

О ВОЗМОЖНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ УСРЕДНЕННОЙ ВЕЛИЧИНЫ НАДЗЕМНОЙ БИОМАССЫ ПО ВЕГЕТАЦИОННОМУ ИНДЕКСУ ПРИ НЕКОТОРОЙ ВЫСОТЕ ДЕРЕВЬЕВ**Т. И. Сулейманов, Х. Г. Асадов, Т. М. Тахмазов**Национальное аэрокосмическое агентство Азербайджана
Азербайджанская Республика, AZ 1115, г. Баку, ул. Ахундова Сулеймана Сани, 1

Статья посвящена модельному анализу изменения надземной массы деревьев в лесу в расчете на одно дерево при изменении высоты деревьев и нормализованного разностного вегетационного индекса. Показано, что надземная масса деревьев в среднем растет с увеличением значения индекса NDVI. Однако при этом существует определенная высота деревьев, при которой надземная масса деревьев не изменяется по NDVI. Дано модельное обоснование этого явления, названного эффектом «стабилизации массы деревьев определенной высоты при увеличении вегетационного индекса».

Ключевые слова: вегетационный индекс, надземная масса, стабилизация, высота деревьев, чувствительность.

*Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 1, P. 13–16***THE POSSIBILITY OF STABILISATION OF THE AVERAGE VALUE OF ABOVE-GROUND BIOMASS BY VEGETATION INDEX AT SOME TREE HEIGHT****T. I. Suleymanov, H. G. Asadov, T. M. Takhmazov**National Aerospace Agency of Azerbaijan
1, Akhundov Suleiman Sani str., Baku, AZ 1115, Azerbaijan Republic

The article is devoted to the model analysis of changes in the above-ground mass of trees in the forest per one tree under changes in tree height and normalised difference vegetation index. It is shown that the above-ground mass of trees on average rises with increasing NDVI index value. However, there is a certain height of trees at which the above-ground mass of trees does not change according to NDVI. A model explanation of this phenomenon, called the effect of “stabilisation of tree mass of a certain height with increasing vegetation index”, is given.

Keywords: vegetation index, above-ground mass, stabilisation, tree height, sensitivity.

ВВЕДЕНИЕ

Как отмечается в работе [1], дистанционное зондирование является революционным направлением в изучении лесов. Средства и методы дистанционного зондирования позволяют выработать новые инструменты для проведения измерений различных показателей деревьев в лесу. Согласно [1], создание глобальной базы данных для большого множества деревьев, включающей информацию о показателях этих деревьев позволяет разрабатывать обобщенные модели для оценки и предсказания таких показателей как диаметр и надземная биомасса. При этом дистанционно измеренные высота дерева и диаметр кроны позволяют, используя эти модели, предсказывать количество надземной биомассы и определить диаметр ствола дерева.

Согласно [2], наличие надежных математических моделей совместно с данными, извлекаемыми со спутниковых снимков, позволяет оценить глобальный углеродный запас на планете и составлять соответствующие карты расположения биомассы. Как отмечается в работе [3], дистанционные измерения также важны

для обеспечения надежного и поддерживаемого развития экосистемы городской среды. Средства и методы дистанционного зондирования вполне пригодны для проведения соответствующих измерений в лесопарковых участках, расположенных в пределах урбанизированных зон. Данные о количестве надземной биомассы, полученные от спутниковых средств должны быть откалиброваны и пройти валидацию. С этой целью широко могут быть использованы лазерные сканеры, установленные на БПЛА. Подобная мысль поддержана в работе [4], согласно которой все результаты работ, полученные по таким спутниковым исследовательским программам, как BIOMASS, GEDI, NISAR, ALOS-4 должны быть точным образом откалиброваны и валидифицированы по части определения количества надземной биомассы. Согласно [3], были разработаны различные методы для оценки надземной биомассы на больших растительных участках с различной точностью. Традиционные методы, практикуемые в лесной инвентаризации включают измерение диаметра «на высоте груди» дерева с совместным использованием моделей масштабирования (ASM) [3].

