

## ОРГАНИЗАЦИЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА НА ПОЛИГОНЕ «КАРБОН-ПОВОЛЖЬЕ»

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

*Казанский государственный университет, Казань, ул. Товарищеская, 5,  
420097, Россия, email: [busmanof@kpfu.ru](mailto:busmanof@kpfu.ru)*

В статье рассматривается порядок организации дистанционного мониторинга на лесном и водном участках полигона "Карбон-Поволжье". Рассматриваются и подчеркиваются преимущества и ограничения различных дистанционных методов и датчиков, включая оптические, мультиспектральные, радарные и лидарные, которые широко используются для оценки AGB и оценки CS. Представлены первые результаты полевых исследований на полигоне "Карбон-Поволжье". Используются различные методы дистанционного зондирования от эхолокации до мультиспектральной и лидарной съемки, определяются наиболее оптимальные данные дистанционного зондирования и методы их обработки. Также авторами разработана структура дистанционного мониторинга карбонового полигона, подчеркивается необходимость использования комплексного подхода для получения наиболее полной информации о депонировании углерода на разных масштабных уровнях. Показано, что именно использование разнообразных подходов к исследованию углеродного баланса позволит осуществлять мониторинг на карбоновых полигонах на высоком научном уровне.

**Ключевые слова:** карбоновый полигон, дистанционное зондирование, фотограмметрия, мультиспектральная съемка, воздушное лазерное сканирование.

Наиболее точными и надежными подходами для мониторинга потоков парниковых газов являются измерения методом вихревых ковариаций и исследования с помощью почвенных камер. Однако, когда нужно измерить суммарный поток парниковых газов обширной территории, используются различные дистанционные средства измерений, несмотря на относительно низкую точность. По сравнению с полевыми методами измерения основным преимуществом дистанционных систем является покрытие больших по площади территорий, а применение как космической и аэрофотосъемки позволяет проводить исследования различными сенсорами на разных масштабных уровнях.

Основная область использования дистанционных методов при мониторинге карбоновых полигонов – оценка Above-ground biomass, поскольку биомасса растительности играет решающую роль в понимании вклада экосистемы в глобальный углеродный цикл [1]. Для оценки биомассы и секвестрации углерода используются различные типы спутниковых данных,

как отдельно, так и в различных комбинациях. Основными являются: Вегетационные индексы MODIS [2]; Мультиспектральная съемка Sentinel-2 [3] и Landsat [4]; Радарные данные Sentinel-1 и ALOS2 (чаще всего в комбинации с Sentinel-2 и Landsat) [5, 6], Лидарная съемка [7, 8].

Для оперативной оценки биомассы используются полевые методы измерения, основанные, преимущественно, на двух подходах – наземные измерения и съемка с пилотируемых и беспилотных летательных систем [9, 10]. В число первых входят непосредственно замеры эталонных образцов и экстраполяция полученных результатов [11], так называемые классические методы, а также современные геодезические методы, которые, используются как для построения трехмерных моделей, так и в сочетании с классическим подходом - с оценкой объема древесной биомассы по эмпирическим формулам с учетом диаметра ствола, породного состава и высоты деревьев. Подобный подход реализован, например, в программном обеспечении Katam [12], использующим методы фотограмметрии и эмпирические формулы для оценки биомассы древостоя.

Для оценки биомассы древесных сообществ с большей производительностью используются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), оснащенные различной полезной нагрузкой. Наиболее распространена аэрофотосъемка, позволяющая получать цифровые модели местности с ортофотопланом территории [13]. Более продвинутый вариант – мультиспектральная съемка, позволяющая производить расчет различных вегетационных индексов и метрик, которые совместно с моделями местности успешно используются для вероятностной оценки биомассы [14].

Наиболее точных результатов по оценке объемов древесной биомассы можно добиться при использовании лидарной съемки с БПЛА, которая, проникая сквозь листья и ветви растений позволяет оценить объем и, как следствие, биомассу древесины выше поверхности [15]. Тем не менее, лидарная съемка с БПЛА имеет свои ограничения, поэтому, наилучших результатов при оценке биомассы можно добиться, совмещая мультиспектральную, лидарную съемку с БПЛА, а также НЛС [16].

