

МОНИТОРИНГ ПОЛИГОНА «КАРБОН-ПОВОЛЖЬЕ» ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Гафуров А.М., Усманов Б.М., Хомяков П.В.

Казанский федеральный университет, институт экологии и природопользования

Республика Татарстан является одним из регионов, где осуществляется реализация пилотного проекта по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса (<https://carbon-polygons.ru>). Этот проект должен стать одним из ключевых элементов разработки надежной национальной системы мониторинга потоков парниковых газов в экосистемах России.

Одной из задач при мониторинге карбоновых полигонов является оценка наземной биомассы (Above-ground biomass – AGB), поскольку биомасса растительности играет решающую роль в понимании вклада экосистемы в глобальный углеродный цикл.

Для оперативной оценки биомассы используются полевые методы измерения, основанные, преимущественно, на двух подходах - наземные измерения и съемка с пилотируемых и беспилотных летательных систем [1]. В число первых входят непосредственно замеры эталонных образцов и экстраполяция полученных результатов [2], так называемые классические методы, а также современные геодезические методы – методы наземной фотограмметрии, наземного лазерного сканирования [3]. Методы фотограмметрии, в свою очередь, используются как в современном виде с получением облаков точек и построением трехмерных моделей объектов исследования, так и в классическом виде с анализом изображения, вписыванием в кадр примитивов и оценкой объема древесной биомассы по эмпирическим формулам с учетом диаметра ствола, породного состава и высоты деревьев. Подобный подход реализован, например, в программном обеспечении Katam [4].

Для оценки биомассы древесных сообществ с большей производительностью используются беспилотные летательные аппараты, оснащенные различной полезной нагрузкой. Наиболее распространена аэрофотосъемка с БПЛА, позволяющая получать цифровые модели местности с ортофотопланом территории. В дальнейшем ортофотоплан может использоваться для контролируемой или неконтролируемой классификации типов растительности, а ЦММ используется для оценки наземной биомассы [4, 6]. Более продвинутый вариант подобной съемки - использование в качестве полезной нагрузки мультиспектральной камеры, способной снимать одновременно в нескольких диапазонах спектра. На основе подобной съемки можно создавать как ортофотоплан территории в видимом диапазоне, так и производить расчет различных вегетационных индексов и метрик [7]. В последующем, они, совместно с моделями местности успешно используются для вероятностной оценки биомассы с учетом породного состава растительности, как древесного, так и лугового типов [8, 9].

Наиболее точных результатов по оценке объемов древесной биомассы можно добиться при использовании лидарной съемки с БПЛА [10]. В отличие от аэрофото съемки с БПЛА, лидарная съемка способна проникать сквозь листья и ветви растений для съемки рельефа местности. Фильтрация рельефа позволяет оценить объем и, как следствие, биомассу древесины выше поверхности [11]. Тем не менее, лидарная съемка с БПЛА имеет свои ограничения, связанные с низким разрешением облаков точек в нижней и средней частях стволов, поэтому, наилучших результатов при оценке биомассы можно добиться, совмещая мультиспектральную и лидарную съемку с БПЛА, а также НЛС [12, 13].

Формирование банка дистанционных данных проводится на двух участках полигона «Карбон-Поволжье» (рис. 1).

Участок 1 «Обсерватория» – расположен в Зеленодольском районе РТ, расположен в широколиственном лесу, испытывающем антропогенное давление средней интенсивности и имеющем длинную историю освоения.

Участок 2 «Саралы» – расположен в Лаишевском районе РТ, на территории Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника, – наблюдательный участок за экосистемами Куйбышевского водохранилища.

