

А.Л. Веревкин, И.Э. Джозефс, В.В. Мисюра, Л.С. Веревкина

МУЛЬТИАГЕНТНАЯ СИСТЕМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ С КАМЕР ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ ДРОНА

Мультиагентная технология с дронами, современными сенсорами, точным GPS и искусственным интеллекте, привели к прорыву в области киберфизических систем. В этой статье представлена мультиагентная система с использованием искусственного интеллекта для обработки изображений с камер технического зрения установленных на дроне. Разработана структурная схема мультиагентной системы на дроне на базе эффективной и простой платформы взятой с октокоптера ARRISE 410 – сельскохозяйственного дрона опрыскивателя с: интеллектуальной системой управления; всенаправленным цифровым микроволновым радаром; 6-ти осевым акселерометром высокой точности; электронным ватерпасом измерения наклона; оптической камерой реального времени с видом от первого лица; панелью управления, оснащенной новейшей системой передачи сигналов Light Bridge 2; пультом дистанционного управления, защищенного от попадания пыли и воды. Комплект необходимо дополнить: гиперспектральной HS – камерой для сканирования, ее модулем питания и возможностью сопряжения с системами дрона ARRISE 410, модулем сжатия информации. Макет для исследования пропускной способности на DJI Agras T20 гексакоптере DJI Agras T20, сетевая карта MikrotikRB411 5G, микрокомпьютер Raspberry Pi 3, RGB-камера 1 Mpix, встроенный бортовой компьютер Raspberry Pi OV5647 v1.3 и гиперспектральная HS – камера 2 Resonon Pika L снимает гиперспектральные данные с 281 спектральными полосами со спектральными длинами волн от 400 до 1000нм и пространственным разрешением 900 гиперспектральных пикселей на строку изображения. В статье решена задача экспериментальным и расчетным путем определить требуемое сжатие информации получаемой с камер гиперспектрального и оптического диапазона с передачей через оператор связи и интернет для обработки изображений искусственным интернетом

Мультиагентная система; искусственный интеллект; обработка изображений; гиперспектральная камера; камера оптического диапазона; дрон.

A.L. Verevkin, I.E. Josephs, V.V. Misyura, L.S. Verevkina

MULTI-AGENT SYSTEM USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE TO PROCESS IMAGES FROM THE DRONE'S TECHNICAL VISION CAMERAS

Multi-agent technology with drones, modern sensors, precise GPS and artificial intelligence, have led to a breakthrough in the field of cyber-physical systems. This article presents a multi-agent system using artificial intelligence to process images from technical vision cameras installed on a drone. A block diagram of a multi-agent system on a drone was developed based on an effective and simple platform taken from the ARRISE 410 octocopter – an agricultural sprayer drone with: intelligent control system; omnidirectional digital microwave radar; 6-axis high-precision accelerometer; electronic level for measuring tilt; real-time optical camera 1 with a first-person view; control panel equipped with the latest Light Bridge 2 signal transmission system; remote control has a design protected from dust and water. The kit must be supplemented with: hyperspectral HS - camera for scanning, its power module and the ability to interface with the ARRISE 410 drone systems, an information compression module. Model for studying the throughput on the DJI Agras T20 hexacopter DJI Agras T20, MikrotikRB411 5G network card, Raspberry Pi 3 microcomputer, 1 Mpix RGB camera, built-in on-board computer Raspberry Pi OV5647 v1.3 and hyperspectral HS - camera 2 Resonon Pika L shoots hyperspectral data with 281 spectral bands with spectral wavelengths from 400 to 1000 nm and a spatial resolution of 900 hyperspectral pixels per image line. The article solves the problem of experimentally and computationally determining the required compression of information obtained from hyperspectral and optical range cameras with transmission through a telecom operator and the Internet for image processing by an artificial Internet.

Multi-agent system; artificial intelligence; image processing; hyperspectral camera; optical range camera; drone.

Введение. В настоящее время растет интерес к использованию дронов для сбора данных, наблюдения и мониторинга в областях обороны, безопасности, охраны окружающей среды и гражданских объектов. Прикладные решения, основанные на мультиагентных технологиях взаимодействия дрона, сенсоров, точного GPS, серверов интернета и сотовой связи, камер технического зрения привели к прорыву в области киберфизических систем. Дроны по отношению к спутникам или пилотируемые самолетами, имеют ряд преимуществ они дешевле, с более гибким временем повторного полета и лучшим пространственным и спектральным разрешением, что позволяет проводить более глубокий и точный анализ данных [1]. В научной литературе есть исследовательские публикации в разных областях, которые подтверждают большой спрос на дроны, рассмотрим некоторые из них: в работе [2] дрон используется для обнаружения, автоматического наблюдения и контроля состояния линий электропередач; в работе [3] рассмотрены миссии испытаний обеспечения безопасности, защиты и спасения с использованием дронов; в работе [4] приведено использование малогабаритных дронов в полицейских управлениях, пожарных бригадах и других организациях безопасности и охраны. Однако в области сельского хозяйства дистанционное использование дронов прочно закрепилось, как их новая область применения [5]. В Японии на 20% сельхозугодий используются дроны для посева, обработки, и наблюдения за растениями. По оценкам аналитического агентства Fact.MR, рынок агродронов к 2033 году вырастет в 4 раза до 14 млрд долларов [6].

Сельское хозяйство и природоохранная отрасли могут получить огромную выгоду от мультиагентных технологий с точки зрения экономии времени, ресурсов и человеческого труда, не говоря уже об аспектах, связанных с защитой окружающей среды. Новое направление точное земледелие (или точное фермерство), основано на наблюдении и измерении роста сельскохозяйственных культур. Ключевой технологией в точном земледелии является гиперспектральная визуализация, сначала использованной на спутниках и пилотируемых самолетах, состоящей из сотен спектральных диапазонов, что облегчает преобразование скрытых данных в нужную информацию. Поэтому разработка и исследование мультиагентной системы с использованием искусственного интеллекта для обработки изображений с камер технического зрения дрона (далее по тексту МСИИ дрона) актуальна.

Постановка задачи. В статье поставлены и решены задачи:

- ◆ рассмотреть особенности современных камер предназначенных для сбора данных;
- ◆ определить структуру и разработать структурную схему МСИИ дрона и ее реализацию;
- ◆ определить состав макета МСИИ дрона для исследования пропускной способности модулей связи посредством сотового оператора МТС и интернет;
- ◆ выполнить расчет требуемых параметров сжатия информации с гиперспектральной камеры для передачи через сотовый оператор связи МТС и интернет для обработки искусственным интеллектом.

Особенности современных камер технического зрения. Дистанционное наблюдение оптического диапазона RGB-камерами используются населением в повседневной жизни, например Google Earth или навигационные системы.