Республика Татарстан является одним регионов, где осуществляется реализация пилотного проекта по созданию на территории России карбоновых полигонов. С 2022 г. на двух участках полигона “Карбон-Поволжье” (рис. 1) сотрудниками Казанского федерального университета ведутся научно-исследовательские работы по разработке и испытанию технологий контроля углеродного баланса. Участок 1 “Обсерватория” – расположен в широколиственном лесу, испытывающем антропогенное давление средней интенсивности и имеющем длинную историю освоения. Участок 2 “Саралы” – расположен на

территории Саралинского участка Волжско-Камского государственного природного биосферного заповедника, – наблюдательный участок за экосистемами Куйбышевского водохранилища.

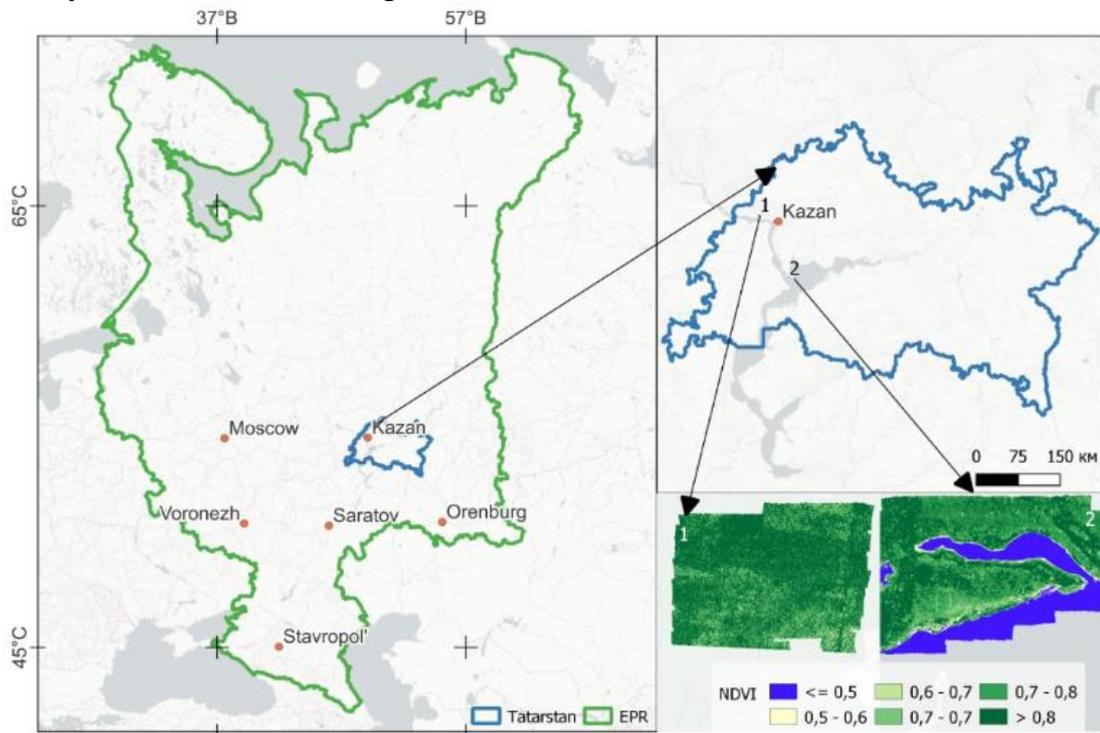


Рис. 1. Расположение лесного (1) и водного (2) участков полигона "Карбон-Поволжье"

Для исследования участков полигона использовался БПЛА Геоскан 401 Геодезия, с возможностью оснащения мультиспектральной камерой Micasense RedEdge-MX, и лидаром АГМ МС-1. На водном участке карбонового полигона для батиметрической съемки была использована ПВХ-лодка Флагман и эхолот-картплоттер Garmin GPS Map 178С.

Основными открытыми данными дистанционного зондирования для организации мониторинга на региональном уровне являются: данные мультиспектральной съемки Sentinel 2 MSI и Landsat 8, 9 OLI; радарные данные Sentinel 1 C-SAR; вегетационные индексы и биофизические параметры Copernicus и MODIS; фенологические метрики Suomi NPP and NOAA-20 VIIRS (VNP22Q2); глобальные ЦМР, модели земного покрова и землепользования, снимки высокого и сверхвысокого разрешения Google.