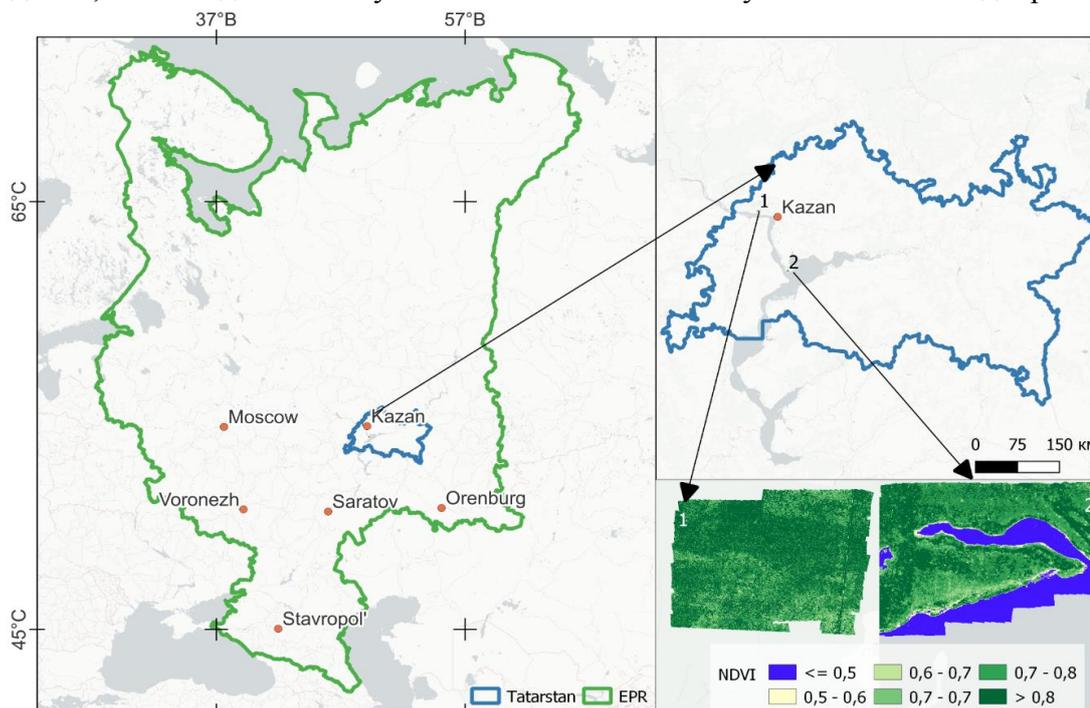


Рис. 1. Обзорная карта. Лесной (1) и водный (2) участки полигона «Карбон-Поволжье»

Для исследования участков полигона использовался БПЛА (квадрокоптер) Геоскан 401 Геодезия, (рис. 2 а) с возможностью оснащения мультиспектральной камерой Micasense RedEdge-MX (рис. 2 б) и лидаром АГМ МС-1. (рис. 2 в). Также на водном участке карбонового полигона проводились работы по измерению глубин. Для съемки была использована ПВХ-лодка Флагман и эхолот-картплоттер Garmin GPS Map 178С.

