

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ RESEARCH METHODS

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА НА БАЗЕ БПЛА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПЕРАТИВНОГО МОНИТОРИНГА ООПТ

А.Е. Илюхин^{*}, К.Д. Бухаров^{**}, Д.В. Добрынин^{***}, В.А. Соколов^{****},
А.В. Родин^{*****}

*Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет), Россия
e-mail: *ilyukhin.ae@mipt.ru, **bukharovkd@gmail.com, ***ddobrynin@yandex.ru,
****vicsokol@mail.ru, *****rodin.av@mipt.ru*

Поступила: 30.11.2021. Исправлена: 11.02.2022. Принята к опубликованию: 28.02.2022.

В работе представлены новые технические решения на базе беспилотных летательных аппаратов, направленные на мониторинг особо охраняемых природных территорий, а также первые результаты, полученные в ходе их испытаний на пилотных ООПТ. Особенностью многих ООПТ является их удаленность и труднодоступность. Кроме того, каждая ООПТ отличается задачами и особенностями применения технических средств мониторинга. Разработанный комплекс предназначен для установки на беспилотный летательный аппарат грузоподъемностью до 40 кг и конфигурируется под решение задач выбранной ООПТ. Отдельные модули комплекса могут быть установлены на БПЛА более легкого класса. Отдельные модули в ходе работ были апробированы на различных беспилотных платформах. Комплекс позволяет получать изображения подстилающей поверхности в радиолокационном диапазоне, производить дистанционное считывание данных фотоловушек по каналам беспроводной связи, производить измерения концентрации атмосферных примесей по маршруту полета. БПЛА, оборудованный программно-аппаратным комплексом оперативного мониторинга, позволяет решать задачи экологического мониторинга, учета миграции животных, выявлять вырубки и другие признаки несанкционированной деятельности человека на территории ООПТ, автоматизировать сбор данных их для последующей обработки и немедленного оповещения заинтересованных служб.

Ключевые слова: БПЛА, мониторинг, особо охраняемые природные территории, парниковые газы, радиолокационные изображения, фотоловушки

<https://dx.doi.org/10.24412/cl-31646-2686-7117-2022-30-216-228>

Введение

Особо охраняемые природные территории (ООПТ) отличаются от других объектов хозяйственной деятельности Российской Федерации своей протяженностью и удаленностью от административных центров. Услуги космического мониторинга на сегодняшний день не обеспечивают оперативности, достаточной для решения задач обнаружения очагов природных пожаров и угроз экологических бедствий на ранней стадии, а также пресечение несанкционированной деятельности человека на ООПТ. Развитие средств идентификации и локализации очагов природных пожаров в настоящий момент находится на таком уровне, когда очаги возгорания могут быть ликвидированы минимальными си-

лами и средствами, но отсутствует возможность их своевременного выявления. Имеющиеся средства мониторинга фоновое загрязнение атмосферы и водных объектов промышленными выбросами не позволяют оперативно отслеживать и своевременно ликвидировать источники загрязнений. Отсутствие развитой инфраструктуры, в том числе мобильной и проводной связи, на значительной части ООПТ препятствует своевременной передаче информации критической важности компетентным службам. Сбор данных фотофиксации осуществляется вручную и зависит от человеческого фактора, что может негативно влиять на эффективность решения вышеуказанных задач. Кроме этого, непрерывно растут объемы данных фотоловушек (Kaays, Slauson, 2008; Kaays et al., 2009). В России регулярно проводятся исследовательские эксперименты по применению фотоловушек (Сидорчук и др., 2007; Сидорчук, Рожнов, 2009; Желтухин и др., 2011; Сутырина и др., 2011; Рожнов и др., 2012; Погодин, Марков, 2013; Желтухин, Желтухин, 2014; Волкова, Волков, 2015; Покровская и др., 2016; Огурцов, 2017; и др.).

Целью работы является создание экспериментального образца модульного программно-аппаратного комплекса оперативного мониторинга (ПАКОМ) природных территорий, который может быть установлен на беспилотные летательные аппараты различных классов и решать основные задачи мониторинга ООПТ при помощи различных средств дистанционного зондирования (Лабутина, Балдина, 2011).

Актуальность проекта обусловлена задержкой в получении оперативной спутниковой информации необходимого участка территории, отсутствием сетей и каналов связи на территории ООПТ и значительная доля ручного труда сотрудников заповедника для получения данных фотофиксации. Исходя из этих ограничений, требуется организация оперативного считывания информации с удалённых пунктов фотофиксации (фотоловушек) для последующей тематической обработки на локальных центрах обработки данных с применением технологий искусственного интеллекта, а также получение дополнительных данных оперативного мониторинга подстилающей поверхности и содержания атмосферных примесей. Это позволит существенно повысить информативность обработки и снизить время задержки до уровня, близкого к режиму реального времени. Применение технологий искусственного интеллекта для идентификации очагов природных пожаров по косвенным признакам на основе оперативного анализа информации спутникового мониторинга, уточненных данными БПЛА и наземных средств наблюдения, позволит анализировать изменение обстановки и в оперативном режиме прогнозировать развитие событий. Развитие комплекса данных мероприятий должно позволить решить основные проблемы мониторинга ООПТ (Harris et al., 2010):

- ускорить каталогизацию животного мира, за счет сокращения сроков сбора и обработки данных;
- уменьшить количество ошибок из-за исключения человеческого фактора;
- объединить собранные массивы данных в единую геоинформационную систему (Kelly, 2008);
- существенно сократить издержки на обслуживание существующих систем фотофиксации.

