

ФИЗИЧЕСКАЯ ГЕОГРАФИЯ И БИОГЕОГРАФИЯ, ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ И ГЕОХИМИЯ ЛАНДШАФТОВ

УДК 528.8; 630.52

DOI 10.25587/SVFU.2023.30.2.004

*Ю. Г. Данилов¹, Табриз Мубариз оглы Тахмазов²*¹ Северо-Восточный федеральный университет, г. Якутск, Россия² Национальное Аэрокосмическое Агентство, г. Баку, Республика Азербайджан

e-mail: dan57sakha@mail.ru

e-mail: thmzov.tbриз66@gmail.com

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЛЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЕРЕВЬЕВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Аннотация. 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 исследования позволяют не только оперативно контролировать состояние обширных лесных массивов, но и решить задачу оценки глобальных запасов углерода на планете. Целью исследования является создание основ для разработки новых методик по вопросам определения аллометрических показателей методами дистанционного зондирования. Задачами исследования являются определение с использованием технологий дистанционного зондирования (1) суммарной массы деревьев леса, состоящего из числа участков, отличающихся друг от друга количеством и видом деревьев; (2) суммарной массы гетерогенного леса, в котором существует определенная функциональная связь между $NDVI$ и количеством стволов (SN) на определенном участке; (3) модельной связи между $NDVI$ и такими аллометрическими показателями как высота дерева (H) и диаметр кроны (CD). Результаты исследований: решены некоторые задачи аллометрических измерений с применением методов дистанционного зондирования. Получена формула для вычисления биологической массы деревьев в лесу с использованием значений нормализованного разностного вегетационного индекса ($NDVI$) на отдельных участках леса; аналогичная задача для случая наличия функциональной связи между $NDVI$ и количеством стволов на отдельных участках леса; получена формула модельной связи между $NDVI$ и произведением таких аллометрических показателей как высота дерева и диаметр кроны.

Ключевые слова: аллометрические показатели, дистанционное зондирование, спутниковые изображения, георектификация, калибровка данных, вегетационные индексы, регрессионные уравнения, надземная биомасса, лес Идарвальд, Рейнланд-Пфальц.

Y. G. Danilov¹, Tabriz Mubariz oglu Tahmazov²

M. K. Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia

² National Aerospace Agency of the Republic of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: dan57sakha@mail.ru

e-mail: thmzov.tbriez66@gmail.com

ON THE POSSIBILITY OF DETERMINING ALLOMETRIC INDICATORS OF TREES USING SATELLITE REMOTE SENSING DATA

Abstract. In recent decades, the rapid development of remote sensing technologies has led to the development of various methods for determining the amount of aboveground biomass from satellite images. Regression equations were constructed linking field estimates of aboveground biomass and vegetation indices obtained by remote sensing methods. Such studies make it possible not only to promptly monitor the state of vast forests, but also to solve the problem of assessing global carbon stocks on the planet. The purpose of the study is to create the foundations for the development of new methods for determining allometric indicators by remote sensing methods. The objectives of the study are to determine using remote sensing technologies (1) the total mass of trees of a forest consisting of n number of plots differing from each other in the number and type of trees; (2) the total mass of a heterogeneous forest in which there is a certain functional relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and the number of trunks in a certain area; (3) the model relationship between NDVI and such allometric indicators as tree height (H) and crown diameter (CD). Research results: some problems of allometric measurements using remote sensing methods have been solved. A formula has been obtained for calculating the biological mass of trees in the forest using the values of the NDVI in individual forest areas; a similar problem for the case of a functional relationship between NDVI and the number of trunks in individual forest areas; the formula of the model relationship between NDVI and the product of such allometric indicators as tree height and crown diameter is obtained.

Keywords: allometric indicators, remote sensing, satellite images, georectification, data calibration, vegetation indices, regression equations, aboveground biomass, Idarwald forest, Rhineland-Palatinate.

Введение

Согласно [1], точная оценка надземной биомассы важна для изучения глобального углеродного цикла и может быть реализована с использованием спектральной и структурной информации относящейся кроны 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, такими как NDVI [2, 3]. Вместе с тем, точность таких оценок не выше 10 %, что связано с неопределенностью, вызванной приближительностью результатов дистанционных методов измерения. В работе [4] отмечается, что одним из важных показателей древостоя является количество стволов, имеющихся в древостое, в расчете на один гектар.