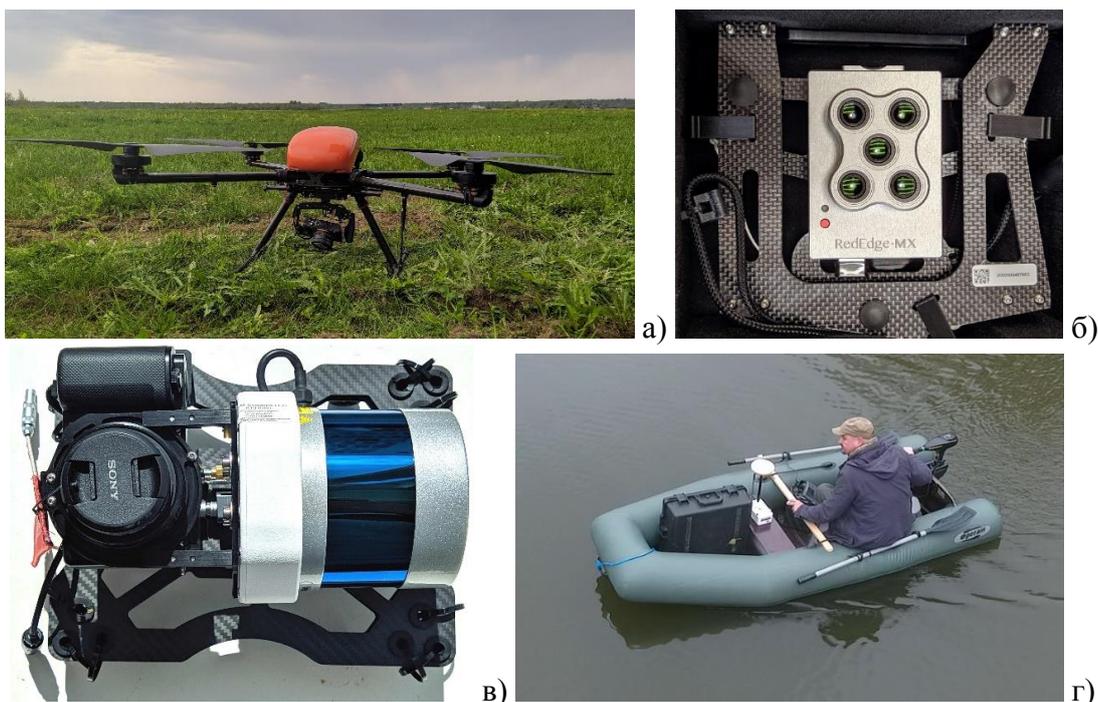


Рис. 2. Оборудование, используемое для мониторинга полигона «Карбон-Поволжье»

Лесной участок

С помощью камеры Micasense RedEdge-MX, установленной на БПЛА проводится мультиспектральная съемка в 5 каналах, которая позволяет расчет различных вегетационных индексов, которые активно используются при оценке биомассы и запасов углерода. Путем отбора наиболее репрезентативных индексов для всех периодов съемки формируются временные ряды наблюдений с заданной периодичностью.

Наиболее репрезентативными для распознавания типов доминирующих пород представляются такие индексы, как Chlorophyll Index (CIg), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Leaf Index (GLI), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Сопоставление рядов вегетационных индексов с регулярными полевыми наблюдениями, позволит установить взаимосвязь величины вегетационных индексов с величиной запасов биомассы, а, следовательно, с запасами углерода на исследуемой территории полигона и экстраполировать полученные результаты на территории со схожими растительными сообществами.

Проведена низковысотная съемка лидаром AGM MC-1 на территории лесного участка "Карбон-Поволжье". В результате получена цифровая модель рельефа, находящегося под лесным покровом, карта высоты деревьев (рис. 3). Также проведена сегментация облака точек на отдельные деревья, что позволило получить морфометрические характеристики крон для последующего определения AGB (рис. 4).