Мониторинг водных объектов на основе данных спутников ДЗЗ и БПЛА позволит своевременно обнаруживать и ликвидировать источники загрязнений и контролировать водных баланс природных территорий. Прецизионные измерения концентрации парниковых газов и техногенных выбросов в атмосферном воздухе при помощи компактных мобильных станций мониторинга на основе лазерной и гетеродинной спектроскопии (Zenevich et al., 2019, 2021) и оперативная обработка полученных данных на основе технологий искусственного интеллекта позволят осуществлять оперативный мониторинг фоновых загрязнений атмосферы и решать задачу локализации и определения источников выбросов. Применение машинного обучения на локальных центрах обработки данных в пилотных зонах должно разгрузить рабочий персонал и продемонстрировать качественно новый уровень обработки данных в целях эффективного решения задач сбережения природоохраненных зон.

В связи с тем, что получение данных с фотоловушек не ограничивается только получением данных о биоразнообразии данной территории (Karanth, Nichols, 1998; MacKenzie et al., 2005; Trolle et al., 2007; Stein et al. 2008), вопрос развития обсуждаемых в настоящей работе технологий является актуальным для широкого спектра приложений.

Материал и методы

В составе ПАКОМ используется следующее оборудование:

– радиолокатор с синтезированной апертурой X-диапазона. Характеристики радиолокатора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики радиолокатора X-диапазона

Table 1. X-band radar characteristics

Параметр	Значение
Габариты антенны (без обтекателя), мм	170 × 350 × 65
Масса, кг	4.6
Несущая частота, ГГц	9.6
Ширина полосы, МГц	190
Антенная решетка (азимут x угол места), конфигурация, число элементов	1 × 4 на каждую поляризацию
Ширина диаграммы направленности передающей антенны по азимуту на уровне -3 дБ, градус	8
Ширина диаграммы направленности передающей антенны по углу места на уровне -3 дБ, градус	18
Пиковая изучаемая мощность, Вт	200
Поляризации, передача/прием	ГГ, ВВ
Кол-во одновременно используемых сочетаний поляризаций, ед.	1
Зондирующий сигнал, тип	ЛЧМ
Длительность зондирующего сигнала, мкс	0.5...5
Разрядность АЦП, бит	12
Электронное сканирование лучом по углу места (конфигурация 1 × 4), градус	±20
Частота повторения импульсов	400...10000
Энергопотребление, макс., Вт	100

– радиолокатор с синтезированной апертурой С-диапазона. Характеристики радиолокатора приведены в таблице 2.

Таблица 2. Характеристики радиолокатора С-диапазона

Table 2. C-band radar characteristics

Параметр	Значение
Габариты (без обтекателя), мм	412 × 316 × 55
Масса, кг	2.75
Несущая частота, ГГц	5.4
Ширина полосы, МГц	120
Антенная решетка (азимут × угол места), конфигурация, число элементов	1 × 8, 1 × 6, 1 × 4, 1 × 2
Ширина диаграммы направленности передающей антенны по азимуту на уровне -3 дБ, градус	8.5
Ширина диаграммы направленности передающей антенны по углу места на уровне -3 дБ, конфигурация 1 × 8 ,градус	9
Пиковая изучаемая мощность, Вт	20
Поляризации, передача/прием	ГГ, ГВ, ВГ, ВВ
Кол-во одновременно используемых сочетаний поляризаций	1–4
Зондирующий сигнал (14-разрядный ЦАП)	ЛЧМ или ФМ, программируемый
Длительность зондирующего сигнала, мкс	2...25
Принимаемый сигнал, синфазный/квадратурный каналы, бит	8/8
Электронное сканирование лучом по углу места (конфигурация 1 × 8), градус	±7
Частота повторения импульсов	2000...20000
Энергопотребление, макс., Вт	25

– аппаратура сбора данных с наземных пунктов фотофиксации (фотоловушек) предназначена для удаленного сбора данных с наземных пунктов фотофиксации, при этом обмен данными происходит на частоте – 2,4 ГГц. Характеристики аппаратуры сбора данных приведены в таблице 3.