С 1972 году хорошо зарекомендовало себя систематическое наблюдение за поверхностью Земли многоспектральными камерами. Применение многоспектральных камер многочисленны, начиная от наблюдения за океаном до мониторинга растительного покрова и биомассы.

С 1980-х годов началось использование данных дистанционного наблюдения гиперспектральными камерами с самолетов, затем со спутников, запущенных в начале 21-го века. Благодаря более высокому спектральному разрешению данных гиперспектральных камер, это открыло возможность для нового применения. Гиперспектральное картографирование с помощью дронов стало вызывать повышенный интерес в научном сообществе примерно 10 лет назад и с тех пор получило дальнейшее развитие.

Спектры различных камер технического зрения, показаны на рис. 1. Типичная RGB-камера оптического диапазона имеет три широких спектральных канала (рис. 1,а).

Мультиспектральная камера обычно имеет больше каналов, которые более узкие дают данные (рис. 1,б).

Гиперспектральная HS-камера обычно имеет более 100 смежных спектральных полос (рис. 1,в).

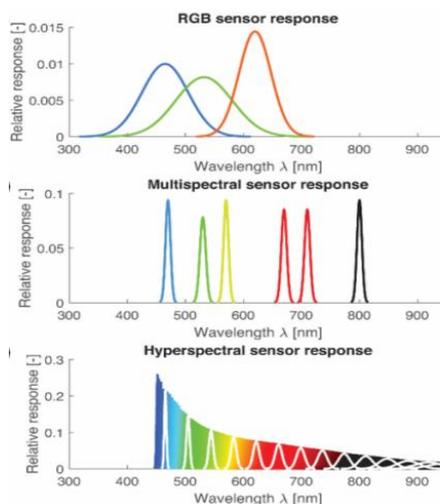


Рис. 1. Спектральные характеристики оптического диапазона RGB-камеры, мультиспектральной камеры и гиперспектральной HS-камеры

Полосы гиперспектральной HS-камеры расположены близко друг к другу и перекрываются, поэтому каждая десятая полоса отображается белым цветом для видимости функций отклика полос. На рис. 2 приведен моделируемый отклик а) трех типов датчиков, измеряющих отражательную способность поля риса и б) измеряющих нисходящую освещенность [7].

Для обработки изображений искусственным интеллектом необходим учет отражательной способности рисовых культур и нисходящей освещенности от облаков (a+b) спектров. RGB-камера показывает только общие тенденции, но не может разрешить какие-либо спектральные детали. Мультиспектральная камера хорошо представляет спектральную форму отражательной способности ростков риса, поскольку местоположения спектральных полос были выбраны для мониторинга растительности, но особенности атмосферного поглощения нисходящей освещенности остаются необнаруженными. Спектр (рис. 2) гиперспектральной HS-камеры точно следует форме отражательной способности растений риса и нисходящей освещенности, в то время, как особенности освещенности в ближней инфракрасной области (NIR) менее резкие из-за увеличенной полосы пропускания камеры.

Хотя дистанционное наблюдение гиперспектральной HS-камеры с дрона может обеспечить беспрецедентный уровень спектральной детализации благодаря сверхвысокому пространственному и спектральному разрешению и дает возможность сбора данных под облаками. Установка гиперспектральной HS-камеры на дрон требует легких и миниатюрных сенсоров из-за ограничений по весу и размеру полезной нагрузки дрона. Миниатюризация сенсоров приводит к снижению точности и снижению отношения сигнал/шум по сравнению с более крупными, размещенными на самолетах или спутниках, однако при изменяющемся облачном покрове, затрудняет картирование отражательной способности поверхности земли, поскольку не только отражательная способность поверхности, но и изменяющаяся освещенность влияет на измеренную восходящую освещенность.

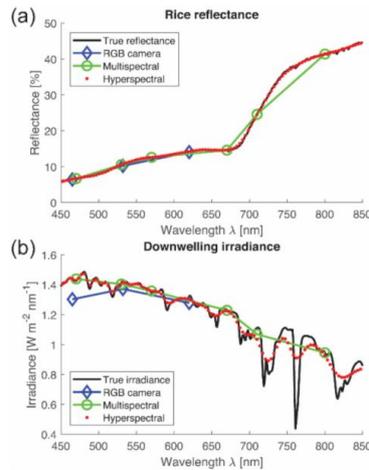


Рис. 2. Спектральные характеристики оптического диапазона RGB-камеры, мультиспектральной камеры и гиперспектральной HS-камеры растительности рисового поля

В солнечных условиях отражательную способность можно картировать с помощью радиометрических опорных точек, методом эмпирических линий или нисходящую освещенность измерять с помощью моделей переноса излучения. Эти методы не работают при изменяющейся освещенности, в условиях изменяющейся облачности. Поэтому необходимо измерять нисходящую освещенность в то же время и в том месте, где измеряется восходящая освещенность и требуется ориентация по отношению к солнцу. Значения измеренной нисходящей радиации распространяются на картирование отражения. Нисходящая радиация имеет две составляющие: прямая радиация, которая достигает поверхности земли по прямому пути от солнца, и непрямая радиация, которая достигает поверхности земли со всего неба после рассеяния, например, аэрозолями, облаками и рэлеевским рассеянием. Предполагается, что непрякая радиация изотропна по полусфере, изменения в ориентации датчика ILS не влияет на измеренную непрякую радиацию. Эффект прямой радиации рассчитывается с помощью закона косинуса Ламберта, по геометрии солнечного датчика. Это было использовано Лонгом 2010, который измерил вклад прямой и непрякой радиации с помощью специально разработанного датчика ILS, чтобы скорректировать измеренную нисходящую радиацию с учетом эффектов наклона, достигая ошибок менее 10 Вт/м^2 для 90 % данных. В 2018г. была скорректирована нисходящая освещенность с учетом наклона датчика, путем измерений несколькими датчиками ILS с разными углами обзора, интегрированных в один датчик, и была определена нисходящая освещенность, соответствующая датчику с горизонтальной поверхностью, путем интерполяции, с точностью стабильности 2,5 % во время полета [8–11].

Из рассмотренных методов следует вывод, что для обучения искусственного интеллекта необходимо при изменяющейся освещенности, в условиях облачности измерять нисходящую освещенность в то же время и в том месте, где измеряется восходящая освещенность и требуется ориентация по отношению к солнцу, что возможно с двумя камерами технического зрения и специально разработанным подвесом для ориентации камер.

