

ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 528.8: 621.397.42: 629.05

ЛЕТНОЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БОРТОВОГО МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВСЕПОГОДНОЙ ПОСАДКИ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Ю.А. Акопджанян¹, В.В. Биланчук¹, В.Н. Дрынкин¹,
Э.Я. Фальков¹, Т.И. Царёва¹, А.И. Фоменко¹, А.С. Мачихин²

¹ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”, Москва, Российская Федерация
e-mail: fomenko@gosniias.ru; Slava_bil@rambler.ru; drynkinv@gosniias.ru; falkov@gosniias.ru; tsareva@gosniias.ru

²ФГБУН “Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН”, Москва, Российская Федерация
e-mail: aalexanderr@mail.ru

Описан бортовой оптико-электронный комплекс мультиспектральной регистрации изображений для всепогодной посадки летательных аппаратов. Приведены результаты его летных испытаний на сверхлегком летательном аппарате АС-5 МР на траекториях глиссады при различных метеоусловиях. Показано, что традиционное использование видимого (0,4...0,8 мкм) и теплового инфракрасного (7,5...14,0 мкм) спектральных каналов в сложных погодных условиях неэффективно и требует дополнения ближним инфракрасным каналом (0,9...1,7 мкм).

Ключевые слова: многоспектральный приборный комплекс, система усиленного видения, оптические характеристики подстилающей поверхности, летные испытания.

FLIGHT EXPERIMENTAL RESEARCH OF ON-BOARD MULTISPECTRAL IMAGING SYSTEM FOR ALL-WEATHER AIRCRAFT LANDING

Yu.A. Akopdzhanyan¹, V.V. Bilanchuk¹, V.N. Drynkin¹,
E.Ya. Falkov¹, T.I. Tsareva¹, A.I. Fomenko¹, A.S. Machikhin²

¹Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”, Moscow, Russian Federation
e-mail: fomenko@gosniias.ru; Slava_bil@rambler.ru; drynkinv@gosniias.ru; falkov@gosniias.ru; tsareva@gosniias.ru

²Federal State Budget Institution of Science “Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS”, Moscow, Russian Federation
e-mail: aalexanderr@mail.ru

On-board multispectral imaging system for all-weather aircraft landing is described. Flight tests results on glissade trajectories using light aircraft AC-5 MP at various weather conditions are presented. It is shown that traditional use of visible (0,4...0,8 μm) and thermal infrared (7,5...14,0 μm) spectral channels is not effective at foggy weather; it requires the addition with near-infrared (0,9...1,7 μm) channel.

Keywords: multispectral imaging system, enhanced vision system, optical properties of underlying surface, flight testing.

Введение. В условиях постоянно высокого количества авиационных аварий и катастроф во всем мире проблема обеспечения безопасности на всех этапах полета воздушного судна стала крайне актуальной. Поэтому в настоящее время ведущими мировыми авиационными центрами прилагаются большие усилия для повышения квалификации летного состава, улучшения технического оснащения летательных аппаратов и совершенствования оборудования аэродромов.

Наиболее ответственным этапом, на котором происходит большинство авиационных происшествий, является посадка судна [1]. Малая высота полета и, как следствие, недостаток времени для оценки возникшей проблемы и ее решения делают посадку технически трудным этапом даже для опытного пилота. Если посадка сопровождается сложными метеорологическими условиями, то вероятность возникновения нештатной ситуации и авиапроисшествия существенно возрастает.

Метеоусловия считаются сложными, если метеорологическая дальность видимости (МДВ) составляет менее 2000 м или нижняя граница облаков (НГО) — менее 200 м. В настоящее время перед инженерами-разработчиками авионики остро стоит задача создания бортовой аппаратуры, позволяющей даже в таких условиях получать сведения о точном положении и состоянии взлетно-посадочной полосы (ВПП) для принятия оперативных решений во время снижения и захода на посадку. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию возможностей применения оптической спектральной аппаратуры для решения данной задачи. Приборы, реализующие такой подход и помогающие пилоту принимать правильные решения во время посадки в условиях ограниченной видимости, принято называть системами усиленного видения (СУВ, enhanced vision system).