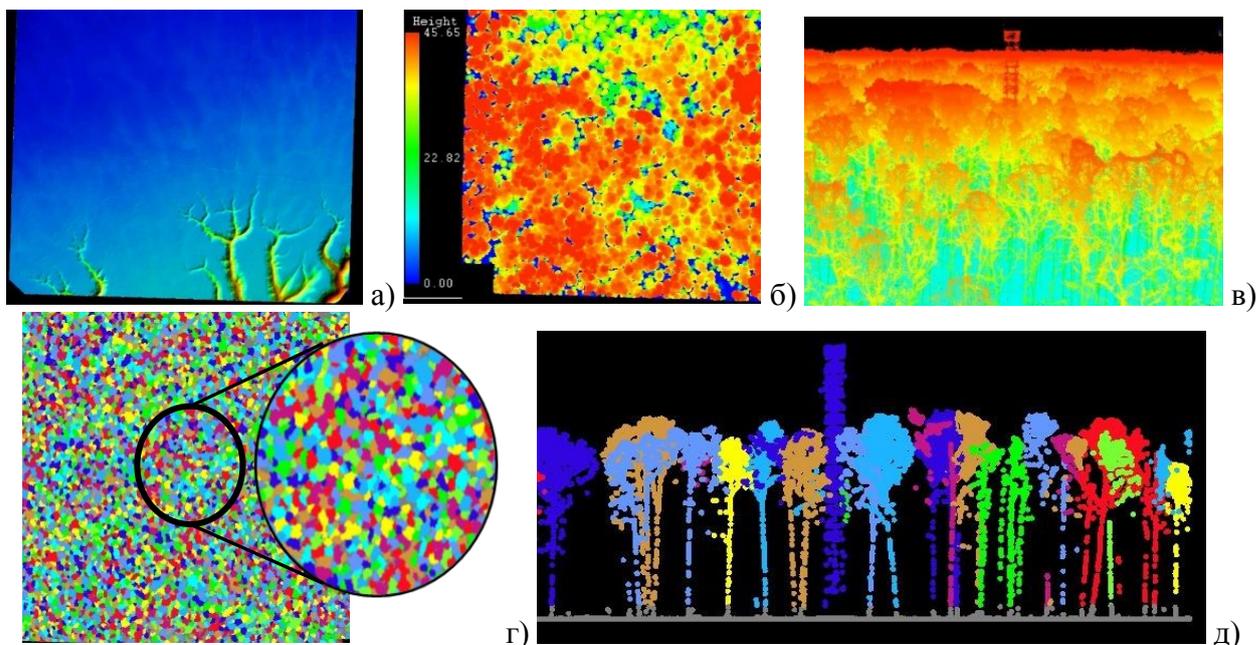


Рис. 3. ЦМР (а), карта высоты древесной растительности (б), облако точек (в), сегментация облака точек (г, в) на лесной участок полигона "Карбон-Поволжье"

CrownDiameter(metre)	CrownDiameter(S-N)(metre)	CrownDiameter(E-W)(metre)	CrownArea(square metre)	CrownVolume(cubic metre)			
Среднее	7,69	Среднее	8,28	Среднее	53,92	Среднее	457,85
Стандартная ошибка	0,04	Стандартная ошибка	0,05	Стандартная ошибка	0,05	Стандартная ошибка	8,44
Медиана	7,20	Медиана	7,70	Медиана	8,00	Медиана	41,20
Мода	6,20	Мода	5,50	Мода	5,70	Мода	45,90
Стандартное отклонение	3,09	Стандартное отклонение	3,60	Стандартное отклонение	3,70	Стандартное отклонение	44,54
Дисперсия выборки	9,57	Дисперсия выборки	12,96	Дисперсия выборки	13,71	Дисперсия выборки	1984,12
Эксцесс	0,76	Эксцесс	1,27	Эксцесс	1,21	Эксцесс	6,61
Асимметричность	0,77	Асимметричность	0,93	Асимметричность	0,90	Асимметричность	2,03
Интервал	23,20	Интервал	29,80	Интервал	28,80	Интервал	430,00
Минимум	0,20	Минимум	0,20	Минимум	0,30	Минимум	0,00
Максимум	23,40	Максимум	30,00	Максимум	29,10	Максимум	430,00
Сумма	40506,40	Сумма	43630,00	Сумма	45405,80	Сумма	284155,00
Счет	5270,00	Счет	5270,00	Счет	5270,00	Счет	5270,00
Уровень надежности(95,0%)	0,08	Уровень надежности(95,0%)	0,10	Уровень надежности(95,0%)	0,10	Уровень надежности(95,0%)	1,20

Рис. 4. Морфометрические характеристики крон, полученные по результатам лидарной съемки

Водный участок

Для получения рельефа дна, а также для технического обоснования установки площадки наблюдений на водном участке полигона "Карбон Поволжья" проведена батиметрическая съемка участка протоки на территории Волжско-Камского государственного биосферного заповедника. Слепая протока представляет собой затопленное межрядовое понижение поймы р. Волга. На участке обследования фиксируется большое количество затопленных пней от вырубленных деревьев (подготовка территории в ходе создания Куйбышевского водохранилища в 1957 г.).