Обзор гиперспектральных HS-камер. Гиперспектральные HS-камеры имеют до сотен смежных спектральных полос, что позволяет измерять яркость, как непрерывную функцию длин волн. Независимо от воздушной платформы авиационной, спутниковой, дрона камеры технического зрения играют важную роль в получении данных. Есть четыре основных метода для измерений: гиперспектральная съемка, мультиспектральная съемка, спектрометрия и RGB-снимки. Сравнения методов отображено в табл. 1, в которой учитываются (1) пространственные и (2) спектральные различия. Классификация, основанная, на условной оценке (1–3), использовалась для определения возможностей получения спектральной и пространственной информации

Таблица 1

Основные различия между гиперспектральной и мультиспектральной съемкой, спектроскометрией и RGB-снимками

Камеры технического зрения	Спектральная информация	Пространственная информация
Гиперспектральная	○ ○ ○	○ ○ ○
Мультиспектральная	○ ○	○ ○ ○
Спектрометрии	○ ○ ○	○
RGB-снимков	○	○ ○ ○

По сравнению с другими, гиперспектральные сенсоры наиболее эффективно работают и в спектральном и в пространственном отношении. RGB-изображения не дают спектральной информации за пределами видимого спектра, что имеет большое значение для характеристики химических и физических свойств объектов. С другой стороны, спектроскометрия является технологией, в основном используемой для обнаружения крошечных областей (например, пятнистости листьев) с целью получения спектральных образцов без пространственного определения. Относительно мультиспектральной съемки, то она уступает гиперспектральной именно в получении детальной спектральной информации. Таким образом, гиперспектральная технология зондирования должна быть предпочтительной, когда дело доходит до получения информации о химических и физических свойствах.

Гиперспектральные камеры бывают двух типов: с зарядовой связью (CCD) и металл-оксид-полупроводниковые сенсоры (CMOS). Оба включают массивы фотодиодов, которые могут быть созданы с использованием на разных частотах материалов гиперспектральных камер, как показано на рис. 3. Материалы, используемые при изготовлении гиперспектральных камер: кремний (Si) – для получения информации в ультрафиолетовой, видимой и коротковолновой NIR полосах; арсенид индия (InAs) и арсенид галлия (GaAs) имеет спектральный отклик в полосе от 900 до 1700 нм; арсенид индия-галлия (InGaAs) расширяет предыдущий диапазон до 2600 нм; и ртутно-кадмиевый теллурид (MCT или HgCdTe) характеризуется большим спектральным диапазоном с высокой квантовой эффективностью, что позволяет достичь полос инфракрасных каналов (около 2500-25000 нм) и области NIR (около 800-2500) [12].

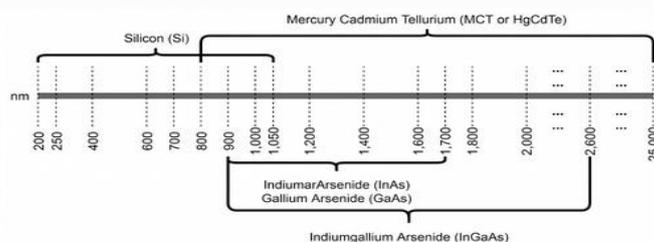


Рис. 3. Использование на разных частотах материалов гиперспектральных камер

Что касается режимов получения данных, то их выделяют четыре: точечное сканирование (или whiskbroom), линейное сканирование (или pushbroom), плоское сканирование и одиночный кадр (singleshot) (рис. 4). В то время как режим whiskbroom получает все полосы попиксельно, перемещая детектор в пространстве $x - y$, для хранения данных в форме массива попиксельной записи спектральных каналов (VIP), режим pushbroom работает аналогично, но вместо пиксельного сканирования формируется линия, которая, в конечном счете, записывается массив полинейной записи спектральных каналов (BIL). Несколько других характеристики режима pushbroom включают компактный размер, малый вес, более простое управление и более высокий уровень сигнала. В режиме плоского сканирования создается массив поканальной записи (BSQ), состоящий из нескольких изображений, снятых за один раз, каждое из которых содержит спектральные данные относительно всего данного пространства $x - y$.

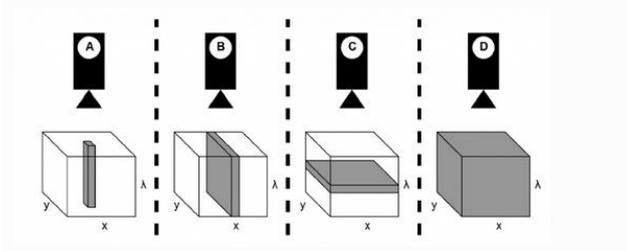


Рис. 4. Гиперспектральные режимы получения данных: *A* – точечное сканирование; *B* – линейное сканирование; *C* – плоское сканирование; *D* – объемное сканирование, *C* и *D* относятся к одиночному кадру

Наконец, есть еще режим, который получает все пространственные и спектральные данные одновременно, известен он как одиночный кадр (singleshot).

Список доступных коммерческих гиперспектральных сенсоров представлен в табл. 2 [13].

Таблица 2

Manuf.	Sensor	Spectral Range (nm)	No. Bands	Spectral Resol. (nm)	Spatial Resol. (px)	Acquis. Mode	Weight (g)
BaySpec	OCI-UAV-1000	600–1000	100	<5 ^b	2048 ^d	P	272
Brandywine Photonics	CHAI S-640	825–2125	260	5 ^c	640 × 512	P	5000
	CHAI V-640	350–1080	256	5 ^c 10 ^c	640 × 512	P	480
Cubert GmbH	S 185—FIREFLEYE SE	450–950 355–750	125	4 ^c	50 × 50	S	490
	S 485—FIREFLEYE XL	450–950 550–1000	125	4.5 ^c	70 × 70	S	1200
	Q 285—FIREFLEYE QE	450–950	125	4 ^c	50 × 50	S	3000
Headwall Photonics Inc., Fitchburg, MA, USA	Nano HyperSpec	400–1000	270	6 ^b	640 ^d	P	1200 ^e
	Micro Hyperspec VNIR	380–1000	775 837 923	2.5 ^b	1004 ^d 1600 ^d	P	≤3900
HySpex	VNIR-1024	400–1000	108	5.4 ^c	1024 ^d	P	4000
	Mjolnir V-1240	400–1000	200	3 ^c	1240 ^d	P	4200
	HySpex SWIR-384	1000–2500	288	5.45 ^c	384 ^d	P	5700
MosaicMill	Rikola	500–900	50 ^a	10 ^b	1010 × 1010	S	720
NovaSol	vis-NIR microHSI	400–800	120				
		400–1000 380–880	180 150	3.3 ^c	680 ^d	P	<450
	Alpha-vis micro HSI	400–800	40				
		350–1000	60	10 ^c	1280 ^d	P	<2100
	SWIR 640 microHSI	850–1700	170				
		600–1700	200	5 ^c	640 ^d	P	3500
	Alpha-SWIR microHSI	900–1700	160	5 ^c	640 ^d	P	1200
		964–2500	256	6 ^c	320 ^d	P	2600
PhotonFocus	MV1-D2048x1088-HS05-96-G2	470–900	150	10–12 ^b	2048 × 1088	P	265
Quest Innovations	Hyperea 660 C1	400–1000	660	-	1024 ^d	P	1440
Resonon	Pika L	400–1000	281	2.1 ^c	900 ^d	P	600
	Pika XC2	400–1000	447	1.3 ^c	1600 ^d	P	2200
	Pika NIR	900–1700	164	4.9 ^c	320 ^d	P	2700
	Pika NUV	350–800	196	2.3 ^c	1600 ^d	P	2100
SENOP	VIS-VNIR Snapshot	400–900	380	10 ^b	1010 × 1010	S	720
SPECIM	SPECIM FX10	400–1000	224	5.5 ^b	1024 ^d	P	1260
	SPECIM FX17	900–1700	224	8 ^b	640 ^d	P	1700
Surface Optics Corp., San Diego, CA, USA	SOC710-GX	400–1000	120	4.2 ^c	640 ^d	P	1250
XIMEA	MQ022HG-IM-LS100-NIR	600–975	100+	4 ^c	2048 × 8	P	32
	MQ022HG-IM-LS150-VISNIR	470–900	150+	3 ^c	2048 × 5	P	300