Общая характеристика района исследования

Несколько подробно остановимся на исследованиях, проведенных на экспериментальном участке леса Идарвальд (49,85° с.ш., 7,15° в.д.), расположенном на северо-западных склонах низкогогорного хребта Хунсрюк (Рейнланд-Пфальц, Германия). Вблизи хребта типичны бедные песчаные и маломощные почвы, развитые на девонских кварцитовых породах. В нижних частях склонов солифлюкция глинистых продуктов выветривания палеогенового периода привела к образованию уплотненных и частично водоупорных толщ с насаждениями березы пушистой. В остальных частях исследуемого района с водопроницаемыми почвами исходными естественными лесными сообществами были разновидности лузуло-фаготум тем не менее, ель обычная

(европейская) стала доминирующей в лесоводстве с конца 18 века. Таким образом, доля обычной ели во всех древесных породах района Идарвальд по-прежнему фактически остается самой высокой, хотя в конце 80-х годов начался постепенный переход к смешанным лесам. Общая площадь Идарвальда составляет около 7500 га. Для анализа были выбраны два лесничества (Хинзерат, Бишофедрон) площадью около 1773 га. В этих районах встречаются однородные насаждения одного вида и возрастного класса, а также разнородные смешанные насаждения с посадкой или естественным возобновлением. Данные инвентаризации леса были интегрированы в подход к классификации, поскольку они позволяют извлекать обучающие данные, а также проверять результаты классификации.

Обработка и классификация данных

С этой целью управление лесным хозяйством земли Рейнланд-Пфальц предоставило официальные данные инвентаризации (конец периода сбора – октябрь 1994 г.). Эти данные изначально были включены в некоторые иерархически упорядоченные файлы данных, предоставляющие информацию о лесном районе, отдельных лесных насаждениях и соответствующих породах деревьев. После некоторого редактирования для статистической агрегации данных они были интегрированы в цифровую лесную ГИС и связаны с векторными данными (полигоны насаждений), оцифрованными с официальной карты лесничества. Кроме того, цветные инфракрасные аэрофотоснимки полета, проведенного 4 августа 1990 г., были доступны в Исследовательском институте лесной экологии и лесного хозяйства (FAWF) земли Рейнланд-Пфальц. Фотографии были отсканированы и ортотрансформированы, и, поскольку их масштаб (1:11000) позволяет выделить отдельные деревья, кроны были подсчитаны в вертикальном положении для подтверждения оценок на основе LSMA по данным TM Landsat-5. В этом исследовании для анализа была выбрана одна сцена TM Landsat-5, покрывающая район Hunsrück (траектория Landsat-5: 196; ряд: 25) примерно в то время, когда были получены данные цветных инфракрасных аэрофотоснимков полета (15.07.1990). Landsat-5 TM предоставляет мультиспектральные данные отражения в спектральных областях видимого, ближнего и коротковолнового инфракрасного диапазонов, и поэтому подходит для изучения характеристик растительности. Набор данных был откалиброван путем преобразования исходных цифровых чисел в абсолютные значения коэффициента отражения для каждого пикселя. Поскольку рельеф изучаемой территории очень пересеченный, перед анализом структуры леса важно устранить топографические эффекты. Ключевым фактором в топографической коррекции является правильная попиксельная оценка общей освещенности (прямого и рассеянного членов), что невозможно с помощью типичных «автономных» подходов к коррекции.

