

УДК 528.8

ОЦЕНКА БИОМАССЫ ЛЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛИГОНА «КАРБОН-ПОВОЛЖЬЕ» ПО ДАННЫМ ВЛС

Б. М. Усманов, А. М. Гафуров, М. В. Кожевникова, Д. В. Тишин

*Институт экологии и природопользования, Казанский федеральный университет,
ул. Товарищеская. 5, 42097, Казань, Россия, busmanof@kpfu.ru*

Для территории лесного участка полигона «Карбон-Поволжье» по результатам лидарной съемки получена цифровая модель рельефа, находящегося под лесным покровом, карта высоты деревьев, морфометрические характеристики крон. С использованием данных натурных наблюдений выведено уравнение, связывающее биомассу кроны с объемом и высотой дерева, что позволило получить пространственную модель биомассы крон.

Ключевые слова: карбоновый полигон; биомасса растительности; дистанционное зондирование; БПЛА; воздушное лазерное сканирование; моделирование.

ASSESSMENT OF FOREST VEGETATION BIOMASS AT CARBON VOLGA TEST AREA BASED ON THE ALS RESULTS

B. M. Usmanov, A. M. Gafurov, M. V. Kozhevnikova, D. V. Tishin

*Institute of Ecology and Environmental Management, Kazan Federal University,
Tovarisheskaya str., 5, 42097, Kazan, Russia, busmanof@kpfu.ru*

For the forest site of the Carbon Volga test area a digital model of the relief under the forest cover, a tree height map, and morphometric characteristics of the crowns were obtained using lidar survey. Using data from field observations, an equation was derived that relates crown biomass to the volume and height of the tree, which made it possible to obtain a spatial model of crown biomass.

Key words: carbon polygon; vegetation biomass; remote sensing; UAV; airborne laser scanning; modeling.

Биомасса растительности играет решающую роль в понимании вклада экосистемы в глобальный углеродный цикл. Для оценки биомассы и секвестрации углерода используются различные типы спутниковых данных: вегетационные индексы MODIS [1], мультиспектральная съемка Sentinel-2 [2] и Landsat [3], радарные данные Sentinel-1 и ALOS2 (чаще всего в комбинации с Sentinel-2 и Landsat) [4], лидарная съемка [5].

Для оперативной оценки биомассы используются полевые методы измерения, основанные, преимущественно, на двух подходах — наземные измерения [7] и съемка с пилотируемых и беспилотных летательных систем (БПЛА) [6]. В число первых входят оценка объема древесной биомассы по эмпирическим формулам с учетом диаметра ствола, породного состава и высоты деревьев, а также современные геодезические методы.

Для оценки биомассы древесных сообществ с использованием (БПЛА) используется аэрофотосъемка, позволяющая получать цифровые модели местности и ортофотопланы [8], мультиспектральная съемка, позволяющая производить расчет различных вегетационных индексов и метрик [9] и лидарная съемка, которая позволяет оценить объем и, как следствие, биомассу древесины [10].

В апреле 2023 г. на территории лесного участка «Карбон-Поволжье» проведена низковысотная съемка квадрокоптером Геоскан 401 Геодезия, оснащенный лидаром АГМ МС-1 (рис. 1).

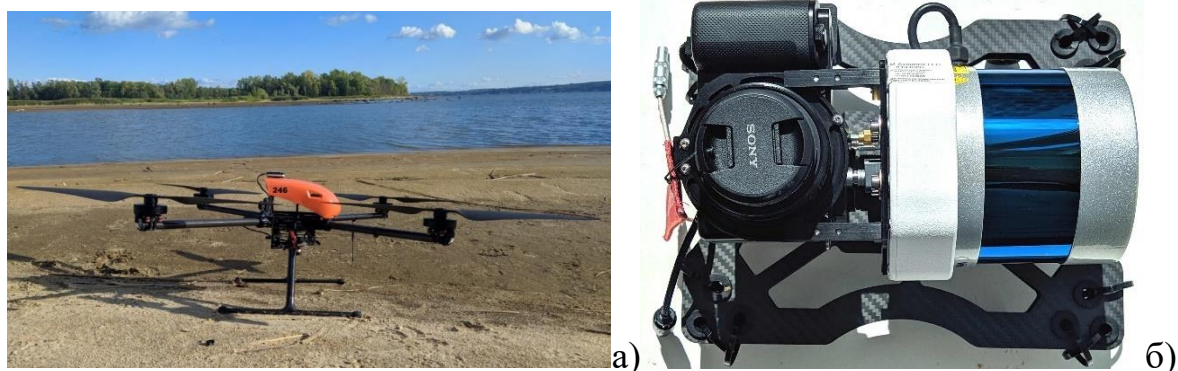


Рис. 1. БПЛА Геоскан 401 Геодезия (а), лидар АГМ МС-1 (б)

По результатам воздушного лазерного сканирования было получено облако точек (72 600 000 млн точек), которое обрабатывалось в ПО Lidar 360. В результате получена цифровая модель рельефа, находящегося под лесным покровом (рис. 2а). Путем вычитания ЦМР из ЦММ, представляющей, по сути, модель поверхности лесного полога, была получена карта высоты деревьев (рис. 2б).