Согласно [5], точная оценка надземной биомассы важна для изучения глобального углеродного цикла и может быть реализована с использованием спектральной и структурной информации относящейся кроне деревьев, получаемой методами дистанционного зондирования. В последние десятилетия быстрое развитие технологий дистанционного зондирования привело к разработке различных методов по определению количества надземной биомассы по спутниковым изображениям. Были построены регрессионные уравнения, связывающие полевые оценки надземной биомассы и вегетационные индексы, полученные методами дистанционного зондирования, такие как NDVI [2; 3; 6; 7]. Вместе с тем, точность таких оценок не лучше 10 %, что связано с неопределенностью, вызванной невысокой точностью дистанционных методов измерения. В работе [8] отмечается, что одним из важных показателей древостоя является количество стволов, имеющихся в древостое, в расчете на один гектар.

Учитывая результаты, полученные различными исследователями в области определения количества надземной биомассы в расчете на один га (AGB) в зависимости от высоты деревьев и индекса NDVI, а также количества стволов (SN), также приходящих на один га площади древостоя в зависимости от NDVI, нами была поставлена задача определения зависимости AGB в расчете на одно дерево от NDVI и высоты деревьев (TH). Согласно [8], использование метода Анализа Линейной Смеси Спектров (LSMA) позволило более точно определить количество стволов в древостое, в расчете на один гектар, на восьми типичных лесных участках Германии, с использованием радиометрически скорректированных снимков Landsat-5 TM. При этом учитывались спектры отражения таких компонентов, как почва, подстилка, растительность и кора деревьев, а также влияние тени. Регрессионное уравнение зависимости SN от NDVI имеет следующий вид [8]

$$+N = \exp(8,5456 \times \text{NDVI} - 0,3268). \quad (1)$$

С учетом вышеизложенных результатов, полученных в работах [5] и [8] задача исследования формулируется следующим образом: (1) Следует определить величину надземной биомассы, приходящей в среднем на одного дерева; (2) определить среднюю высоту деревьев, при котором чувствительность средней величины надземной биомассы к изменениям вегетационного индекса равна нулю.

$$S_m = \frac{dm_{\text{cp}}}{d(\text{NDVI})} = \frac{a_1 \text{TH}^{b_1 \cdot \text{NDVI}} \cdot (\ln \text{TH}) \cdot b_1 \times (\exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2)) - c_1 \cdot \exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2) \times a_1 \text{TH}^{b_1 \cdot \text{NDVI}}}{[\exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2)]^2}. \quad (5)$$

Согласно первой выше обозначенной задаче следует вычислить надземную биомассу одного дерева m_{cp} :

$$m_{\text{cp}} = \frac{\text{AGB} \left(\frac{\text{T}}{\text{га}} \right)}{\text{SN}(\text{га})}. \quad (2)$$

Согласно второй задаче следует вычислить чувствительность m_{cp} к значению вегетационного индекса (S_m):

$$S_m = \frac{dm_{\text{cp}}}{d(\text{VI})}. \quad (3)$$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно [5], разработанный в этой работе новый подход к моделированию количества AGB базировался на аллометрических связях показателей леса с использованием математических выражений для интегрирования структурной и спектральной информации. На участке с площадью 60 км² с помощью лидаров, установленных на дронах были проведены 1370 измерений на 4-х подучастках представляющих собой четыре типичных лесных типов, существующих в Китае (хвойный лес, субтропический широколиственный лес, смешанный участок этих двух типов и тропический широколиственный лес). Параллельно, также были использованы снимки, полученные от Sentinel-2.

Проведенный анализ показал, что наиболее полезной универсальной метрикой являются средняя высота кроны и вегетационный индекс NDVI. Основные результаты, проведенных в [5] измерений приведены в таблице.

Отметим, что в таблице применены следующие обозначения: TH – средняя величина общей высоты деревьев; VI – индекс NDVI.