Всего в ходе обследования накоплено 3462 отметок глубин. В ходе камеральной обработки выбраковке подверглось 156 отметок. Отметка уреза воды на дату съемки определена в 51,2 м абс. БС. По результатам съемки была получена ЦМР залива на водном участке и построена карта глубин (рис. 8).

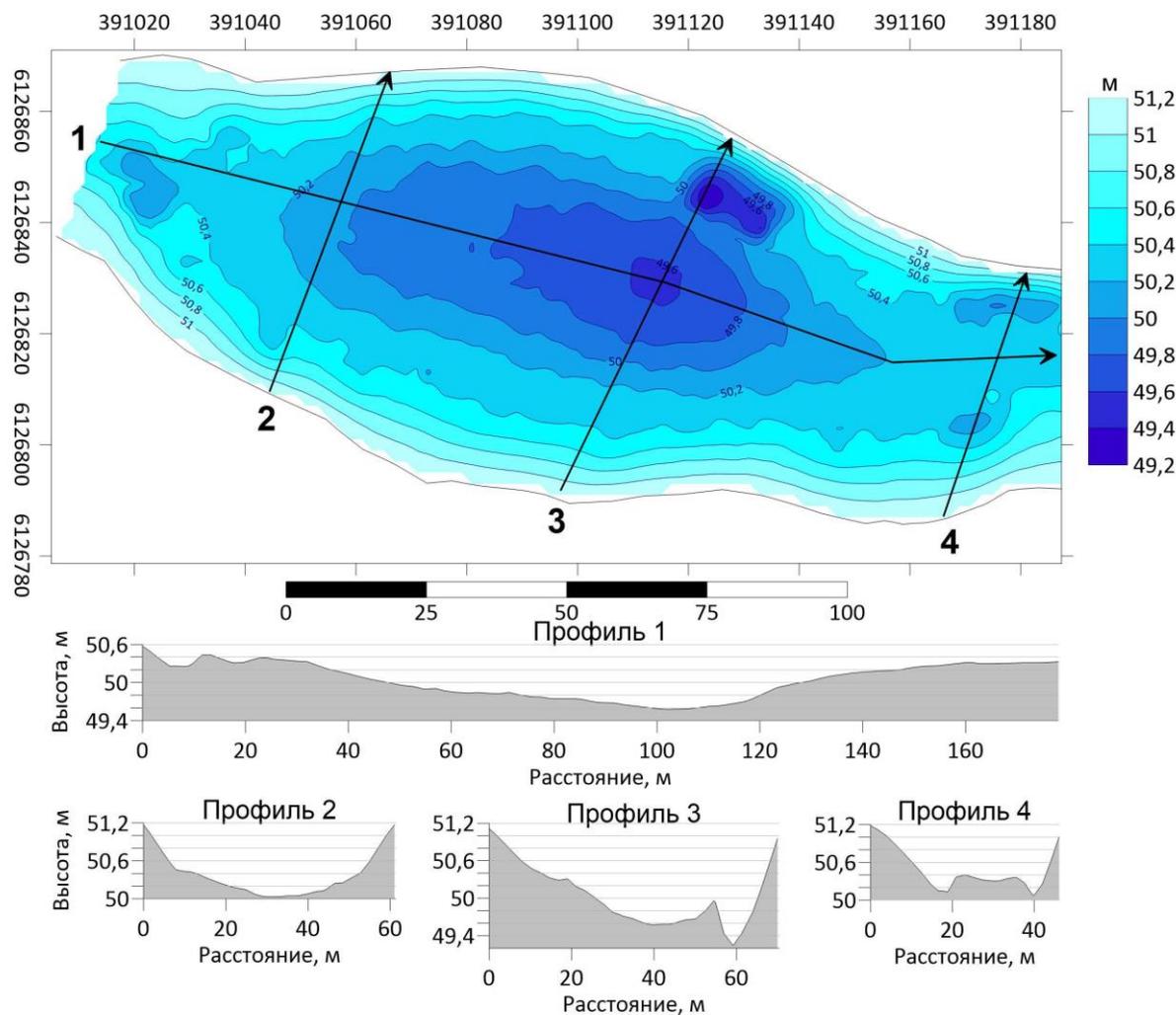


Рис. 5. Карта рельефа дна залива на водном участке полигона «Карбон-Поволжье»

Обследованный участок «условно» отделен от тела протоки минимальными глубинами («мелководьем») и представляет собой локальную западину. Рельеф дна спокойный, с плавным понижением к центру. У северного берега обнаружено приямочное понижение с максимальной