Таблица 3. Характеристики аппаратуры сбора данных

Table 3. Data acquisition equipment characteristics

Параметр	Значение
Габариты (В × Ш × Г), мм	200 × 180 × 180
Масса, кг	1
Несущая частота, ГГц	2.4
Ширина полосы, МГц	20 и 40
Дальность считывания данных, не менее, м	1000
Максимальная ширина диаграммы направленности передающей антенны в конусе, градусы	60
Входное напряжение электропитания, В	от 8 до 30
Максимальное энергопотребление, Вт	22

– управляющий компьютер – объединяет интерфейсы управления и обмена данными целевой нагрузки, обрабатывает исходные данные и архивирует

данные дистанционного зондирования. Компьютер позволяет обмениваться с оборудованием по каналам – Ethernet, RS-485, USB. Напряжение питания 9–48 В, потребляемая мощность до 360 Вт.

При обработке данных дистанционного зондирования применяются методы синтеза и автофокусировки радиолокационных изображений, доработанные в целях применения их на траекторно-нестабильном носителе. Для сбора данных и передачи телеметрической информации используются технологии скоростной беспроводной связи по стандарту Wi-Fi (IEEE 802.11) и беспроводной связи по технологии модуляции LoRa.

Результаты

В качестве носителя использовался вертолет Robinson R66. На рис. 1 изображен комплекс на борту вертолета.



Рис. 1. Оборудование, установленное на вертолете «Robinson-66».

Fig.1. Equipment installed on the Robinson-66 helicopter.

Радиолокационные снимки были получены с помощью радиолокатора бокового обзора С-диапазона. На радиолокационном изображении (рис. 2) хорошо выделяются различные ярусы растительности, опоры линий электропередач и другие металлические объекты.

В период с 8–10 ноября 2021 г. на территории Центрально-Лесного государственного биосферного заповедника (Тверская область, Нелидовский район, п/о Заповедник) были проведены испытания модуля сбора данных ПАКОМ ООПТ. Аппаратура была установлена на БПЛА «Ирбис-424». На рис. 3 представлен БПЛА «Ирбис-424» с установленным модулем связи.

В ходе полета аппарат зависал над фотоловушкой на высоте 150 метров, что способствовало установлению скоростного беспроводного соединения с фотоловушкой и осуществлению считывания данных со скоростью 130 Мбит/с, что позволило загрузить 200 Мбайт фотоданных на модуль связи.

