

УДК 528.71

**ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ
РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА
(НА ПРИМЕРЕ КУЗБАССКОГО БОТАНИЧЕСКОГО САДА)**

Л.С. Миков, младший научный сотрудник (ФИЦ ИВТ)
О.А. Куприянов, к.б.н., научный сотрудник (ФИЦ ИВТ)
И.А. Жукова, ведущий специалист (ФИЦ ИВТ)
г. Кемерово

Сегодня беспилотные летательные аппараты (БПЛА) активно используются во многих сферах деятельности, например, сельское хозяйство, городское планирование, борьба со стихийными бедствиями, развитие умных городов, доставка товаров и т.д. Относительно невысокая стоимость, простота использования, возможность вертикального взлета и посадки, способность работать в зонах повышенного риска или труднодоступных районах, возможность нести на борту различное оборудование (мультиспектральные камеры, газоанализаторы и т.п.) делает БПЛА идеальным инструментом для экологического мониторинга [1]. Актуальным объектом такого мониторинга на сегодняшний день являются карбоновые полигоны - один или несколько участков земной поверхности с репрезентативными для данной территории рельефом, структурой растительного и почвенного покрова, созданные для реализации мероприятий, направленных на развитие научного, кадрового и инфраструктурного потенциалов в области разработки и испытаний технологий контроля баланса климатических активных газов природных экосистем [2]. В России насчитывается 18 таких полигонов и в ближайшее время планируется открытие новых, в том числе и в Кузбассе. Однако, пока идет согласование программы полигона, сотрудники Кемеровского филиала ФИЦ ИВТ испытывают технологии измерения, мониторинга и контроля с помощью БПЛА на территории Кузбасского ботанического сада.

В настоящее время в Кемеровском филиале ФИЦ ИВТ имеется БПЛА – DJI Matrice 300 RTK, а также мультиспектральная камера Parrot Sequoia и газоанализатор Sniffer4D v2. Такой БПЛА позволяет нести около 2,7 кг полезной нагрузки и может находиться в воздухе до 55 минут. Камера осуществляет съемку в 4 спектральных каналах – Зеленый (550 нм), Красный (660 нм), Крайний красный (735 нм), Ближний инфракрасный (790 нм). Разрешение снимков в данных каналах составляет 1280x960 пикселей. Кроме того, камера оснащена RGB сенсором с разрешением 4608x3456 пикселей. Газоанализатор позволяет проводить замеры газов: CO, CO₂, NO₂, SO₂, C_xH_y (углеводороды/легковоспламеняющиеся газы,

обычно это CH_4). Кроме того, газоанализатор измеряет температуру, влажность воздуха и атмосферное давление.

В качестве объекта исследования был выбран Кузбасский ботанический сад. Объект располагается в восточной части города Кемерово, площадь составляет около 186 га [3].

При планировании полетов, территория ботанического сада была разделена на 6 полигонов. Все это происходило с учетом времени полета БПЛА, мест взлета и посадки, рельефа. Для планирования маршрутов съемки использовалось приложение DJI Pilot 2. Отдельно стоит отметить тот факт, что камера Parrot Sequoia является универсальной и имеет собственное ПО, она программно не управляет с БПЛА DJI Matrice 300 (от дрона камера получает только питание). Поэтому, чтобы съемка велась корректно, в приложении были вручную добавлены параметры камеры (разрешение, размер сенсора, фокусное расстояние, минимальный интервал между съемками). Съемка осуществлялась с перекрытием 80% спереди, и 70% по бокам. Высота полета – 100 метров, скорость полета – 6 м/с, временной интервал между кадрами – 3 секунды. Общая длина маршрута съемки для шести полигонов составила 62 километра. Площадь отнятой территории ботанического сада, с учетом перемещений между точками взлета/посадки в первый день (7 июня 2023 года) составило около шести часов, в последующие дни, после оптимизации выбора мест взлета/посадки – четыре с половиной часа.

За лето/осень 2023 года было проведено 4 съемки: 7 июня, 18 июля, 8 августа и 3 октября. Всего было получено около 72 тысяч изображений (мультиспектральных и RGB), общим объемом 173 Гбайт.

Обработка полученных изображений выполнялась в программных комплексах Agisoft Metashape и Pix4Dmapper. Перед непосредственной обработкой изображений вручную удалялись неподходящие изображения, например, снимки пока БПЛА находился на земле, взлетал/совершал посадку и т.п. После загрузки снимков в ПО выполнялся стандартный граф обработки: выравнивание снимков (поиск соответствий и связующих точек между изображениями, выравнивание изображений, генерация разряженного облака точек); создание плотного облака точек; создание текстуированной трехмерной модели; построение цифровой модели местности; построение ортофотоплана, а также расчетов индексов (на основе мультиспектральных ортофотопланов).