В соответствии с формулами (1) и (2) получим

$$m_{\text{cp}} = \frac{a_1 \cdot \text{TH}^{b_1 \cdot \text{NDVI}}}{\exp(c_1 \cdot \text{NDVI} - c_2)}, \quad (4)$$

где $a_1 = 1,08$; $b_1 = 2,5641$; $c_1 = 8,5456$; $c_2 = 0,3268$.

Очевидно, что для проведения конкретных расчетов m_{cp} следует сначала определить значение NDVI, а также общую высоту TH деревьев. Опустив вопрос о вычислении NDVI из измерения высоты деревьев, рассмотрим вторую задачу исследования.

В соответствии с (2) и выражениями (1) и (3) получим:

Модели и средние значения для вычисления надземной биомассы для различных типов лесов

Древостой №	Тип леса	Модель	AGB (средняя величине)
1	смешанный: хвойный + широколиственный лес	$\text{AGB} = 1,08 \text{TH}^{2,56 \text{VI}}$	274,47 тон/га
2	–	–	440,57 тон/га
3	–	–	188,14 тон/га
4	хвойный лес	$\text{GB} = 3,63 \text{TH}^{1,89 \text{VI}}$	47,91 тон/га

Из (5) имеем:

$$S_m = \frac{a_1 TH^{b_1 \cdot NDVI} \cdot (\ln TH) \cdot b_1}{\exp(c_1 \cdot NDVI - c_2)} - \frac{c_1 a_1 TH^{b_1 \cdot NDVI}}{\exp(c_1 \cdot NDVI - c_2)} = \frac{a_1 TH^{b_1 \cdot NDVI} [a_1 (\ln TH) b_1 - c_1 a_1]}{\exp(c_1 \cdot NDVI - c_2)}. \quad (6)$$

Как видно из (6), при условии

$$\ln TH = \frac{c_1}{b_1}. \quad (7)$$

получаем $S_m = 0$.

Следовательно, при условии (7) крутизна S_m равна нулю, т. е. перестает расти m_{cp} .

Это означает существование такой группы деревьев с высотой

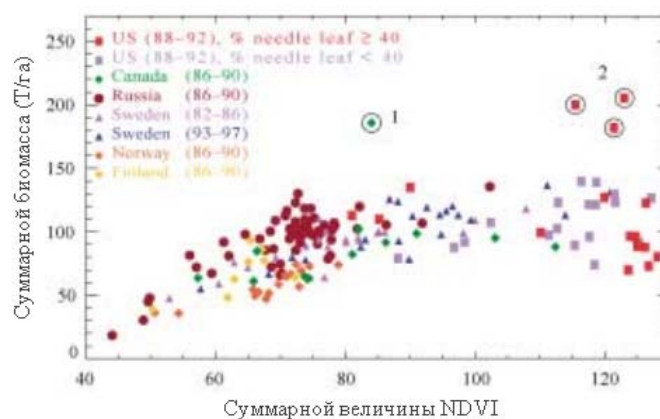
$$TH = \exp\left(\frac{c_1}{b_1}\right). \quad (8)$$

масса которых не изменяется при изменении значения NDVI.

С учетом $c_1 = 8,5456$; $b_1 = 2,5641$, получаем высоту стабилизации

$$TH = \exp\left(\frac{8,54}{2,56}\right) = 28 \text{ м.}$$

Таким образом, согласно вышеприведенному модельному анализу при высоте деревьев равной 28 м средняя надземная биомасса в расчете на одно дерево не зависит от значения NDVI и стабилизируется.



Скатерограмма зависимости суммарной биомассы от суммарной величины NDVI по смешанным лесам из восьми стран

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что надземная масса деревьев в среднем растет с увеличением значения индекса NDVI. Однако при этом существует определенная высота деревьев, при которой надземная масса деревьев не изменяется по NDVI. Дано модельное обоснование этого явления, названного эффектом «стабилизации массы деревьев по высоте при увеличении вегетационного индекса». Косвенное подтверждение эффекта стабилизации массы дерева можно увидеть на скатерограмме, представленной на рис. 1. [9], где представлены соответствующие усредненные данные по смешанным лесам из 8 стран. Как видно из рисунка при росте суммарной величины NDVI происходит стабилизация значения массы в интервале (90–110). Дальнейшее уменьшение суммарной биомассы может быть объяснено тем, что анализ, проведенный в [9] не учитывает условие неизменности высоты деревьев в рассматриваемом древостое.