Так как для обучения модели для предсказания биомассы по данным БПЛА необходима обучающая выборка, имеющая координатную привязку, первый этап работы был связан с получением этой обучающей выборки. Для этого в ПО Lidar 360 были проведены сегментация облака точек на отдельные деревья и кроны (рис. 3) и расчет морфометрических показателей — высота дерева, диаметр кроны, площадь кроны и ее объем. Параллельно с этим были

проведены натурные наблюдения и ручной замер высоты деревьев, диаметра ствола на уровне груди и определение биомассы кроны и ствола.

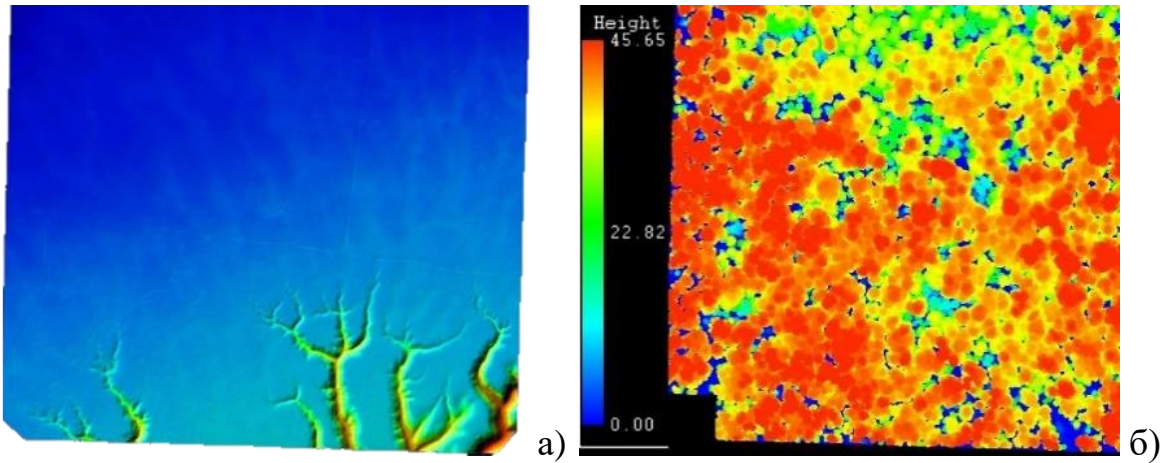


Рис. 2. ЦМР (а), карта высоты древесной растительности (б)

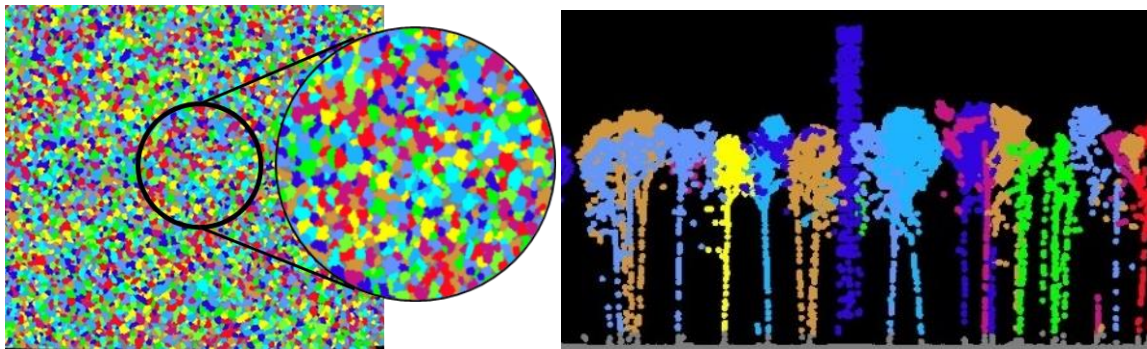


Рис. 3. Фрагмент сегментированного облака точек

Оценка биомассы лесной растительности была основана на анализе двух основных наборов данных: 1) зависимость биомассы кроны от высоты дерева; 2) зависимость объема кроны от ее морфометрии. Для анализа данных использовались различные статистические и машинные методы обучения, включая линейную и нелинейную регрессии.

Диаграмма рассеяния (рис. 4) показывает распределение данных о биомассе кроны деревьев в зависимости от их высоты. Как видно, существует некоторая положительная линейная зависимость между высотой дерева и биомассой его кроны ($R^2 = 0,838$).