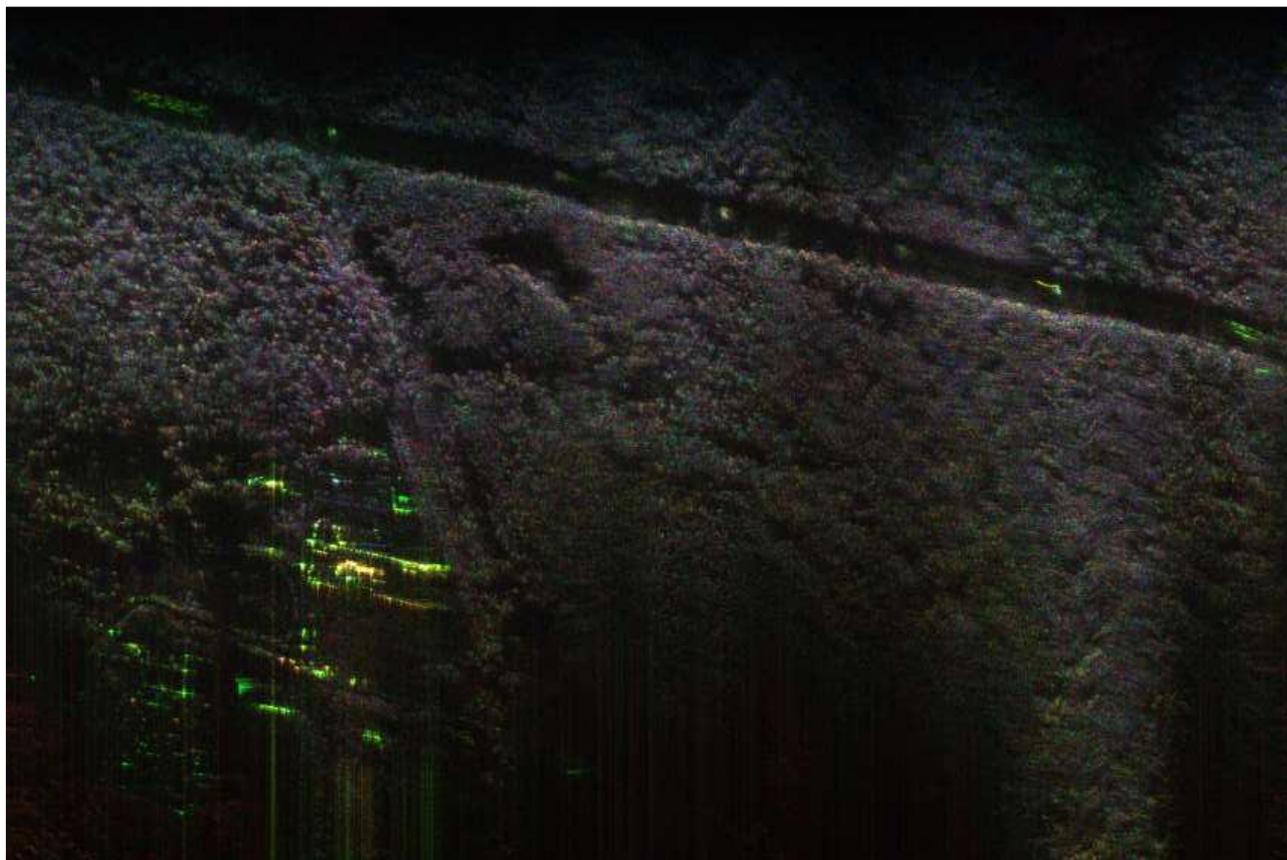


Рис. 2. Радиолокационное изображение подстилающей поверхности.
Fig. 2. Radar image of the underlying surface.

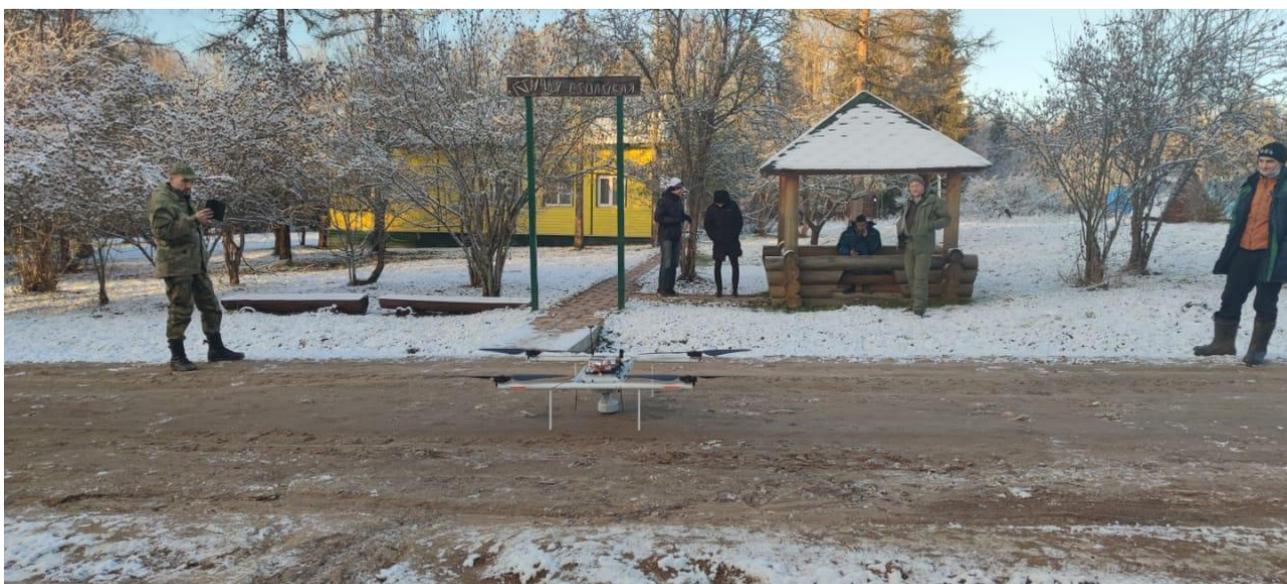


Рис. 3. БПЛА «Ирбис-424» с установленным модулем сбора данных с фотоловушек.
Fig. 3. UAV "Irbis-424" with installed module for collecting data from camera traps.

На рис. 4 представлено изображение с автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора, демонстрирующее полет БПЛА по маршруту.

По результатам летных испытаний системы были собраны изображения фотоловушек в количестве нескольких десятков.

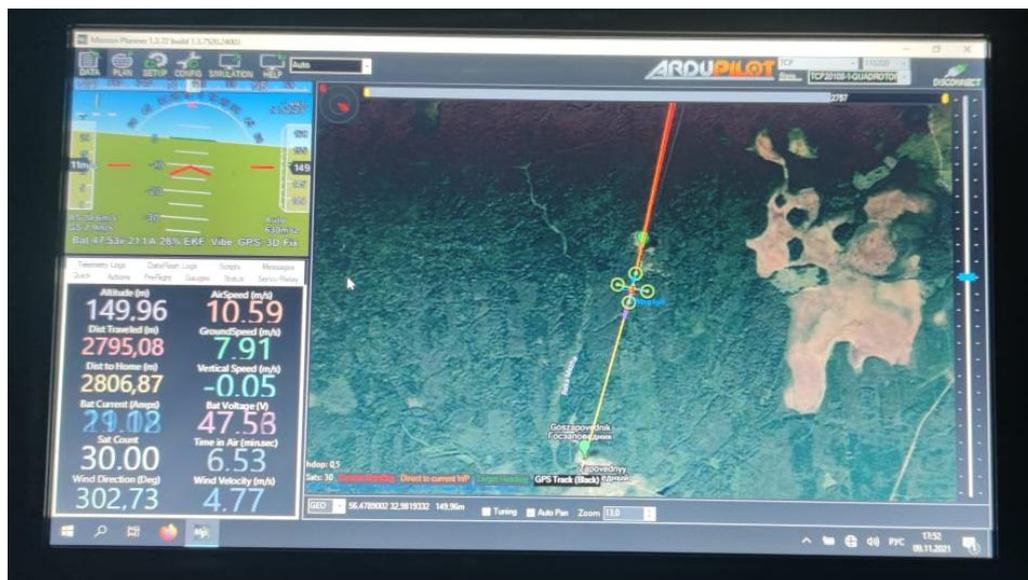


Рис. 4. Экран оператора БПЛА.