В связи с этим, было решено использовать интегрированный подход комбинированной атмосферной и топографической коррекции, где условия, описывающие освещенность, могут быть аппроксимированы и скомпенсированы для каждой растровой ячейки путем интеграции цифровой модели рельефа. В дополнение к радиометрической коррекции предварительная обработка данных включала точную георектификацию, которая позволяет проводить многослойный анализ, сочетающий, например, данные изображений Landsat-5 TM и векторные данные FIS. 2.3.2 Подход к мультиспектральной классификации (в целом подходы к классификации) направлен на создание тематической карты на основе мультиспектральных спутниковых изображений. Они основаны на том принципе, что разные объекты или типы земного покрова обладают типичными свойствами отражения, которые в лучшем случае четко различимы в мультиспектральном пространстве признаков. Таким образом, реальный уровень детализации построенной тематической карты зависит от конкретной делимости соответствующих категорий, которыми в данном исследовании являются типы леса или классы леса. Тематическая классификация включает в себя несколько этапов анализа данных. После дополнительной предварительной обработки для преобразования исходных данных в абсолютные значения коэффициента отражения (калибровка данных, 2.3.1) из данных изображения извлекаются обучающие

выборки, представляющие различные типы леса, и проверяются на разделимость с помощью сигнатурного анализа. Для классификации Идарвальда этот отбор был основан на данных FIS, и только однородные насаждения (т.е. насаждения, состоящие более чем на 90 % из одного вида) использовались для контролируемого (на основе априорных знаний) определения обучающих выборок. После этого репрезентативные, а также статистически отличающиеся выборки, используются для обучения классификатора. Для мультиспектральных данных дистанционного зондирования подход максимального правдоподобия является широко используемым методом классификации. В этом подходе для каждого класса предполагается гауссово распределение вероятностей, а средние векторы и ковариационные матрицы рассчитываются на основе выбранных обучающих данных для описания свойств отдельных классов. После этого каждый пиксель может быть помечен, тогда как присвоение класса зависит от наибольшей вероятности принадлежности. Этот стандартный параметрический подход был применен к данным Landsat-5 TM за 1990 г., и для проверки была рассчитана подробная матрица ошибок. Согласно [4], 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. Некоторые результаты по определению спектральной чувствительности, полученные путем проведения измерений на 42 древостоях приведены в таблице.

Таблица – Некоторые результаты работы [1]

Индекс	Модель оценки
$NDVI$	$SN = \exp(8,5456 \times NDVI - 0,3268)$
$NDVI$	$SN = \exp(5,6225 \times NDVI + 4,006)$

С учетом вышеизложенного, рассмотрим модельную задачу определения суммарной массы деревьев леса, состоящего из числа участков, отличающихся друг-от друга двумя показателями:

- Количество деревьев на участках различно;
- Типы деревьев на участках различны.

В общем случае суммарную массу деревьев в таком лесу можно вычислить по формуле

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (SN_i) \cdot (DWB_i) \quad (1)$$

где: SN_i – количество стволов на i -м участке или древостое; DWB_i – надземная биомасса в одном дереве в сухом виде.

Согласно [5], регрессионная зависимость DWB от $NDVI$ имеет вид

$$DWB = \alpha_1 \cdot \exp(\beta_1 \cdot NDVI) \quad (2)$$

Таким образом, с учетом выражений (1), (2) а также выражения, указанного на первой строке табл. 1. получим

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n [\exp(c_i NDVI_i - c_i)] \cdot [\alpha_i \exp(\beta_i NDVI_i)] \quad (3)$$

где $c_1, c_2, \alpha_1, \beta_1$ – регрессионные коэффициенты.

Выражение (3) перепишем в виде

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\exp(c_i NDVI_i - c_i)}{\exp c_i} \right] \alpha_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\exp(NDVI_i)(c_i + \beta_i)}{\exp c_i} \right] \alpha_i \quad (4)$$

В случае гомогенного леса из (4) получим

$$M_{\Sigma} = \frac{\alpha N \cdot \exp[NDVI(c + \beta)]}{\exp c} \quad (5)$$

Таким образом, если лес гомогенный и может быть разделен на N количество однотипных участков, то суммарная масса деревьев может быть вычислена по выражению (5).