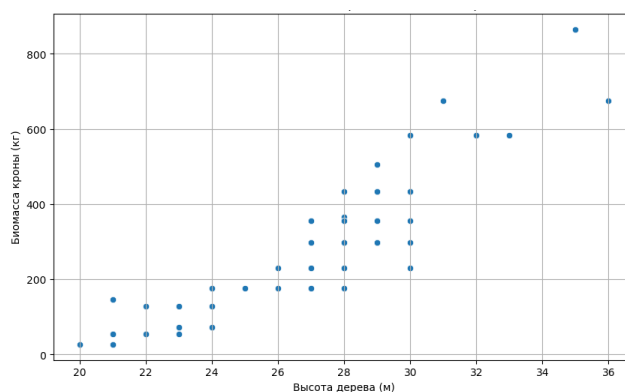


Рис. 4. Зависимость биомассы кроны от высоты деревьев

Предварительный анализ характера распределения взаимосвязи между высотой дерева и объемом его кроны позволяет предположить, что существует экспоненциальная зависимость между высотой дерева и объемом его кроны. Коэффициент детерминации R^2 равен 0,489, что означает, что модель объясняет около 48,9 % вариабельности объема кроны на основе высоты дерева.

Учитывая наличие двух моделей (линейной для биомассы кроны от высоты дерева и экспоненциальной для объема кроны от высоты дерева), мы вывели зависимость биомассы кроны от объема кроны.

В результате выведено итоговое уравнение, позволяющее оценить биомассу кроны, используя объем кроны как ключевой параметр:

$$\text{Biomass} = -1017.49 + 48.17 * \frac{\ln\left(\frac{\text{CrownVolume}}{0.03}\right)}{0.29}$$

Полученное уравнение было применено к набору данных, полученному в ходе воздушной лазерной съемки, что позволило получить модель пространственной динамики биомассы крон (рис. 5).

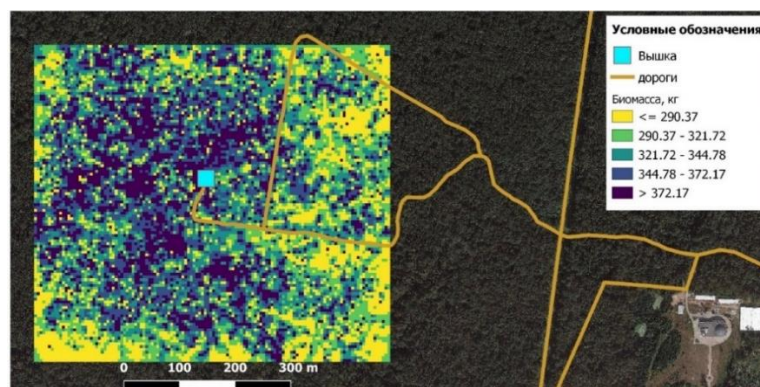


Рис. 5. Пространственная модель биомассы крон деревьев

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2024-0004

Библиографические ссылки

1. *Dai X., Yang G., Liu D.* Vegetation carbon sequestration mapping in herbaceous wetlands by using a MODIS EVI time-series data set: a case in Poyang Lake wetland // *China Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, iss.18. 3000.
2. *Bulut S., Günlü A.* Determination of total carbon storage using Sentinel-2 and geographic information systems in mixed forests // *Anadolu Orman Araştırmaları Dergisi*. 2019. Vol. 5, iss. 2. P. 127–135.
3. *Mei A., Salvatori R., Bassani C.* Biomass evaluation by the use of Landsat satellite imagery and forestry data // *Rendiconti online della Società Geologica Italiana*. 2017. Vol. 42. P. 66–69.
4. Forest aboveground biomass estimation using a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data / A. Hoscilo [et al.] // *IGARSS 2018 – IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. P. 9026–9029.
5. *Torre-Tojal L., Bastarrika A., Boyano A.* Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms // *Journal of Computational Science*. 2022. Vol. 58. 101517.
6. *Chugunov R., Iskandirov P., Tishin D.* Dendroclimatic research on Scots pine growing under the conditions of the raised bog in the Volga-Kama region, Russia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2018. Vol. 107. 012083.
7. *Gafurov A., Yermolayev O., Usmanov B.* Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV // *InterCarto InterGIS*. 2021. Vol. 27, iss. 2. P. 327–339.
8. *Karpina M., Jarzabek-Rychard M., Tymków P.* UAV-based automatic tree growth measurement for biomass estimation // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2016. XLI-B8. P. 685–688.
9. *Qiao L., Zhao R., Tang W.* Estimating maize LAI by exploring deep features of vegetation index map from UAV multispectral images // *Field Crops Research*. 2022. Vol. 289. 108739.
10. *d'Oliveira M., Broadbent E., Oliveira L.* Aboveground biomass estimation in Amazonian tropical forests: a comparison of aircraft- and GatorEye UAV-borne LiDAR data in the Chico Mendes Extractive Reserve in Acre, Brazil // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, iss. 11. 1754.