Для оценки состояния растительности на территории ботанического сада были рассчитаны вегетационные индексы, на основе снимков, полученных с мультиспектральных сенсоров камеры. В начале был рассчитан NDVI, этот индекс широко используется для оценки здоровья растительности и ее фотосинтетической активности. Более высокие

значения NDVI обычно указывают на более здоровую и плотную растительность. Примеры карт NDVI представлены на рисунках 1 - 2.

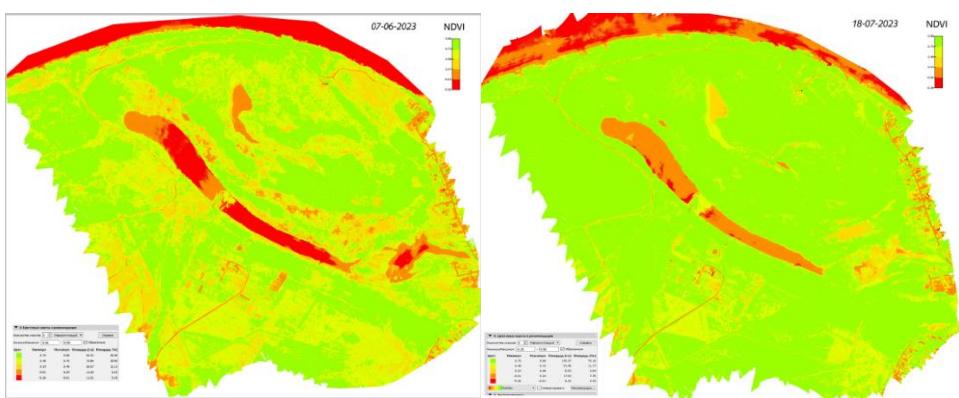


Рисунок 1 – Карты NDVI. Слева – 07-06-2023 г., справа – 18-07-2023 г.

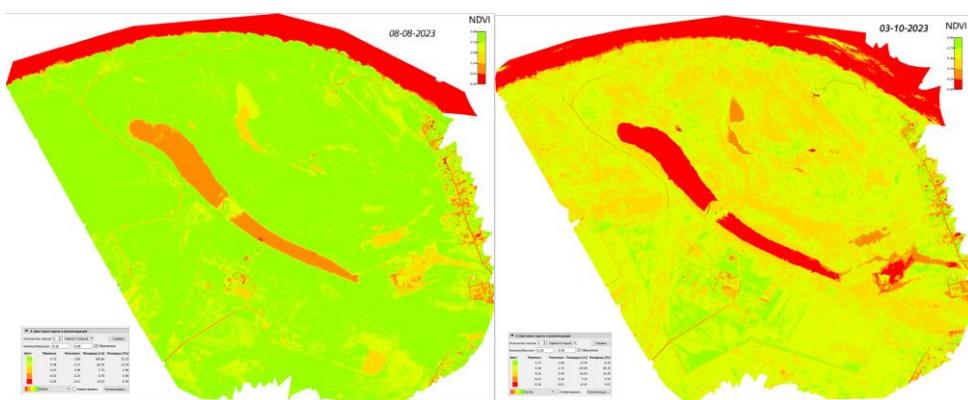


Рисунок 2 – Карты NDVI. Слева – 08-08-2023 г., справа – 03-10-2023 г.

Зеленым цветом (значения NDVI 0,73-0,98) отмечены области с густой здоровой растительностью, желтым цветом (значения NDVI 0,48-0,73) – разряженная растительность, оранжевым (значения NDVI 0,24-0,48) – сухая растительность, красным (значения менее 0,24) – территории без растительности. В таблицах 1 и 2 представлены значения площадей (в га и %) для каждого класса NDVI.

Таблица 1 – Площадь территории для каждого диапазона значений NDVI (в га)

Значение NDVI	Площадь территории (в га)			
	07-06-2023	18-07-2023	08-08-2023	03-10-2023
0,73-0,98	93,31	170,27	160,69	17,79
0,48-0,73	72,89	27,4	29,76	125,08
0,24-0,48	26,07	8,93	7,72	52,04
<0.24	22,76	26,15	24.02	17,9

Таблица 2 – Площадь территории для каждого диапазона значений NDVI (в %)

Значение NDVI	Площадь территории (в % от общей площади)			
	07-06-2023	18-07-2023	08-08-2023	03-10-2023
0,73-0,98	43,4	73,16	72,32	8,36
0,48-0,73	33,9	11,77	13,39	58,78
0,24-0,48	12,13	3,84	3,48	24,45
<0.24	10,58	11,23	10,81	8,41

Наибольшая доля (73%) густой и здоровой растительности (значения NDVI 0,73-0,98) наблюдается в июле и августе месяце. Отдельно стоит отметить июнь месяц. Доля зеленой биомассы составляет лишь 43,4%. Это связано с засушливым маев, тогда выпало всего 5 мм осадков (11% от нормы), а также с высокими температурами воздуха в начале июня 2023 года (во время съемки 7 июня 2023 температура воздуха достигала +35,7 С°). В июле месяце ситуация с осадками наладилась – выпало 87 мм (112% от нормы). Все это положительно повлияло на рост растительности.