Внедренными и коммерчески используемыми СУВ являются двухканальные системы, состоящие из оптико-электронных систем (ОЭС) регистрации изображений в видимом (0,4... 0,8 мкм) и дальнем инфракрасном (ИК) (7,5... 14,0 мкм) диапазонах, соответствующих окнам пропускания атмосферы (рис. 1) [2, 3]. Такие системы эффективны в любое время суток, но далеко не в любых погодных условиях. Например, при определенных условиях (дождь, туман и др.) поглощение в указанных спектральных интервалах становится настолько значительным, что дальность действия подобных СУВ не превышает нескольких сотен метров [4, 5]. В связи с этим ведутся разработки систем, в которых кроме перечисленных используется еще одно окно прозрачности атмосферы — ближний ИК-диапазон (0,9... 2,5 мкм), в некоторых случаях являющийся более прозрачным [6, 7]. Однако известные летные испытания приборов до сих пор проводились лишь в

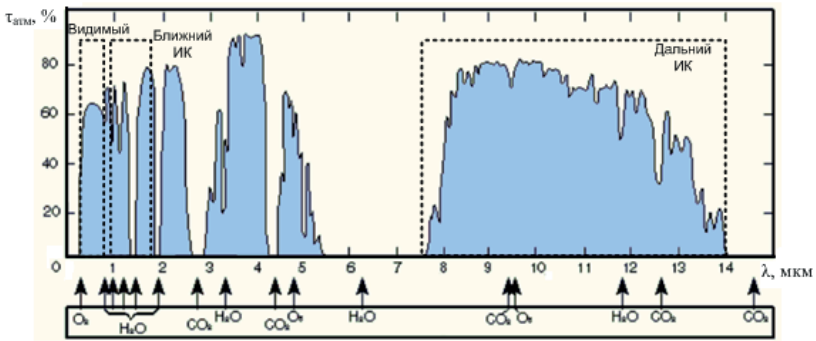


Рис. 1. Спектральная зависимость коэффициента пропускания атмосферы $\tau_{\text{атм}}(\lambda)$ и положение линий поглощения молекул H_2O и CO_2

ясную погоду, хотя и в различное время суток [8, 9]. Результаты экспериментов по применению подобных СУВ в сложных метеоусловиях в литературе отсутствуют.

В настоящей работе представлены результаты наземных и летных экспериментов элементов СУВ, впервые проведенных специалистами ФГУП «ГосНИИАС» и НТЦ УП РАН в 2013 г. для оценки возможностей трехканальных СУВ при реальной эксплуатации воздушного судна в различных метеоусловиях.

Описание комплекса. В разработанном бортовом мультиспектральном регистрирующем комплексе были использованы три ОЭС, функционирующие в видимом (0,38...0,85 мкм), ближнем ИК (0,9...1,7 мкм) и дальнем тепловом ИК (7,5...14,0 мкм) спектральных каналах. Эти интервалы определяются чувствительностью применяемых неохлаждаемых приемников излучения: ПЗС (Si), InGaAs и микроболومتر (a-Si). В эксперименте в качестве средств регистрации видеоинформации применялись цифровые видеокамеры, созданные на основе перечисленных приемников излучения. Объективы для всех спектральных каналов подобраны так, чтобы обеспечить максимально близкие поля зрения, величина которых ($\approx 30^\circ \times 25^\circ$) достаточна для наблюдения ВПП и прилегающей территории со всех рабочих высот полета. Различные по параметрам и интерфейсам приема и передачи данных (таблица) видеокамеры при совместном одновременном использовании требуют применения специализированных программно-аппаратных средств для управления ими, а также для обработки и хранения получаемой с их помощью информации. В качестве блока управления в работе использован малогабаритный промышленный компьютер, оснащенный процессором Core 2 Duo с тактовой частотой до 2,5 ГГц, оперативной памятью 4 Гб при частоте обновления 800 МГц, и твердотельным жестким диском. Блок управления имеет несколько цифровых интерфейсов для подключения внешних устройств, из которых — два порта Gigabit Ethernet и

порт USB 2.0. С учетом параметров блока управления было разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее до полета задавать режим съемки (время экспонирования, усиление, разрядность аналого-цифрового преобразователя (АЦП) и др.) каждой ОЭС и осуществлять в полете синхронную запись изображений с частотой до 15 кадр/с.