Note: ^a 380 in laboratory; ^b at FWHM; ^c by sampling; ^d Pushbroom length line (the other dimension depends on sensor's sweep distance); ^e without lens and global positioning system (GPS); P—Pushbroom; S—Snapshot.

Кроме того, укажем некоторые проблемы присущие для каждого режима.

Точечная съемка – это режим медленной съемки, а линейная съемка должна выполняться за короткое время, чтобы избежать риска несоответствий в спектральном уровне полосы (насыщенность или недоэкспонирование). Плоское сканирование не подходит для движущихся сред, в то время как одиночный кадр (single shot) – технологии в стадии разработки, которая не поддерживает высокое пространственное разрешение.

Установка гиперспектральных камер на дрон создает готовые системы, которые требуют взаимодействия как минимум с тремя производителями: камер технического зрения, дронов и искусственного интеллекта.

Структурная схема МСИИ дрона и ее реализация. Спектры, получаемые МСИИ дроном сначала калибруются затем анализируются с использованием нормализованного индекса неоднородности растительности (NDVI), модифицированного индекса коэффициента поглощения хлорофилла (MCARI) и модифицированного индекса растительности, скорректированного по почве (MSAVI) и другими способами обработки результатов, простым классификатором, применяемым к части одного из захваченных изображений. Сжатие в реальном времени, полученных данных, демонстрирует преимущества использования бортового вычислительного устройства с относительно высокой вычислительной мощностью.

В этой статье рассмотрена мультиагентная система искусственного интеллекта обработки изображений с камер технического зрения дрона и подробно описана устройство системы. Предлагаемое решение основано на дроне и гиперспектральной камерой и камерой оптического диапазона. В статье решена задача разработки МСИИ дрона с использованием искусственного интеллекта обработки изображений с камер технического зрения дрона, в которой вес, энергетический бюджет и подключение камер имеют первостепенное значение. На дроне установлена встроенная плата с расширенными возможностями обработки, чтобы контролировать его траекторию, управлять сбором данных и обеспечивать бортовую обработку, и передачу данных посредством мобильного сотового оператора МТС и сжатия информации, что имеет решающее значение из-за огромных объемов полученных данных для последующей обработки искусственным интеллектом (ИИ). ИИ используется для обработки изображений и расчета различных индексов растительности: нормализованного индекса неоднородности растительности NDVI, модифицированного индекса коэффициента поглощения хлорофилла MCARI, модифицированного индекса растительности на почве MSAVI, которые являются численными и/или графическими или атрибутивными показателями свойств растительности. Дрон был успешно испытан в реальных условиях городской застройки г. Ростова на Дону России, и в пригороде на территории виноградника.

Использование дронов позволяет периодически контролировать растения во время их роста, а также контролировать внешние условия, которые повлияют на их состояние. Многоспектральные датчики широко используются на дронах для сбора спектральной информации, которая позволяет создать карты состояний растений [9–12]. Один из показателей это нормализованный разностный индекс вегетации NDVI, который указывает на жизнеспособность растений рассчитываемый по информации двух спектральных каналов, расположенных в красной и ближней инфракрасной полосах электромагнитного спектра [7, 9].

Существуют и другие индексы, кроме индекса NDVI, которые дают полезную информацию в интеллектуальном земледелии [8, 10]. Эти индексы рассчитываются по спектральной информации различных частей электромагнитного спектра. В данной статье рассмотрена разработка МСИИ дрона, способной нести гиперспектральную и оптическую камеры для сбора информации в широком диапазоне спектральных каналов, предоставляя информацию, которая может быть чрезвычайно полезна не только для приложений интеллектуального земледелия, но и для других приложений, таких как обнаружение загрязнений мазутом, обнаружение аномалий и классификации загрязнений углеводородными соединениями и других исследований. Однако использование гиперспектральных камер МСИИ дрона вместо мультиспектральных датчиков не лишено недостатков. Мультиспектральные датчики, специально разработанные для установки на дрон и управления ими с помощью встроенных устройств, а найти гиперспектральную камеру, которую можно напрямую установить на дрон проблемно.

Структурная схема СМШИ дрона, показана на рис. 5.



Рис. 5. Структурная схема СМШИ дрона

На базе сельскохозяйственного дрона опрыскивателя с грузоподъемностью до 25 кг. реализована структура МСШИ дрона и следующих компонентов на базе эффективной и простой платформы взятой с октокоптера ARRISE 410:

- ◆ интеллектуальная система управления;
- ◆ всенаправленный цифровой микроволновый радар;
- ◆ 6-ти осевой акселерометр высокой точности;
- ◆ электронный ватерпас измерения наклона;
- ◆ оптическая камера 1 реального времени с видом от первого лица;
- ◆ панель управления, оснащенная новейшей системой передачи сигналов Light Bridge 2;
- ◆ пульт дистанционного управления имеет конструкцию, защищенную от попадания пыли и воды;

В ARRISE 410 включены интеллектуальные запоминающие устройства, которые регистрируют прошлые и текущие точки полетного задания. В случае прерывания полета по различным причинам (упал заряд батареи), дрон автоматически возобновит работу с последней зарегистрированной точки.

Комплект необходимо дополнить: гиперспектральной HS – камерой для сканирования, ее модулем питания и возможностью сопряжения с системами дрона ARRISE 410, модулем сжатия информации модулем связи через оператор мегафон и сервером интернета и компьютером.