зафиксированной глубиной на участке съемки в 49,13 м абс. БС (2,07 м). Средняя глубина на участке составляет 50,37 м абс. (0,8 м), а медианная – 50,29 м абс.

Также проводится мультиспектральная съемка водного участка карбонового полигона (рис. 6) синхронно с полевыми наблюдениями, которая позволит оценить вегетационные свойства, но уже водной растительности, а также проводить мониторинг водной фитомассы посредством расчета соответствующих индексов и их сопоставлением с данными полевых исследований.

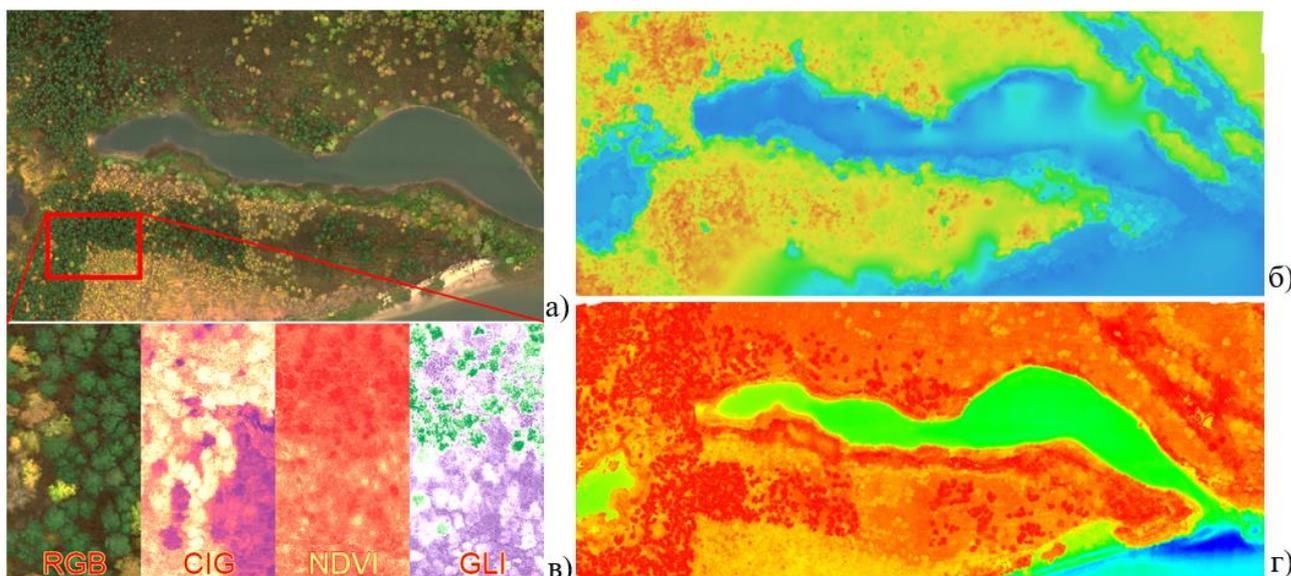


Рис. 6. Ортофотоплан (а), ЦМР (б), вегетационные индексы (в, г) на водный участок полигона «Карбон-Поволжье»

