение индекса листовой поверхности, кроны изреживаются, процесс дефолиации усиливается, увеличивается доля сухих ветвей.

Таким образом, индекс листовой поверхности может быть использован при оценке состояния деревьев [12] и применяться наряду с общепринятой шкалой визуальной оценки категорий состояния деревьев (таблица).

Преимущество индекса листовой поверхности (LAI) заключается в том, что с его помощью можно осуществлять контроль за состоянием деревьев в течение всего вегетационного периода, оценивать влияние естественных и антропогенных факторов на зеле-

ные насаждения города и использовать для расчетов показателей водного баланса урбанизированных территорий.

Библиографический список/ References

1. Zheng G., Moskal L.M. Retrieving Leaf Area Index (LAI) Using Remote Sensing: Theories, Methods and Sensors. *Sensors (Basel)*. 9(4). 2009. pp. 2719-2745.
2. Anten N.P.R. Optimal Photosynthetic Characteristics of Individual Plants in Vegetation Stands and Implications for Species Coexistence. *Annals of Botany* 95. 2005. pp. 495-506.
3. Jensen R.R. Estimating Urban Leaf Area Index (LAI) of Individual Trees with Hyperspectral Data. R.R. Jensen, P.J. Hardin, A.J. Hardin. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. Vol. 78. No. 5. 2012. pp. 495-504.
4. Мартыненко, О.В. Возрастная динамика продуктивности сосновых насаждений в зависимости от почвенных условий / О.В. Мартыненко, Д.Г. Щепашенко, В.Н. Карминов, М.В. Щепашенко // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2010. – № 7. – С. 62–69.
Martynenko O.V., Shhepashhenko D.G., Karminov V.N., Shhepashhenko M.V. *Vozrastnaya dinamika produktivnosti sosnykh nasazhdeniy v zavisimosti ot pochvennykh usloviy* [Dynamics of pine forest productivity with age depend on soil properties]. Moscow state forest university bulletin – Lesnoy vestnik. 2010. № 7. pp. 62-69.
5. Pratt W.K. *Digital Image Processing*. W.K. Pratt. Wiley, 2007. 807 p.
6. Manninen T., Korhonen L., Voipio P., Lahtinen P., Stenberg P. Estimation of boreal forest LAI in winter conditions: Test of a new method using wide optics airborne images. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE International. 2010. pp. 2652-2655.
7. Bakker J.W., J.J.H van den Akker, Cornelissen P. Oorzaak en preventie van schade aan wegen door vochtonttrekking door bomen. Rapport 318. Wageningen: DLO-Staring Centrum. 1995. 103 p.
8. Кормилицына, О.В. Некоторые аспекты расчета водного баланса урбанизированных территорий / О.В. Кормилицына, В.В. Бондаренко // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2008. – № 1. – С. 11–15.
Kormilicyna O.V., Bondarenko V.V. *Nekotorye aspekty rascheta vodnogo balansa urbanizirovannykh territoriy* [Some Aspects of Water Balance Estimation in Urbanized Territories]. Bulletin of Higher Educational Institution. Lesnoy Zhurnal, 2008. № 1. pp. 11-15.
9. Cittadini E.D., H. van Keulen, N. de Ridder, Vallis M., Rodriguez M., Peri P. Effect of fruit-to-leaf area ratio on fruit quality and vegetative growth of 'Bing' sweetcherry trees at optimal leaf area index. *Acta Horticulturae*. Vol. 795. 2008. pp. 677-680.
10. Yu Z., Mingbin H., Jinjiao L. Spatial distributions of optimal plant coverage for the dominant tree and shrub species along a precipitation gradient on the central Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*. Volume 206. 2015. pp. 69-84.
11. Уиттекер, Р. Сообщества и экосистемы / Р. Уиттекер. – М.: Прогресс, 1980. – 326 с.
Whittaker R.H. *Soobshchestva i ekosistemy* [Communities and Ecosystems]. Moscow: Progress, 1980. 326 p.
12. Постановление Правительства Москвы от 10 сентября 2002 г. № 743-ПП. Об утверждении правил создания, содержания и охраны зеленых насаждений города Москвы. – М., 2002. – 123 с.
Postanovlenie Pravitel'stva Moskvy ot 10 sent. 2002 g. № 743-PP. Ob utverzhdenii pravil sozdaniya, soderzhaniya i ohrany zelenykh nasazhdeniy goroda Moskvy [About the approval of rules of creation, the maintenance and protection of green plantings of the city of Moscow]. Moscow, 2002. 123 p.

ESTIMATION OF LEAF AREA INDEX USING THE ANALYSIS OF DIGITAL IMAGES OF THE CROWN AND ITS USE FOR THE ESTIMATION OF TREE STATE CATEGORIES

Bondarenko V.V., Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Biol.)⁽¹⁾; **Kormilicyna O.V.**, Assoc. Prof. MSFU, Ph.D. (Agric.)⁽¹⁾; **Koolen A.J.**, Prof. Wageningen University (The Netherlands), Ph.D.⁽²⁾

caf-soil@mgul.ac.ru

⁽¹⁾ Moscow State Forest University (MSFU), 1-st Institut'skaya st., 1, 141005, Mytishchi, Moscow reg., Russia

⁽²⁾ Wageningen UR Corporate headquarters, Droevendaalsesteeg 4, 6708 PB Wageningen (The Netherlands)

The Leaf Area Index (LAI) of linden trees (*Tilia cordata*) in the conditions of the anthropogenic influence of Moscow is defined using the specialized software for digital images processing of the krone. This quantitative index allows to estimate the dynamics of the state of a single tree and trees as a whole. Its estimation is based on the calculation of values of the following fractions: leaf surface («Leaves»), a trunk and branches («Stem»), gleams in the krone («Sky»). The functional dependence between Leaf Area Index (LAI) and the specified fractions allows to estimate the change of this indicator at different stages of the vegetative period. On an initial stage of the vegetative period the values of Leaf Area Index (LAI) vary within 2,16-3,99, which is characteristic of strongly weakened trees and trees without weakening signs respectively. Further there was a development of a leaf surface to the maximum values of 2,59-4,48 corresponding to the categories of state. On the late stage of the period of vegetation there is a decrease in values of this indicator among strongly weakened trees to 1,77 and among trees without weakening signs to 3,49. Interrelations between Leaf Area Index (LAI), categories of state of trees, water content in the soil of a root zone, the amount of precipitation are defined. It is established that in an initial stage of the vegetative period the reserve of soil moisture in a layer of 1 m on sites with strongly weakened trees is 1,7-2,9 times less than the optimum values observed on the sites with the trees without weakening signs. Possibility of comparison of categories of state of trees (a visual assessment) and values of Leaf Area Index (LAI) is shown.

Keywords: leaf area index (LAI), estimation of canopy parameters, digital image analysis, soil water content, precipitation, state of trees.