Реализация СМШИ дрона приведена на рис. 6. и выполнена на DJI Agras T20 гексакоптере [14], сетевая карта MikrotikRB411 5G, микрокомпьютер Raspberry Pi 3, RGB-камера 1 Mpix, встроенный бортовой компьютер Raspberry Pi OV5647 v1.3 [15] и гиперспектральная HS – камера 2 Resonon Pika L [16] снимает гиперспектральные данные с 281 спектральными полосами со спектральными длинами волн от 400 до 1000нм и пространственным разрешением 900 гиперспектральных пикселей на строку изображения.

Гиперспектральная камера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. RGB-камера с целью получения информации для верификации полученных гиперспектральных данных. Эти две камеры размещаются на подвесе для снижения влияния на изображения вибраций дрона. Система включает в себя встроенный бортовой компьютер Raspberry Pi 3 [17], для автономного управления полетом дрона и управления сбором данных. Плата проведения бортовой обработки данных, что значительно увеличивает применимость этой системы сбора данных.

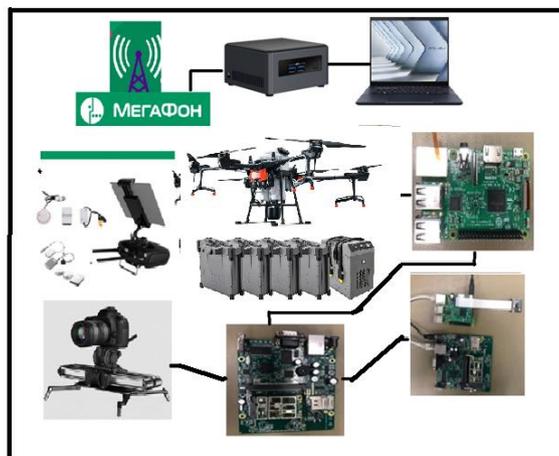


Рис. 6. Реализация СМИИ дрона

Перезаряжаемая литиевая батарея, долгосрочной работы, емкость аккумулятора позволяет лететь 9-15 минут.

Гиперспектральная камера видимого и ближнего инфракрасного диапазонов. Характеристики гипоспектральной камеры Resonon Pika L даны в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики гипоспектральной камеры Resonon Pika L

Характеристика	Значение
Количество спектральных каналов	281
Спектральный диапазон, нм	400-1000
Возможность установки на дрон	Да
Объектив	6 / 8 / 12 / 17 / 23 / 50 / 70
Разрешение, нм	2.1
Частота кадров, Гц	249
Вес, кг	0.6
Размер, м	0.1 x 0.125 x 0.053
Подключение	USB 3.0
Питание, В	3.4
Размер пикселя, μm	5.86
Ширина спектрального канала, нм	1,07
Спектральное разрешение, нм	2,1
Гарантия, месяцев	12

Камере Resonon Pika L соответствуют гиперспектральные данные с 281 спектральными полосами со спектральными длинами волн от 400 до 1000 нм и пространственным разрешением 1080 гиперспектральных пикселей на строку изображения.

Пульт управления:

- ◆ дальность связи (на открытом пространстве, при отсутствии препятствий): 1 км;
- ◆ мощность передающего модуля 100 мВт при 2,4 ГГц;
- ◆ встроенная батарея 6000 мА/ч, 2S LiPo;
- ◆ зарядное устройство DJI;

- ◆ мощность 9 Вт;
 - ◆ рабочая температура от -10° до +40°С;
- Зарядное устройство пульта управления:
- ◆ модель A14-057N1A;
 - ◆ напряжение 17,4 В;
 - ◆ номинальная мощность 57 Вт;
 - ◆ сервер NUC7i7DNHE;
 - ◆ 4 аккумулятора;
 - ◆ модуль питания 5В;
 - ◆ зарядное устройство для аккумуляторов (возможность одновременной зарядки двух аккумуляторов за 60 минут).

Экспериментальные исследования пропускной способности СМИИ дрона.

В работе [18] рассмотрены особенности передачи данных, посредством использования различных средств в том числе и сотового оператора связи Мегафон. Структурная схема макета для испытаний СМИИ дрона представлена на рис. 7. Также была установлена промышленная камера для Raspberry Pi 1.3 5мп с целью предоставления дополнительной информации для оценки пропускной способности. Эта камера размещена в подвесе для снижения вибраций дрона и повышения качества полученных изображений.

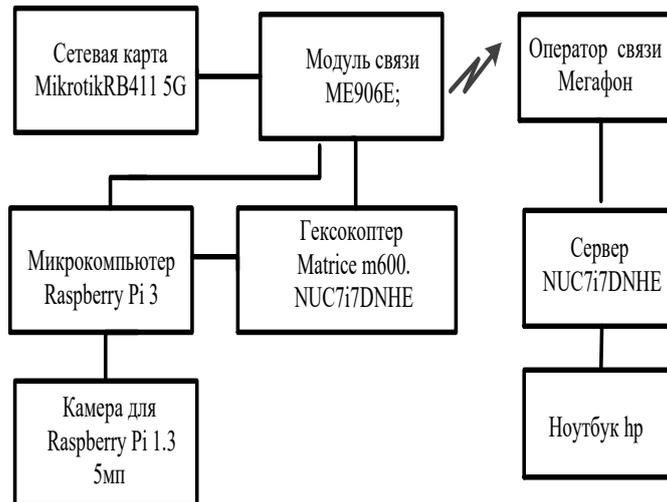


Рис. 7. Структурная схема макета для испытаний СМИИ дрона

В дополнение к устройствам, перевозимым дроном, была установлена наземная станция, состоящая из сервера и ноутбука hp, который взаимодействует с бортовым компьютером дрона через сотовый оператор МТС. Данные можно легко передавать с помощью сетевой карты и модуля связи. Система сбора данных была протестирована в разных сценариях подъема и спуска дрона в городской застройке, и над виноградником в пригороде Ростова на Дону. Полученные графики пропускной способности от высоты полета при подъеме и спуске дрона необходимы для определения бортового сжатия гиперспектральных данных в реальном времени таким образом, чтобы их можно было эффективно передавать на наземную станцию управления для дальнейшей обработки. Для выбора компрессора NuregLCA [19, 21] с использованием NVIDIA CUDA (архитектура унифицированных вычислительных устройств) и использования преимуществ параллелизма маломощного графического процессора (GPU). Полученные результаты позволяют определить производительность сжатия в реальном времени, а также установки такого рода бортовых вычислительных устройств на дрон.