Теперь рассмотрим вторую модельную задачу по оценке суммарной массы гетерогенного леса, в котором существует определенная функциональная связь между $NDVI_i$ и SN_i для i -го участка лесов виде

$$NDVI_i = NDVI_i(SN_i) \quad (6)$$

С учетом (1), (2) и (6) напомним

$$M_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (SN_i) \alpha_i \cdot \exp[\beta_i NDVI_i(SN_i)] \quad (7)$$

Задача исследования формулируется следующим образом: при наличии ограничительного условия типа

$$\sum_{i=1}^n NDVI_i(SN_i) = C; \quad C = const \quad (8)$$

Следует определить минимально возможную массу деревьев лесу. При этом допускаем, что лес может быть разделен на участки, количество деревьев в которых (SN_i) составляет упорядоченное множество в виде

$$SN = \{SN_i\}; \quad i = \overline{1, n} \quad (9)$$

где $SN_i = SN_{i-1} + \Delta SN$; $\Delta SN = const$ $SN_0 = 0$.

С учетом (9), дискретные модели (7), (8) условно можно записать в непрерывной форме.

$$M_{\Sigma} = \int_0^{SN_{max}} (SN) \cdot \alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] dSN \quad (10)$$

$$\int_0^{SN_{max}} NDVI(SN) dSN = C \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) составим вариационную задачу вычисления оптимальной функции в которой, при условии (11) достигнет минимальной величины.

Целевой функционал задачи оптимизации имеет вид:

$$M_0 = \int_0^{SN_{max}} (SN) \cdot \alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] dSN - \lambda \left[\int_0^{SN_{max}} NDVI(SN) dSN - C \right] \quad (12)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Решение данной задачи согласно [6] должна удовлетворять условию

$$\frac{d\{SN\alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] + \lambda NDVI(SN)\}}{dNDVI(SN)} = 0 \quad (13)$$

Из (13) получим

$$SN \cdot \alpha \cdot \exp[\beta \cdot NDVI(SN)] \cdot \beta = \lambda \quad (14)$$

Из (14) имеем

$$NDVI(SN) = \frac{1}{\beta} \ln \left[\frac{\lambda}{SN \cdot \alpha \cdot \beta} \right] \quad (15)$$

Таким образом, при обратной логарифмической зависимости $NDVI$ от SN M_0 достигает экстремального значения. При этом данный экстремум является минимумом, т.к. вторая производная интегранта в (12) по $NDVI(SN)$ оказывается всегда положительной величиной. Что касается величины λ , то она легко может быть вычислена с помощью выражений (11) с учетом выражения (15) при условии $\lambda = const$.

Следующей задачей исследования в настоящей статье является определение модельной связи между $NDVI$ и такими аллометрическими показателями как высота дерева (H) и диаметр кроны (CD). Как отмечается в работе [7], по результатам аллометрических измерений, проведенных с помощью лидара, установленного на БПЛА была получено следующее модельное уравнение

$$\ln(AGB) = \alpha + \beta \ln(H \cdot CD) \quad (16)$$

где: AGB – биомасса надземной части дерева в кг; H – высота дерева в м; CD – диаметр кроны в м; α и β – модельные коэффициенты, определяемые для каждого типа дерева.

Если допустить равенство

$$AGB = k \cdot DWB; \quad k = const \quad (17)$$

то с учетом (2), (16), (17) получим

$$\ln[k \cdot \alpha_1 \exp(\beta_1 \cdot NDVI)] = \alpha + \beta \ln(H \cdot CD) \quad (18)$$

Из (18) имеем

$$\ln k \cdot \alpha_1 + \beta_1 \cdot NDVI = \alpha + \beta \ln(H \cdot CD) \quad (19)$$

Из (19) находим

$$\ln(H \cdot CD) = \frac{\beta_1 \cdot NDVI + \ln k \cdot \alpha_1 - \alpha}{\beta} \quad (20)$$

или

$$H \cdot CD = \exp \left[\frac{\beta_1 \cdot NDVI + \ln k \cdot \alpha_1 - \alpha}{\beta} \right] \quad (21)$$

Таким образом, формула (21) определяет модельную связь между и произведением аллометрических показателей.

Заключение

Сформулированы и решены некоторые задачи аллометрических измерений с применением техники дистанционного зондирования. В частности, получена формула для вычисления массы деревьев в лесу с использованием данных величине на отдельных участках леса; аналогичная задача для случая наличия функциональной связи между и количеством стволов на отдельных участках леса; получена формула модельной связи между и такими аллометрическими показателями как высота дерева и диаметр кроны.