В пределах полигона по данным БПЛА предполагается разработка алгоритма автоматизированного распознавания крон деревьев с использованием системы OBIA eCognition Developer. Такие данные могут быть полезны при расчете AGB. При первых попытках возникла проблема, связанная с наличием искажений на ортофотопланах из-за низкой высоты съемки, а также их излишне высокой детальностью. Для решения этой задачи этого необходимо провести ряд экспериментальных съемок тестового участка с БПЛА, для определения оптимальной высоты, скорости съемки и пространственного разрешения ортофотоплана.

Благодарности

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной Казанскому федеральному университету для выполнения государственного задания в сфере научной деятельности, проект № FZSM-2022-0003

Литература

1. Gafurov A. (2021) The methodological aspects of constructing a high-resolution DEM of large territories using low-cost UAVs on the example of the Sarycum Aeolian Complex, Dagestan, Russia. *Drones* 5(1):7. doi:10.3390/drones5010007
2. Kozhevnikova M.V., Prokhorov V.E., Saveliev A.A. (2019) Predictive modeling for the distribution of plant communities of the order Quercetalia pubescenti-petraeae Klika 1933. *Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Biol.* 47:59–73. doi:10.17223/19988591/47/4
3. Gafurov A., Yermolayev O., Usmanov B. (2021) Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV. *InterCarto InterGIS* 27(2):327–339. doi:10.35595/2414-9179-2021-2-27-327-339
4. Täll K. (2020) Accuracy of mobile forest inventory application KatamTM Forest: evaluation of accuracy in different forest types and comparison to conventional inventory methods. Master Thesis. Second cycle, A2E. Alnarp: SLU, Southern Swedish Forest Research Centre.
5. Karpina M., Jarzabek-Rychard M., Tymków P. et al (2016) UAV-based automatic tree growth measurement for biomass estimation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* XLI-B8:685–688. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B8-685-2016
6. Li B., Xu X., Zhang L. (2020) Above-ground biomass estimation and yield prediction in potato by using UAV-based RGB and hyperspectral imaging. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 162:161–172. doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.02.013
7. Devia C.A., Rojas J.P., Petro E. (2019) High-throughput biomass estimation in rice crops using UAV multispectral imagery. *J. Intell. Robot. Syst.* 96(3-4):573–589. doi:10.1007/s10846-019-01001-5
8. Effiom A.E., van Leeuwen L.M., Nyktas P. (2019) Combining unmanned aerial vehicle and multispectral Pleiades data for tree species identification, a prerequisite for accurate carbon estimation. *J. Appl. Remote Sens.* 13(3):1. doi:10.1117/1.JRS.13.034530

9. Qiao L., Zhao R., Tang W. (2022) Estimating maize LAI by exploring deep features of vegetation index map from UAV multispectral images. *Field Crops Res.* 289:108739. doi:10.1016/j.fcr.2022.108739
10. d'Oliveira M., Broadbent E., Oliveira L. (2020) 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 Sens.* 12(11):1754. doi:10.3390/rs12111754
11. Lu J., Wang H., Qin S. (2020) Estimation of aboveground biomass of Robinia pseudoacacia forest in the Yellow River Delta based on UAV and Backpack LiDAR point clouds. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 86:102014. doi:10.1016/j.jag.2019.102014
12. Lian X., Zhang H., Xiao W. (2022) Biomass calculations of individual trees based on unmanned aerial vehicle multispectral imagery and laser scanning combined with terrestrial laser scanning in complex stands. *Remote Sens.* 14(19):4715. doi:10.3390/rs14194715
13. Moe K., Owari T., Furuya N. (2020) Comparing individual tree height information derived from field surveys, LiDAR and UAV-DAP for high-value timber species in Northern Japan forests 11(2):223. doi:10.3390/f11020223