Fig. 4. UAV operator screen.

Обсуждение

Представленные результаты демонстрируют возможности ПАКОМ для решения задач ООПТ.

ПАКОМ на БПЛА позволяет оперативно получить изображения подстилающей поверхности. На таких снимках хорошо видны просеки, перепады высот, болота, металлические объекты (вышли ЛЭП, заборы, транспортные средства и т.д.). В отличие от оптических систем качество снимков не зависит от высоты полета, метеоусловий и бликов на оптике. Большая полоса захвата позволяет захватить значительную территорию за один проход.

Система сбора данных с фотоловушек позволила оперативно собрать данные с доработанных фотоловушек, используемых в сети ООПТ, и показала возможность ее применения для решения задач сбора данных с больших площадей. Данное техническое решение позволит существенно сократить время сбора данных.

В настоящий момент проводятся испытания лазерного газоанализатора, позволяющего измерять концентрации метана по маршруту полета (Мещеринов и др., 2020). Модуль газоанализатора ПАКОМ, установленного на БПЛА «Ирбис-424», представлен на рис 5.

Полученные результаты показали свою актуальность для решения задач ООПТ. В отличие от отдельных модулей, ПАКОМ должен быть установлен на БПЛА грузоподъемностью не менее 40 кг. В качестве носителя рассматривается новый перспективный БПЛА вертолетного типа «БАС-200». Компоновка комплекса при установке на шасси представлена на рис. 6.

На рис. 7, 8 и 9 изображен ПАКОМ в конфигурациях с РЛС С-диапазона и РСЛ X-диапазона, установленные на шасси БАС-200.

Данное решение позволит оперативно получить комплексные данные дистанционного зондирования, в том числе решать задачи мониторинга ООПТ на большом удалении от точки базирования.



Рис. 5. Модуль газового анализа на БПЛА «Ирбис-424».
Fig. 5. Gas analysis module on the UAV "Irbis-424".

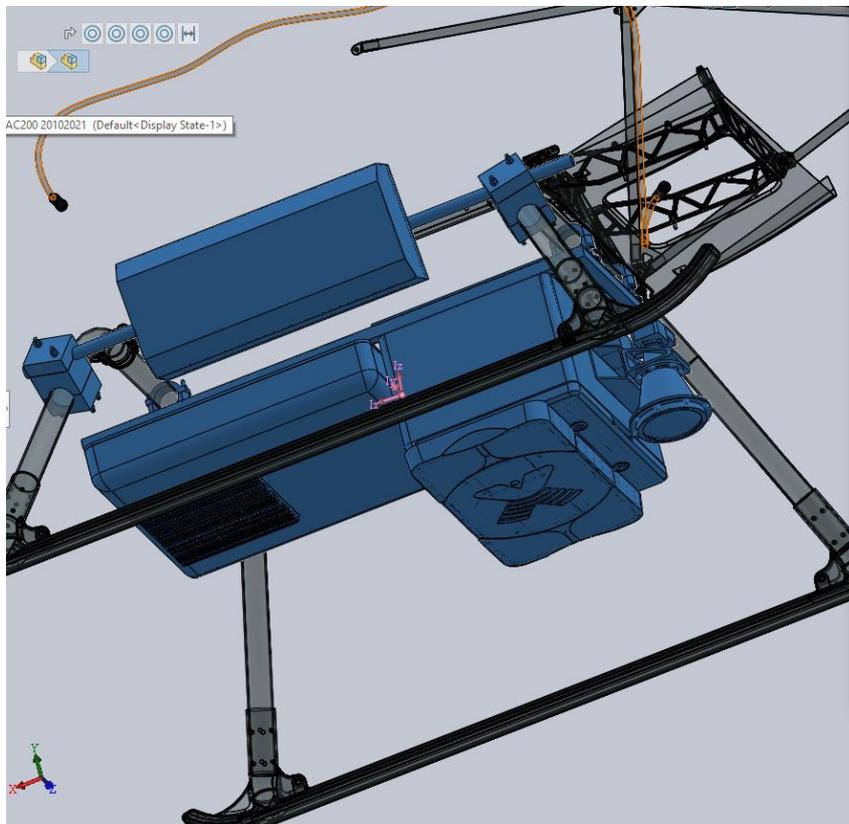


Рис. 6. 3-D модель оборудования, установленного на шасси БАС-200.
Fig. 6. 3-D model of the equipment installed on the BAS-200 landing gear.