Проведено исследование пропускной способности макета модуля передачи информации с камеры и определена возможность установки двух камер с разрешением Full-HD и HD (количество рядов и столбцов – это и есть разрешение экрана, при разрешении Full HD экран состоит из 1080 рядов и 1920 столбцов пикселей и HD; из 1280 рядов и 720 столбцов пикселей) на дрон. Сенсор OV5647 имеет встроенный процессор, отвечающий за функции управления экспозицией, баланса белого цвета, автокалибровки уровня чёрного цвета, коррекции дефективных пикселей, регулировки частоты кадров, автофокусировки, обработки изображения: зеркального переворота, обрезки, наклона, и т.д. Данные изображения выводятся в формате 8-/10-бит RGB RAW. Максимальное разрешение снимка/кадра составляет 2592 x 1944 графических точек (пикселей). Видеосъёмка в стандарте FullHD осуществляется с частотой 30 к/с. Зависимость частоты кадров относительно выбранного разрешения съёмки [19]: QSXGA (2592x1944) – 15 кадр/с; 1080p – 30 кадр/с [20], и подтверждена возможность в реальном времени смотреть передаваемое изображение до 30 минут.

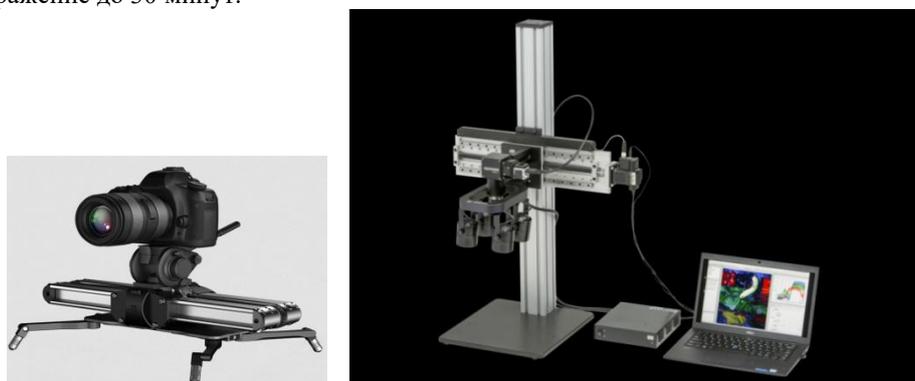


Рис. 8. Вид макета гипоспектральной камеры Resonon Pika L



Рис. 9. Гексакоптер Matrice m600. NUC7i7DNHE и макет в составе: камера для Raspberry Pi 1.3 5мп; модуль связи ME906E; сетевая карта MikrotikRB411 5G; микрокомпьютер Raspberry Pi 3; сервер NUC7i7DNHE

Приведены графики измерения пропускной способности – скорости обмена данными от высоты полета (рис. 10) при подъеме и спуске дрона (указано стрелками) в городской застройке.

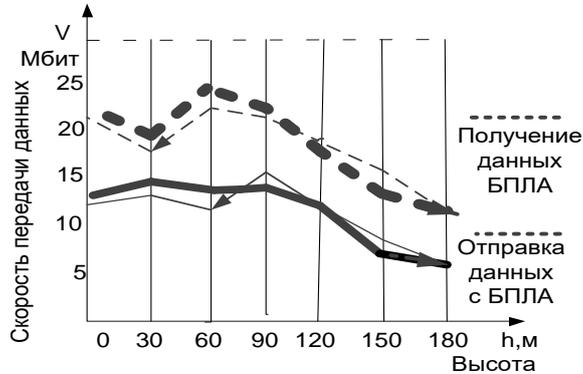


Рис. 10. Пропускная способности от высоты полета

Максимально время задержки управляющего сигнала не более 0,4 секунды по экспериментальным данным.

Расчет сжатия в реальном времени. Мегабайт в секунду (МВ/с) – это единица измерения скорости передачи данных, которая указывает, сколько миллионов байт передаётся каждую секунду, при этом 1 мегабайт равен 8 мегабитам и когда 2 мегабайт в секунду равно 16 мегабитам в секунду будет соответствовать среднему значению пропускной способности полученной зависимости, пропускной способности на рис. 10. Рассмотренная система передачи информации через сотовый оператор может выступать каналом управления и/или передачи данных между дроном и оборудованием с базой данных ИИ, и позволяет формировать более эффективные с дешевым и высокого качества информационным каналом.

В СМИИ дрона входит наземное оборудование сервер NUC7i7DNHE с приложением adhoc, для передачи изображений посредством использования интернета и сотового оператора связи Мегафон.

Сервер взаимодействует с бортовым компьютером через сотовый оператор связи Мегафон, таким образом сбора данных может быть легко настроен. Получаемые изображения позволяют создавать наборы различных карт растительности и рельефа, экспериментом подтверждена возможность в реальном времени смотреть передаваемое изображение в течение 30 минут на экране компьютера.

Сжатие получаемых гиперспектральных данных в реальном времени. Была также изучена возможность бортового сжатия получаемых гиперспектральных данных в реальном времени таким образом, чтобы их можно было СМИИ дрона использовать для дальнейшей обработки ИИ. Для этого можно использовать компрессор HyperLCA [21] на основе преобразования за счёт функции адаптивного искажения во время зондирования, которая обеспечивает несколько коэффициентов сжатия в одном сценарии. Новая версия компрессор Hyper LCA способна обрабатывать гиперспектральные изображения размером 1024x1024 и 180 спектральных диапазонов (377,5 Мб) за 0,935 секунды при энергопотреблении 1,145 Вт. А архитектура отличается высокой пропускной способностью (в миллионах выборок в секунду) и значительной энергоэффективностью (в мегабайтах в секунду на ватт) [13]. Полученные результаты в работе [7] подтверждают достижение производительности сжатия в реальном времени, а также демонстрируют преимущества переноса такого рода бортовых вычислительных устройств на таких дронах, как в макете.

При сборе получаемых с гиперспектральной камеры информации для последующего анализа объём данных получается большим – это гигабайты данных и передача такого большого объёма данных потребует заметной траты времени, поэтому сжатие переда-

ваемой камерой информации представляется единственно верной опцией. Таким образом, на борту дрона должен использоваться алгоритм сжатия для передачи последующей передачи.

Скорость сбора данных гиперспектральной камеры Resonon Pika L составляет до 60 Мбайт в секунду. А скорость передачи данных макета 2 Мбайт в секунду. По этой причине размер полученных данных должен быть радикально уменьшен для возможности быстрой передачи, особенно если требуется передача в реальном времени. Для сжатия гиперспектральных изображений с потерями можно использовать алгоритм, основанный на методе главных компонент (РСА). Основная формула, связывающая количество гиперспектральных пикселей, количество бит на пиксель и степень сжатия, может быть представлена следующим образом:

$$C=(N*B)/R, \text{ отсюда } R_p=(N*B)/C=56/2=28,$$

где C – общее количество бит после сжатия, 2Мбит/с;

N – количество гиперспектральных пикселей на кадр;

B – количество бит, используемых для представления каждого пикселя, (N bits);

R_p – расчетная степень сжатия.