Работы по проведению дистанционного мониторинга полигона "Карбон-Поволжье" начаты в 2022 г. В результате анализа существующих дистанционных методов исследования карбоновых полигонов и оценки возможности их использования на территории полигона "Карбон-Поволжье", была составлена схема дистанционного мониторинга (рис. 2).

На основе *спутниковых данных* создается карта растительности с пространственным разрешением 100 м. Подход предполагает создание пространственной вероятностной модели растительных сообществ, на основе двух основных блоков. Первый блок касается моделирования условий местообитания на основе топографических индексов влажности, условий освещенности и распределения тепла, построенных по цифровой модели рельефа, типов почв. Второй блок подразумевает непосредственное распознавание растительности по серии разносезонных многолетних данных Landsat 8 и 9 и Sentinel 2. В качестве обучающей выборки и контрольных данных будут использованы данные геоботанических описаний из БД «Флора» [17].

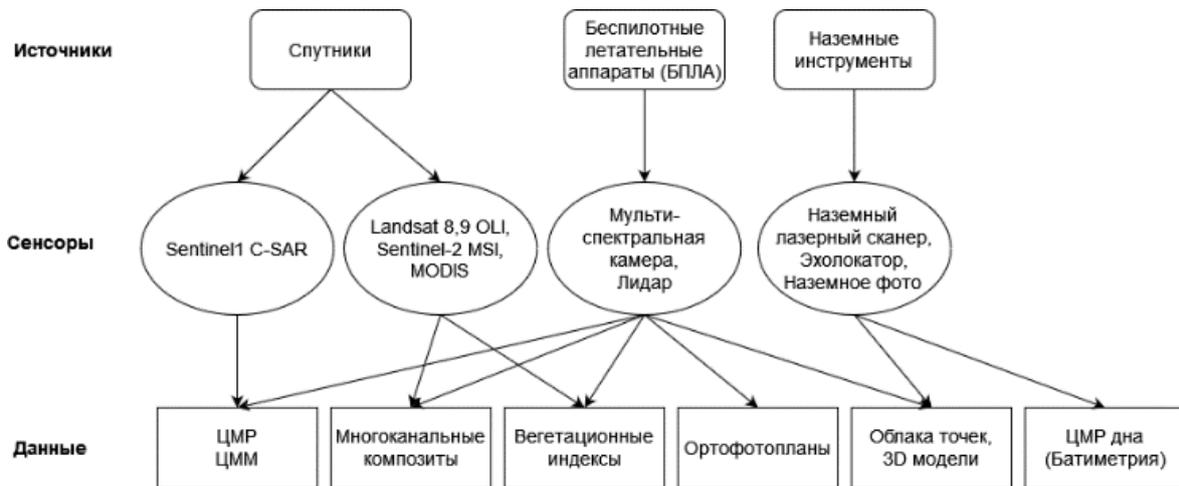


Рис. 2. Основные инструменты и данные для организации дистанционного мониторинга на полигоне “Карбон-Поволжье”

По результатам съемки БПЛА получены ортофотопланы высокого разрешения, по которым составлены высокодетальные планы участков полигона, а также карты видового состава растительного покрова. Проводится мультиспектральная съемка в 5 каналах, которая позволяет расчет различных вегетационных индексов (рис. 3а), которые активно используются при оценке биомассы и запасов углерода. Временные ряды наблюдений с заданной периодичностью формируются путем отбора наиболее репрезентативных индексов для всех периодов съемки.

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. 3б). Также проведена сегментация облака точек на отдельные деревья, что позволило получить морфометрические характеристики крон для последующего определения AGB.

Для получения рельефа дна, а также для технического обоснования установки площадки наблюдений на водном участке полигона "Карбон

Поволжья" проводится *батиметрическая съемка* участка протоки на территории Волжско-Камского государственного биосферного заповедника. По результатам съемки была построена карта глубин.