REFERENCES

1. Jucker T., Caspersen J., Chave J., Antin C., Barbier N., Bongers F., Dalponte M., Ewijk K. Y. V., Forrester D. I., Haeni M., Higgins S. I., Holdaway R., Iida Y., Lorimer C., Marshall P. L., Momo S., Moncrieff G. R., Ploton P., Poorter L., Rahman K., Schlund M., Sonke B., Sterck F. J.,

Trugman A. T., Usoltsev V. A., Vanderwel M. C., Waldner P., Wedeux B. M. M., Wirth C., Woll H., Woods M., Xiang W., Zimmermann N. E., Coomes D. A. Allometric equations for integrating remote sensing imagery into forest monitoring programmes // *Global Change Biology*. Vol. 23. 2017. P. 177–190.

2. Chabi A., Lautenbach S., Orekan V. O. A., Kyei-Baffour N. Allometric models and aboveground biomass stocks of a West African Sudan Savannah watershed in Benin// *Carbon Balance Manage.* 2016.

3. Brede B., Terry L., Barbier N., Bartholomeus H. M., Bartolo R., Calders K., Derroire G., Moorthy S. M. K., Lau A., Levick S. R., Raunonen P., Verbeeck H., Wang D., Whiteside T., Zee J., Herold M. Non-destructive estimation of individual tree biomass: Allometric models, terrestrial and UAV laser scanning // *Remote Sensing of Environment*. 2022.

4. Duncanson L., Armston J., Disney M., Avitabile V., Barbier N., Calders K., Carter S., Chave J., Herold M., Crowther T. W., Falkowski M., Kellner J. R., Labriere N., Lucas R., MacBean N., McRoberts R. E., Meyer V., Nae E., Nickeson J. E., Paul K. I., Phillips O. L., Rejou-Mechain M., Roman M., Roxburgh S., Saatchi S., Schepaschenko D., Scipal K., Siqueira P. R., Whitehurst A., Williams M. The importance of consistent global forest aboveground biomass product validation // *Survey*

Geophys. 40 (4). P. 979–999. URL: <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09538-8>.

5. Yang Q., Su Y., Hu T., Jin S., Liu X., Niu C., Liu Z., Kelly M., Wei J., Guo Q. Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LIDAR canopy height attributes and optical spectral indexes // *Forest Ecosystems*. Vol. 9. 2022.

6. Pandey P. C., Srivastava P. K., Chetri T., Choudhary B. K., Kumar P. Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India // *Environ. Monit. Assess.* 191 (9). 2019. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7730-7>.

7. Xiao J., Chevallier F., Gomez C., Guanter L., Hicke J. A., Huete A. R., Ichii K., Ni W., Pang Y., Rahman A. F., Sun G., Yuan W., Zhang L., Zhang X. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of

advances over 50 years // *Rem. Sens. Environ.* 233. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383>.

8. Vohland M., Stoffels J., Hau C., Schuler G. Remote sensing techniques for forest parameter assessment: multispectral classification and linear spectral mixture analysis // *Silva Fennica* 41(3). P. 441–456. 2007.

9. Dong J., Kaufmann R. K., Myneni R. B., Tucker C. J., Kauppi P. E., Liski J., Buermann W., Alexeyev V., Hughes M. K. Remote sensing estimates of boreal and temperate forest woody biomass: carbon pools, sources and sinks // *Remote Sensing of Environment* 84. 2003. P. 393–410.

© Сулейманов Т. И., Асадов Х. Г.,
Тахмазов Т. М., 2024

Поступила в редакцию 15.05.2023
Принята к печати 22.01.2024