Для гиперспектральной камеры Resonon Pika L $N*B=56$ Мбит/с. Для использования гипоспектральной камеры Resonon Pika L СМИИ дрона необходима степень сжатия $R_p = 28$ компрессор NureLCA позволяет обеспечить сжатие $R=20$, при определенных условиях работы часть информации можно распределить для хранения на плате дрона, а определенную часть передавать одновременно с зондированием.

Заключение. В настоящее время нет никаких сомнений относительно использования гипоспектральных камер в сочетании с дронами и мультиагентными технологиями, расширяющих возможности агентов при их взаимодействии в миссии. Задача адаптации промышленных камер технического зрения к дронам актуальна и требует уменьшения характеристик таких, как вес, размер, бюджет мощности и стоимости. В этой работе решена проблема разработки и исследования мультиагентной системы с использованием искусственного интеллекта для обработки изображений с камер технического зрения дрона.

Дрон включает в себя гиперспектральную камеру, точный GPS, контроллер и встроенную плату для взаимодействия с модульным приложением управления полетом. В результате предлагается решение для конкретного варианта использования точного зондирования, основанное на захвате 281 спектральных полос со скоростью до 249 кадров в секунду в диапазоне VNIR что позволит выполнить обработку различных индексов растительности, таких как известные NDVI, MSAVI и MCARI, для выявления особенностей виноградниковых зон в Ростовской области и юга России, открывая инновационные возможности в распознавании загрязнений мазутом береговой зоны, дистанционном зондировании влажности почвы, загрязнение окружающей среды пластиком и другие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Berni J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Suarez L. u Fereres E.* Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47. – P. 722-738.
2. *Li Z., Liu Y., Walker R., Hayward R. u Zhang J.* Towards automatic power line detection for a UAV surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved Hough transform // Machine Vision and Applications. – 2010. – Vol. 21, No. 5. – P. 677-686.
3. *Бирк А., Виггерих Б., Бюлов Х., Пфингсторн М. и Швертфегер С.* Безопасность, защита и спасательные операции с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) // J. Intel. Роботизированные системы. – 2011. – Т. 64, № 1. – С. 57-76.
4. *Дэниел К. и Витфельд К.* Использование инфраструктур общедоступных сетей для дистанционного зондирования с помощью БПЛА в гражданских операциях по обеспечению безопасности. – 2011.
5. *Faial B.S., Freitas H., Гомес Р.Н., Мано Л.Я., Пессин Г., де Карвалью А.С., Кришнамачари Б., Дж. Уеуата.* Адаптивный подход к распылению пестицидов на основе беспилотных летательных аппаратов в динамических средах // Вычисл. Электрон. Agric. – 2017. – 138 с.
6. <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1728206370&tld=ru&lang=ru&name=215085.pdf&text>.

7. *Пабло Хорстранд, Рааль Герра, Айтами Родригес, Мария Диас, Себастьян Лопес, Хозе Фко Лопес.* Платформа БПЛА на основе гиперспектрального датчика для захвата изображений и бортовой обработки. – <https://innoter.com/articles/giperspektralnaya-semka/>.
8. *Адаои Т. и др.* Гиперспектральная съемка: обзор датчиков на базе БПЛА, обработки данных и приложений для сельского и лесного хозяйства // Удалённая чувствительность. – 2017. – Т. 9, 11. – 1110 с.
9. *Хант-младший Э.Р. и Дотри К.С.Т.* Какая польза от беспилотных летательных аппаратов для дистанционного зондирования сельского хозяйства и точного земледелия? // *Int. J. Remote Sens.* – 2018. – Т. 39. – С. 15-16.
10. *Huang J., Wang H., Dai Q. u Han D.* Анализ данных NDVI для идентификации сельскохозяйственных культур и оценки урожайности // *IEEE J. Sel. Темы Прикладное наблюдение за Землей Дистанционного зондирования.* – 2014. – Т. 7. – С. 4374-4384.
11. *Rey-Caramés C., Diago M.P., Martín M.P., Lobo A. u Tardaguila J.* Использование многоспектральных изображений RPAS для характеристики мощности, развития листьев, компонентов урожайности и изменчивости состава ягод в пределах виноградника // Удалённая чувствительность. – 2015. – Т. 7, № 11. – С. 14458-14481. – <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/11/14458>.
12. Гиперспектральные камеры серии Specim FX1. Доступно: 4 мая 2019 г. – <http://www.specim.fi/fx/>.
13. <https://sovzond.ru/press-center/articles/bpla/5601/>.
14. https://geon.ru/product/dji-agras-t20-s4-dop-akb-i-zu-geksakopter/?ysclid=m7aoja559_g30884089
15. <https://compactool.ru/camera-5-mpix-dlya-raspberry-pi?ysclid=m7apxj7qdy527308006>.
16. <https://resonon.com/Pika-L>.
17. https://tixer.ru/catalog/raspberrypi/raspberry_pi_3_model_b_v1_2/?ysclid=m7aq4e66hj615743840.
18. *Веревкин А.Л., Сиренко Е.А.* Символы их предназначение и направление научного исследования Всемирный технологический университет ЮНЕСКО. Московский технологический институт // Матер. Международного форума. Вып. 1. «Инновации в сфере жизнедеятельности человека XXI века». – Ростов-на-Дону: Гинго, 2015. – С. 249-251.
19. <https://compactool.ru/camera-5-mpix-dlya-raspberry-pi?ysclid=m7aiz70xdw920542036>.
20. <https://compactool.ru/camera-5-mpix-dlya-raspberry-pi?ysclid=m7aiz70xdw920542036>.
21. https://www.researchgate.net/publication/372604327_FPGA-based_Hyperspectral_Lossy_Compressor_with_Adaptive_Distortion_Feature_for_Unexpected_Scenarios#pdf3.