Рис. 7. Контейнер с оборудованием и антенна РЛС С-диапазона.
Fig. 7. Equipment container and C-band radar antenna.



Рис. 8. Контейнер с оборудованием и антенна РЛС X-диапазона.
Fig. 8. Equipment container and X-band radar antenna.



Рис. 9. Контейнер с оборудованием и модуль газоанализатора.
Fig. 9. Equipment container and gas analyzer module.

Заключение

В МФТИ разработаны и апробированы на территории пилотных ООПТ элементы системы оперативного мониторинга, включая программно-

аппаратный комплекс на базе БПЛА грузоподъемностью от 5 до 40 кг. Комплекс может применяться для дистанционного зондирования подстилающей поверхности, контроля фонового содержания атмосферных примесей, включая парниковые газы, а также для оперативного считывания информации фотоловушек. Благодаря модульному принципу построения комплекса в качестве носителей могут применяться БПЛА различных классов, в зависимости от специфики расположения ООПТ и решаемых задач.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Программы создания и развития Центра компетенций Национальной технологической инициативы на базе МФТИ по направлению «Искусственный интеллект».

Список литературы

Волкова Е.В., Волков А.Е. 2015. Опыт использования фотоловушек при изучении крупных наземных млекопитающих национального парка «Онежское Поморье» // Увидеть и сохранить. Экологическое просвещение и познавательный туризм на ООПТ. Сб. статей. Москва. ЭкоЦентр «Заповедники». С. 49–53.

Желтухин А.С., Желтухин С.А. 2014. О суточной активности крупных млекопитающих по данным регистрации фотоловушек «Resonux» // Современные тенденции развития особо охраняемых природных территорий. Мат. научно-практ. конференции, посвященной 20-летию заповедника «Полистовский». Великие Луки. С. 59–64.

Желтухин А.С., Пузаченко Ю.Г., Волков В.П., Котлов И.П., Желтухин С.А. 2011. Использование фотоловушек Resonux для мониторинга популяций крупных млекопитающих в Центрально-Лесном заповеднике // Дистанционные методы исследования в зоологии. Мат. научной конференции. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 34.

Лабутина И.А., Балдина Е.А. 2011. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие. Москва: WWF России. 90 с.

Мещеринов В.В., Спиридонов М.В., Казаков В.А., Родин А.В. 2020. Концепция инфракрасного дистанционного газоанализатора лидарного типа для мониторинга антропогенных загрязнений // Квантовая электроника. 50(11). С. 1055–1062.

Огурцов С.С., Волков В.П., Желтухин А.С. 2017. Обзор современных способов хранения, обработки и анализа данных с фотоловушек в зоологических исследованиях // Nature Conservation Research. Заповедная наука. 2(1). С. 73–98.

Погодин Н.Л., Марков Н.И. 2013. Анализ структуры населения лося по данным учета фотоловушками // Сохранение разнообразия животных и охотничье хозяйство. Мат. 5-й междунар. научно-практ. конференции. Москва. С. 315–317.

Покровская Л.В., Жаков В.В., Покровский И.Г. 2016. Использование маркировочных деревьев и фотоловушек для оценки относительной численности бурого медведя // Териофауна России и сопредельных территорий. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 334.

Рожнов В.В., Найдено С.В., Эрнандес-Бланко Х.А., Лукаревский В.С., Сорокин П.А., Маслов М.В., Литвинов М.Н., Котляр А.К. 2012. Сезонные изменения кормовой базы Амурского тигра: опыт применения матрицы фотоловушек // Зоологический журнал. Т. 91(6). С. 643–647.

Сидорчук Н.В., Волченко А.Е., Рожнов В.В. 2007. Опыт использования фотоловушек при изучении поведенческой экологии барсука *Meles meles* // Териофауна России и сопредельных территорий (VIII съезд Териологического общества). Мат. междунар. совещания. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 455.

Сидорчук Н.В., Рожнов В.В. 2009. Использование поселений европейским барсуком *Meles meles* в Дарвинском заповеднике // Поведение и поведенческая экология млекопитающих. Мат. научно-практ. конференции. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 30.

Сутырина С.В., Райли М.Д., Гудрич Д.М., Серёдкин И.В., Микелл Д.Г. 2011. Мониторинг группировки тигра южной части Сихотэ-Алинского заповедника с помощью фотоловушек // Дистанционные методы исследования в зоологии. Мат. научной конференции. М.: Товарищество научных изданий КМК. С. 92.

Harris G., Thompson R., Childs J.L., Sanderson J.G. 2010. Automatic storage and analysis of camera trap data // *Bulletin of the Ecological Society of America*. Vol. 91. P. 352–360.

Karant K.U., Nichols J.D. 1998. Estimation of Tiger Densities in India Using Photographic Captures and Recaptures // *Ecology*. Vol. 79(8). P. 2852–2862.