Минимальная доля (8%) зеленой биомассы наблюдается в октябре, также увеличивается доля разряженной и сухой растительности (58% и 24% соответственно). Это связано с отрицательными температурами воздуха в конце сентября и начале октября. Так, например, 2 октября ночью температура воздуха составляла -6,5 С°.

Кроме NDVI, были рассчитаны индексы PSRI для оценки старения растений и MTVI2, для определения содержания хлорофилла в листьях.

На основе полученного ортофотоплана Кузбасского ботанического сада было проведено зонирование территории по степени антропогенного влияния. Были выделены зоны зоны интенсивного, среднего и слабого хозяйственного воздействия, зона прекратившегося хозяйственного воздействия (бывшие земли совхоза «Суховский») и естественные малонарушенные местообитания. В естественных местообитаниях были выделены по контрольным геоботаническим описаниям семь типов растительности.

Наибольшую площадь (38,5 га) занимают смешанные мелколиственные леса (березово-осиновые и тополово-осиновые леса). Кустарниковый ярус представлен единичными экземплярами *Rosa acicularis*, *Viburnum opulis*, *Padus avium*. В травяном ярусе представлены мезофильные и гигромезофильные виды: *Cacalia hastata*, *Aegopodium podagraria*, *Equisetum pratense*, *Equisetum sylvaticum*, *Athyrium filix-femina*.

Так же широко распространены чистые осиновые леса (25,6), распространенные по возвышающимся элементам рельефа. В подлеске и кустарниковом ярусе представлены *Viburnum opulis*, *Salix triandra*, *Caragana frutex*, *Ribes nigrum*, *Spiraea media*, *Rosa acicularis*. В состав

травяного яруса входят *Athyrium filix-femina*, *Equisetum pretense*, *E. sylvaticum*, *Thalictrum minus*, *Aconitum volubile*, *Urtica dioica*.

К северо-востоку от оз. Суховское расположены заболоченные ивняки (*Salix alba*, *S. triandra*) (17,3 га). В травянистом ярусе представлены *Equisetum hyemale*, *E. pallustre*, *Phragmites austriale*. Околоводные болотные сообщества вокруг оз. Суховского занимают 12,8 га. Представлены зарослями *Equisetum fluviatile*, *Eleocharis palustris*, *Scirpus lacustris*, *S. sylvaticus*, *Scholochloa festucaceae*, *Carex pseudocyperus* с участием *Alisma plantago-aquatica*, *Typha latifolia*, *Butomus umbellatus*. В воде и по берегу озера встречаются *Potamogeton natans*, *Acorus calamus*.

Редко встречаются заболоченные березняки (5,6 га). Для данных сообществ характерна зачоккаренность (*Carex caespitosa*), подрост необильный. В подлеске представлены *Padus avium*, *Salix triandra*, в травянистом ярусе *Filipendula ulmaria*, *Phragmites australis*.

Разреженные вторичные березовые леса на залежах занимают 8,6 га. Наиболее часто встречаются такие виды как *Elytrigia repens*, *Euphorbia virgata*, *Berteroa incana*, *Lepidium densiflorum*, *L. ruderale*, *Sisymbrium loeselii*.

На плоских элементах рельефа расположены суходольные луга (15,3 га). Основными доминантами являются *Dactylis glomerata*, *Phleum pratense*, *Festuca pratensis*, *Elytrigia repens*.

Предложенный нами подход к моделированию процессов карбонового полигона на экспериментальном комплексе Кузбасского ботанического сада с помощью БПЛА показал, что он может стать основой для разработки технологий измерения, мониторинга и контроля карбонового полигона. Кроме того, комбинированное использование данных, полученных с помощью мультиспектральной камеры и газоанализатора, позволяет проводить комплексную оценку его состояния и разрабатывать новые модели с учетом натурных измерений на основе средств ИИ.

Список литературы:

1. Quamar, M.M.; Al-Ramadan, B.; Khan, K.; Shafiullah, M.; El Ferik, S. Advancements and Applications of Drone-Integrated Geographic Information System Technology—A Review // Remote Sens. 2023, vol. 15, article 5039. <https://doi.org/10.3390/rs15205039>
2. Карбоновые полигоны Российской Федерации [Электронный ресурс].-2020.-URL: <https://carbon-polygons.ru/> (дата обращения 27.02.2024)

Информация об авторах:

Миков Леонид Сергеевич, младший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, 650025, г. Кемерово, ул. Рукавишникова, д.

21, mikov@ict.sbras.ru

Куприянов Олег Андреевич, к.б.н., научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр информационных и
вычислительных технологий, 650025, г. Кемерово, ул. Рукавишникова, д.
21, kuproa@gmail.com

Жукова Ирина Анатольевна, младший научный сотрудник,
Федеральный исследовательский центр информационных и
вычислительных технологий, 650025, г. Кемерово, ул. Рукавишникова, д.
21, kembict@gmail.com