REFERENCES

1. *Berni J.A.J., Zarco-Tejada P.J., Suarez L. u Fereres E.* Thermal and Narrowband Multispectral Remote Sensing for Vegetation Monitoring from an Unmanned Aerial Vehicle, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, Vol. 47, pp. 722-738.
2. *Li Z., Liu Y., Walker R., Hayward R. u Zhang J.* Towards automatic power line detection for a UAV surveillance system using pulse coupled neural filter and an improved Hough transform, *Machine Vision and Applications*, 2010, Vol. 21, No. 5, pp. 677-686.
3. *Birk A., Viggerikh B., Byulov Kh., Pflingstorn M. i Shvertfeger S.* Bezopasnost', zashchita i spasatel'nye operatsii s ispol'zovaniem bespilotnykh letatel'nykh apparatov (BPLA) [Security, Defense, and Rescue Operations Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)], *J. Intel. Robotizirovannye sistemy [J. Intel. Robotic Systems]*, 2011, Vol. 64, No. 1, pp. 57-76.
4. *Deniel K. i Vitfel'd K.* Ispol'zovanie infrastruktur obshchedostupnykh setey dlya distantsionnogo zondirovaniya s pomoshch'yu BPLA v grazhdanskikh operatsiyakh po obespecheniyu bezopasnosti [Using public network infrastructures for UAV remote sensing in civil security operations], 2011.
5. *Faial B.S., Freitas H., Gomes P.H., Mano L.Ya., Pessin G., de Karval'yu A.S., Krishnamachari B., Dzh. Ueyama.* Adaptivnyy podkhod k raspyleniyu pestitsidov na osnove bespilotnykh letatel'nykh apparatov v dinamicheskikh sredakh [Adaptive approach to pesticide spraying based on unmanned aerial vehicles in dynamic environments], *Vychisl. Elektron. Agric.* [Calculation. The electron. Agric], 2017, 138 p.
6. Available at: <https://docs.yandex.ru/docs/view?tm=1728206370&tld=ru&lang=ru&name=215085.pdf&text>.
7. *Pablo Khorstrand, Raal' Gerra, Aytami Rodrigues, Mariya Dias, Sebast'yan Lopes, Khoze Fko Lopes.* Plataforma BPLA na osnove giperspektral'nogo datchika dlya zakhvata izobrazheniy i bortovoy obrabotki [A UAV platform based on a hyperspectral sensor for image capture and on-board processing]. Available at: <https://innoter.com/articles/giperspektralnaya-semka/>.
8. *Adaoui T. et al.* Giperspektral'naya s"emka: obzor datchikov na baze BPLA, obrabotki dannykh i prilozheniy dlya sel'skogo i lesnogo khozyaystva [Hyperspectral imaging: An overview of UAV-based sensors, data processing, and applications for agriculture and forestry], *Udalennaya chuvstvitel'nost' [Remote Sensitivity]*, 2017, Vol. 9, 11, 1110 p.

9. *Khant-mladshiy E.R. i Dotri K.S.T.* Kakaya pol'za ot bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya distantsionnogo zondirovaniya sel'skogo khozyaystva i tochnogo zemledeliya? [What is the use of unmanned aerial vehicles for remote sensing of agriculture and precision farming?], *Int. J. Remote Sens.*, 2018, Vol. 39, pp. 15-16.
10. *Huang J., Wang H., Dai Q. i Han D.* Analiz dannykh NDVI dlya identifikatsii sel'skokhozyaystvennykh kul'tur i otsenki urozhaynosti [NDVI data analysis for crop identification and yield estimation], *IEEE J. Sel. Temy Prikladnoe nabyudenie za Zemley Distantsionnoe zondirovanie* [IEEE J. Sel. Topics Applied Earth Observation and Remote Sensing], 2014, Vol. 7, pp. 4374-4384.
11. *Rey-Caramés C., Diago M.P., Martín M.P., Lobo A. i Tardaguila J.* Ispol'zovanie mnogospektral'nykh izobrazheniy RPAS dlya kharakteristiki moshchnosti, razvitiya list'ev, komponentov urozhaynosti i izmenchivosti sostava yagod v predelakh vinogradnika [Using multispectral RPAS images to characterize power, leaf development, yield components, and berry composition variability within a vineyard], *Udalennaya chuvstvitel'nost'* [Remote Sensitivity], 2015, Vol. 7, No. 11, pp. 14458-14481. Available at: <http://www.mdpi.com/2072-4292/7/11/14458>.
12. Giperspektral'nye kamery serii Specim FX1 [Specim FX1 series hyperspectral cameras]. Available: May 4, 2019. Available at: <http://www.specim.fi/tx/>.
13. Available at: <https://sovzond.ru/press-center/articles/bpla/5601/>.
14. Available at: <https://geon.ru/product/dji-agras-t20-s-4-dop-akb-i-zu-geksakopter/?ysclid=m7aoja559g30884089>
15. Available at: <https://compacttool.ru/camera-5-mpix-dlya-raspberry-pi?ysclid=m7apxj7qdy527308006>.
16. Available at: <https://resonon.com/Pika-L>.
17. Available at: https://tixer.ru/catalog/raspberrypi/raspberry_pi_3_model_b_v1_2/?ysclid=m7aq4e66hj615743840.
18. *Verevkin A.L., Sirenko E.A.* Simvoly ikh prednaznachenie i napravlenie nauchnogo issledovaniya. Vsemirnyy tekhnologicheskyy universitet YuNESKO. Moskovskiy tekhnologicheskyy institut [Symbols, their purpose and the direction of scientific research UNESCO World Technological University. Moscow Institute of Technology], *Mater. mezhdunarodnogo foruma. Vyp. 1. «Innovatsii v sfere zhiznedeyatel'nosti cheloveka XXI veka»* [Materials of the international forum. Issue 1. "Innovations in the sphere of human activity of the 21st century"]. Rostov-on-Don: Gingo, 2015, pp. 249-251.
19. Available at: <https://compacttool.ru/camera-5-mpix-dlya-raspberry-pi?ysclid=m7aiz70xdw920542036>.
20. Available at: <https://compacttool.ru/camera-5-mpix-dlya-raspberry-pi?ysclid=m7aiz70xdw920542036>.
21. Available at: https://www.researchgate.net/publication/372604327_FPGA-based_Hyperspectral_Lossy_Compressor_with_Adaptive_Distortion_Feature_for_Unexpected_Scenarios#pf3.

Веревкин Александр Леонидович – Южный федеральный университет; e-mail: verevkin.a@mail.ru; г. Таганрог, Россия; тел. +78634371634; аспирант.

Джозефс Исаак Эхимен – Южный федеральный университет; e-mail: ijosephs@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; аспирант.

Мисюра Вадим Вадимович – Южный федеральный университет; e-mail: vmisyura@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371634; магистрант.

Веревкина Лина Станиславовна – Южный федеральный университет e-mail: lverevkina@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел. +78634371634; к.т.н.; доцент.

Verevkin Alexander Leonidovich – Southern Federal University; e-mail: verevkin.a@mail.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; postgraduate student.

Josephs Isaac Ehimen – Southern Federal University; e-mail: ijosephs@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; postgraduate student.

Misyura Vadim Vadimovich – Southern Federal University; e-mail: vmisyura@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; master's student.

Verevkina Lina Stanislavovna – Southern Federal University e-mail: lverevkina@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; cand. of eng. sc.; associate professor.