Kays R.W., Slauson K.M. 2008. Remote cameras / R.A. Long, P. MacKay, W.J. Zielinski, and J.C. Ray (eds.). *Noninvasive Survey Methods for Carnivores*. Island Press, Washington, DC. P. 110–140.

Kays R.W., Kranstauber B., Jansen P., Carbone C., Rowcliffe M., Fountain T., Tilak S. 2009. Camera traps as sensor networks for monitoring animal communities // *Local Computer Networks, 2009. LCN 2009. IEEE 34th Conference*. P. 811–818.

Kelly V.J. 2008. Design, evaluate, refine: camera trap studies for elusive species // *Animal Conservation*. Vol. 11(3). P. 182–184.

MacKenzie D.I., Nichols J.D., Royle J.A., Pollock K.H., Bailey L.L., Hines J.E. 2005. *Occupancy Estimation and Modeling: Inferring Patterns and Dynamics of Species Occurrence*. Elsevier, San Diego, CA.

Stein M.K., Engle R.A., Smith M.S., Hughes E.K. 2008. Orchestrating productive mathematical discussions: Five practices for helping teachers move beyond show and tell // *Mathematical Thinking and Learning*. 10. P. 313–340.

Trolle M., Noss J.A., Lima E. De S., Dalponte J.C. 2007. Camera-trap studies of maned wolf density in the Cerrado and the Pantanal of Brazil // *Biodiversity and Conservation*. 16. P. 1197–1204.

Zenevich S.G., Klimchuk A.Yu., Semenov V.M., Spiridonov M.V., Rodin A.V. 2019. Measurements of a fully resolved contour of the carbon dioxide absorption line in a band at $\lambda = 1.605 \mu\text{m}$ in the atmospheric column using high-resolution heterodyne spectroradiometry // *Quantum Electronics*. 49(6). P. 604–611.

Zenevich S., Gazizov I., Churbanov D., Spiridonov M., Rodin A. 2020. Improvement of dark signal evaluation and signal-to-noise ratio of multichannel receivers in NIR heterodyne spectroscopy application for simultaneous CO₂ and CH₄ atmospheric measurements // *OSA Continuum*. 3(7). P. 1801–1810.

References

Harris G., Thompson R., Childs J.L., Sanderson J.G. 2010. Automatic storage and analysis of camera trap data // *Bulletin of the Ecological Society of America*. Vol. 91. P. 352–360.

Karant K.U., Nichols J.D. 1998. Estimation of Tiger Densities in India Using Photographic Captures and Recaptures // *Ecology*. Vol. 79(8). P. 2852–2862.

Kays R.W., Slauson K.M. 2008. Remote cameras / R.A. Long, P. MacKay, W.J. Zielinski, and J.C. Ray (eds.). *Noninvasive Survey Methods for Carnivores*. Island Press, Washington, DC. P. 110–140.

Kays R.W., Kranstauber B., Jansen P., Carbone C., Rowcliffe M., Fountain T., Tilak S. 2009. Camera traps as sensor networks for monitoring animal communities // *Local Computer Networks, 2009. LCN 2009. IEEE 34th Conference*. P. 811–818.

Kelly V.J. 2008. Design, evaluate, refine: camera trap studies for elusive species // *Animal Conservation*. Vol. 11(3). P. 182–184.

MacKenzie D.I., Nichols J.D., Royle J.A., Pollock K.H., Bailey L.L., Hines J.E. 2005. *Occupancy Estimation and Modeling: Inferring Patterns and Dynamics of Species Occurrence*. Elsevier, San Diego, CA.

Labutina I.A., Baldina E.A. 2011. The use of remote sensing data to monitor the protected area ecosystems. М.: WWF. 90 p. [In Russian]

Meshcherinov V.V., Spiridonov M.V., Kazakov V.A., Rodin A.V. 2020. Lidar-based remote infrared gas sensor for monitoring anthropogenic pollution: a proof of concept // *Quantum Electronics*. 50(11). P. 1055–1062. [In Russian]

Ogurtsov S.S., Volkov V.P., Zheltukhin A.S. 2017. Review of some actual methods of storage, processing and analysis of data from camera traps in zoological research // *Nature Conservation Research*. 2(1). P. 73–98. DOI: 10.24189/ncr.2017.057 [In Russian]

Pogodin N.L., Markov N.I. 2013. Analysis of the data structure of the elk population register camera traps // Save the diversity of animals and hunting. Proceedings of the 5th International scientific and practical conference. Moscow. P. 315–317. [In Russian]

Pokrovskaya L.V., Zhakov V.V., Pokrovsky I.G. 2016. Using the marking of trees and camera traps to estimate the relative abundance of the brown bear // *Theriofauna of Russia and adjacent territories*. International meeting. Moscow: Association of scientific editions KMK. P. 334. [In Russian]

Roznov V.V., Naydenko S.V., Hernandez Blanco J.A., Lukarevsky V.S., Sorokin P.A., Maslov M.V., Litvinov M.N., Kotlyar A.K. 2012. Seasonal changes in food resources of the Amur tiger: the experience of the application of camera trapping matrix // *Zoological Journal*. 91(6). P. 643–647. [In Russian]

Stein M.K., Engle R.A., Smith M.S., Hughes E.K. 2008. Orchestrating productive mathematical discussions: Five practices for helping teachers move beyond show and tell // *Mathematical Thinking and Learning*. 10. P. 313–340.