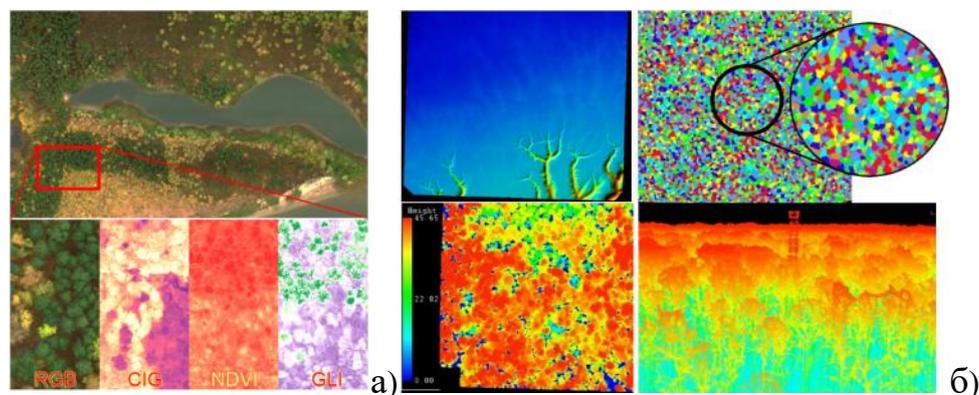


Рис. 3. Ортофотоплан, вегетационные индексы на водный участок (а), результаты лидарной съемки лесного участка полигона "Карбон-Поволжье" (б).

Таким образом, создана технологическая схема организации комплексной системы мониторинга баланса углерода на двух уровнях: локальном (в пределах полигона) и региональном (Республика Татарстан). Комплексность используемой схемы и учет разных уровней генерализации на всех этапах от сбора информации до представления результатов, а также учет международного опыта в оценке углеродного баланса позволит получать адекватные оценки секвестрационного потенциала изучаемых территорий, а также проводить экстраполяцию на другие регионы.

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

### Библиографические ссылки

1. Kozhevnikova M. V., Prokhorov V. E., Saveliev A. A. Predictive modeling for the distribution of plant communities of the order Quercetalia pubescenti-petraeae Klika 1933. Vestn. Tomsk. Gos. Univ. Biol. 2019. Vol. 47. P. 59–73.
2. 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 Sens. 2020. Vol. 12(18), 3000.
3. 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(2). P. 127–135.
4. Mei A., Salvatori R., Bassani C. Biomass evaluation by the use of Landsat satellite imagery and forestry data. Rendiconti Online Della Soc. Geol. Ital. 2017. Vol. 42. P. 66–69.

5. *Agata H., Aneta L., Dariusz Z.* Forest aboveground biomass estimation using a combination of Sentinel-1 and Sentinel-2 data. IGARSS 2018 – IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, P. 9026–9029.
6. *Laurin G. V., Balling J., Corona P.* Above-ground biomass prediction by Sentinel-1 multitemporal data in central Italy with integration of ALOS2 and Sentinel-2 data. *J. Appl. Remote Sens.* 2018. Vol. 12(1).
7. *Jiang F., Deng M., Tang J.* Integrating spaceborne LiDAR and Sentinel-2 images to estimate forest aboveground biomass in Northern China. *Carbon Balance Manag.* 2022. Vol. 17(1), 12.
8. *Torre-Tojal L., Bastarrika A., Boyano A.* Above-ground biomass estimation from LiDAR data using random forest algorithms. *J. Comput. Sci.* 2022. Vol. 58, 101517.
9. *Gafurov A.* 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* 2021. Vol. 5(1).
10. *Gafurov A., Yermolayev O., Usmanov B.* Creation of high-precision digital elevation models using the GNSS UAV. *InterCarto InterGIS.* 2021. Vol. 27(2). P. 327–339.
11. *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 Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2018. Vol. 107, 012083.
12. *Täll K.* 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, 2020.
13. *Karpina M., Jarzabek-Rychard M., Tymków P.* UAV-based automatic tree growth measurement for biomass estimation. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XLI-B8*, 2016. P. 685–688.
14. *Qiao L., Zhao R., Tang W.* Estimating maize LAI by exploring deep features of vegetation index map from UAV multispectral images. *Field Crops Res.* 2022. Vol. 289, 108739.
15. *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 Sens.* 2020. Vol. 12(11), 1754.
16. *Lian X., Zhang H., Xiao W.* 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.* 2020. Vol. 14(19), 4715.
17. *Prokhorov V., Rogova T., Kozhevnikova M.* Vegetation database of Tatarstan. *Phytocoenologia.* 2017. Vol. 47(3), P. 309–313.