Литература

1. Yang, Q. Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LIDAR canopy height attributes and optical spectral indexes / Q. Yang, Y. Sun, T. Hu, S. Jin, X. Liu, C. Niu, Z. Liu, M. Kelly, J. Wei, Q. Guo // *Forest Ecosystems*. Vol. 9. 2022.
2. Pandey, P.C. Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India / P.C. Pandey, P.K. Srivastava, T. Chetri, B.K. Choudhary, P. Kumar // *Environ. Monit. Assess.* 191 (9), 2019. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7730-7>.
3. Pang, Y. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years / Y. Pang, A. F. Rahman, G. Sun, W. Yuan, L. Zhang, X. Zhang // *Rem. Sens. Environ.* 233. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383>.
4. Vohland, M. Remote sensing techniques for forest parameter assessment: multispectral classification and linear spectral mixture analysis / M. Vohland, J. Stoffels, C. Hau, G. Schuler // *Silva Fennica*, 2007. – 41(3). – P. 441-456.
5. Wu, J. Developing general equations for urban tree biomass estimation with high-resolution satellite imagery / J. Wu // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. 4347.
6. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Е. Эльсгольц. – М.: Наука. 1974. – С. 472.
7. Brede, B. Non-destructive estimation of individual tree biomass: allometric models, terrestrial and UAV laser scanning / B. Brede, L. Terryn, N. Barbier, H. M. Bartholomeus, R. Bartolo [and others] // *Remote Sens. Environ.* Vol. 280. 2022.

References

1. Yang, Q. Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LIDAR canopy height attributes and optical spectral indexes / Q. Yang, Y. Sun, T. Hu, S. Jin, X. Liu, C. Niu, Z. Liu, M. Kelly, J. Wei, Q. Guo // *Forest Ecosystems*. Vol. 9. 2022.
2. Pandey, P.C. Forest biomass estimation using remote sensing and field inventory: a case study of Tripura, India / P.C. Pandey, P.K. Srivastava, T. Chetri, B.K. Choudhary, P. Kumar // *Environ. Monit. Assess.* 191 (9), 2019. – P. 1-15. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7730-7>.
3. Pang, Y. Remote sensing of the terrestrial carbon cycle: a review of advances over 50 years / Y. Pang, A. F. Rahman, G. Sun, W. Yuan, L. Zhang, X. Zhang // *Rem. Sens. Environ.* 233. – 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111383>.
4. Vohland, M. Remote sensing techniques for forest parameter assessment: multispectral classification and linear spectral mixture analysis / M. Vohland, J. Stoffels, C. Hau, G. Schuler // *Silva Fennica*, 2007. – 41(3). – P. 441-456.
5. Wu, J. Developing general equations for urban tree biomass estimation with high-resolution satellite imagery / J. Wu // *Sustainability*. 2019. Vol. 11. 4347.
6. Эльсгольц, Л. Е. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л. Е. Эльсгольц. – М.: Наука. 1974. – С. 472.
7. Brede, B. Non-destructive estimation of individual tree biomass: allometric models, terrestrial and UAV laser scanning / B. Brede, L. Terryn, N. Barbier, H. M. Bartholomeus, R. Bartolo [and others] // *Remote Sens. Environ.* Vol. 280. 2022.

Сведения об авторах

ДАНИЛОВ Юрий Георгиевич – к.г.н., заместитель ректора СВФУ по вопросам устойчивого развития арктических территорий, профессор эколого-географического отделения ИЕН СВФУ, доцент, e-mail: dan57sakha@mail.ru

DANILOV Yuri Georgievich – Candidate of Geographical Sciences, Deputy Rector for Sustainable Development of the Arctic Territories, Associate Professor, Institute of Natural Sciences, Ammosov North-Eastern Federal University. Yakutsk, Russian Federation, e-mail: dan57sakha@mail.ru

ТАХМАЗОВ Табриз Мубариз оглы – докторант Национального аэрокосмического агентства Республики Азербайджан, e-mail: thmzov.tbriez66@gmail.com

ТАНМАЗОВ Tabriz Mubariz oglu – PhD student, National Aerospace Agency of the Republic of Azerbaijan, e-mail: thmzov.tbriez66@gmail.com