Sydorchuk N.V., Volchenko A.E., Roznov V.V. 2007. Experience in the use of camera traps in the study of behavioral ecology badger *Meles meles* // *Theriofauna of Russia and adjacent territories (VIII Congress Theriological society)*. Proceedings of the International conference. Moscow: Association of scientific editions KMK. P. 455. [In Russian]

Sydorchuk N.V., Roznov V.V. 2009. Using settlements European badger *Meles meles* in the Darwin Reserve // *Behavior and behavioral ecology of mammals*. Proceedings of the conference. Moscow: Association of scientific editions KMK. P. 30. [In Russian]

Sutyryna S.V., Riley M.D., Goodrich D.M., Seredkin I.V., Mikell D.G. 2011. Monitoring groups tiger southern Sikhote-Alin Reserve using camera traps // *Remote methods of research in zoology*. Proceedings of the conference. Moscow: Association of scientific editions KMK. P. 92. [In Russian]

Trolle M., Noss J.A., Lima E. De S., Dalponte J.C. 2007. Camera-trap studies of maned wolf density in the Cerrado and the Pantanal of Brazil // *Biodiversity and Conservation*. 16. P. 1197–1204.

Volkov E.V., Volkov A.E. 2015. Experience in the use of camera traps in the study of large terrestrial mammals of the National Park «Onega Pomorie» // *See and save. Environmental education and educational tourism in protected areas*. Digest of articles. Moscow: EcoCentre «Zapovedniki». P. 49–53. [In Russian]

Zenevich S.G., Klimchuk A.Yu., Semenov V.M., Spiridonov M.V., Rodin A.V. 2019. Measurements of a fully resolved contour of the carbon dioxide absorption line in a band at $\lambda = 1.605 \mu\text{m}$ in the atmospheric column using high-resolution heterodyne spectroradiometry // *Quantum Electronics*. 49(6). P. 604–611.

Zenevich, S., Gazizov, I., Churbanov, D., Spiridonov, M., Rodin, A. 2020. Improvement of dark signal evaluation and signal-to-noise ratio of multichannel receivers in NIR heterodyne spectroscopy application for simultaneous CO₂ and CH₄ atmospheric measurements. *OSA Continuum*, 3, 7, 1801–1810.

Zheltukhin A.S., Puzachenko Y.G., Volkov V.P., Kotlov I.P., Zheltukhin S.A. 2011. Using Reconyx camera traps for monitoring of large mammal populations in the Central Forest Reserve // *Remote methods of research in zoology*. Proceedings of the conference. Moscow: Association of scientific editions KMK. P. 34. [In Russian]

Zheltukhin A.S., Zheltukhin S.A. 2014. On the daily activity of large mammals according to the registration of camera traps «Reconyx» // *Modern trends in the development of protected areas*.

Mat. scient. Conference dedicated to the 20th anniversary of the reserve «Polistovsky». Velikie Luki. P. 59–64. [In Russian]

**APPLICATION OF THE SOFTWARE AND HARDWARE COMPLEX
BASED ON THE UAV FOR SOLVING THE PROBLEMS OF
OPERATIONAL MONITORING OF PROTECTED AREAS**

A.E. Ilyukhin^{*}, K.D. Bukharov^{}, D.V. Dobrynin^{***}, V.A. Sokolov^{****},
A.V. Rodin^{*****}**

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Russia
e-mail: ^{}ilyukhin.ae@mipt.ru, ^{**}bukharovkd@gmail.com, ^{***}ddobrynin@yandex.ru,*
*^{****}vicsokol@mail.ru, ^{*****}rodin.av@mipt.ru*

The article presents new technical solutions based on unmanned aerial vehicles aimed at monitoring protected areas, as well as the first results obtained during their tests in selected areas. Many protected areas are characterized by remote location and hard access. Moreover, they differ by critical problems to resolve and related monitoring instruments. The proposed payload is intended for installation on an unmanned aerial vehicle with a carrying capacity of up to 40 kg and is configured for solving the problems of a selected reserve. Individual modules of the payload could be installed on a UAV of a lighter class. Selected modules have been tested on various unmanned platforms. The system is capable of obtaining radar images of the underlying surface, remote reading of camera traps data via wireless communication channels, and measuring concentration of atmospheric species along the flight route. The UAV, equipped with such a payload and software allows solving such problems of environmental monitoring as accounting for animal migration, detecting felling and other signs of unauthorized human activity on the territory of natural reserves, automating the collection of their data for subsequent processing and immediate notification of authorized services.

Key words: UAVs, monitoring, protected areas, greenhouse gases, radar images, camera traps