Основные параметры используемых ОЭС

Параметр	Канал		
	Видимый	Ближний ИК	Дальний ИК
Спектральный диапазон, мкм	0,4... 0,8	0,9... 1,7	7,5... 14,0
Тип сенсора	ПЗС (Si)	InGaAs	Микроболومتر (a-Si)
Разрешение, пиксел	2448×2050	320×256	384×288
Размер пикселя, мкм	3,5	30,0	25,0
Поле зрения, град	30×25	33×27	30×23
Интерфейс управления и передачи данных	Gigabit Ethernet	USB 2.0	100 Mbit Ethernet
Максимальная разрядность АЦП, бит	12	14	16
Частота кадров при полном разрешении, Гц	15	100	50

Разработанный комплекс установили на легкий летательный аппарат АС-5МР (рис. 2). Предварительно на лабораторном калибровочном стенде оси всех ОЭС были выставлены параллельно и направлены под углом 3° к горизонту для компенсации угла атаки при посадке, а положения ОЭС механически жестко фиксировались так, что относительное смещение центров кадров изображений даже в условиях полета не превышало единиц пикселей.

В перспективе планируется использование в ближнем и дальнем ИК-диапазонах приемников излучения более высокого разрешения

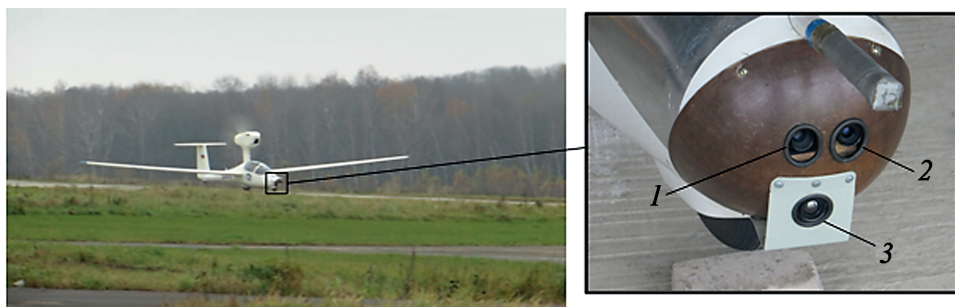


Рис. 2. Внешний вид разработанного комплекса при установке на летательный аппарат АС-5МР:

каналы: 1 — видимый; 2 — ближний ИК; 3 — дальний ИК

(640×480 и 640×512 пиксел). Дооснащение программного обеспечения функцией записи изображения из произвольной области сенсора позволит обеспечить идентичные (с точностью до одного пикселя) поля зрения всех ОЭС. Это при качественной калибровке взаимного положения оптических осей каналов сведет совмещение трех спектральных изображений лишь к устранению их разномасштабности, что при некоторой оптимизации аппаратных средств можно реализовать в режиме, близком к режиму реального времени.

Экспериментальные исследования. Летные испытания разработанного бортового мультиспектрального комплекса были проведены в августе–декабре 2013 г. в разное время суток и при различных метеорологических условиях с предварительным наземным тестированием. Эксперименты проводились на аэродромах “Большое Грызлово” (Московская обл.) и “Кудиново” (Калужская обл.). Одновременно с летными испытаниями были выполнены наземные измерения характеристик подстилающей поверхности и состояния атмосферы. В дневное время суток при ясной погоде, т.е. при значительной МДВ и хорошей освещенности объектов, все три канала, используемые в разработанном комплексе, формируют контрастные информативные изображения, что ранее демонстрировалось другими исследователями [8, 9]. Поэтому рассмотрим лишь некоторые случаи (рис. 3), когда информативными оказываются не все, а только отдельные спектральные интервалы.

Изображения бетонной ВПП в трех спектральных диапазонах, полученные синхронно в сумерки на глиссаде с удалением 2 км при МДВ 10 000 м, НГО 1000 м, температуре воздуха 11 °С и его относительной влажности 63 %, приведены на рис. 3, а. Абсолютный температурный контраст ВПП и фона составил 2,7 °С. При таких метеорологических условиях контрастное положение ВПП формируют видимый и дальний ИК-каналы, в то время как ближний ИК-канал недостаточно информативен.

Изображения той же ВПП, полученные с удалением 1 км в темное время суток в ясную погоду при МДВ 10 000 м, НГО 1000 м, температуре воздуха 10 °С и его относительной влажности 70 % показаны на рис. 3, б. Абсолютный температурный контраст ВПП и фона также составил 2,7 °С. В это время суток информативное изображение формируется только ОЭС, работающей в тепловом диапазоне, в то время как видимый и ближний ИК-канал, регистрирующие отраженное излучение, не эффективны.

Изображения, полученные в дневное время суток в условиях низкой облачности на глиссаде с удалением 2 км при горизонтальной МДВ 5 000 м, НГО 80 м, температуре воздуха 5 °С и его относительной влажности 96 %, представлены на рис. 3, в. Абсолютный темпе-

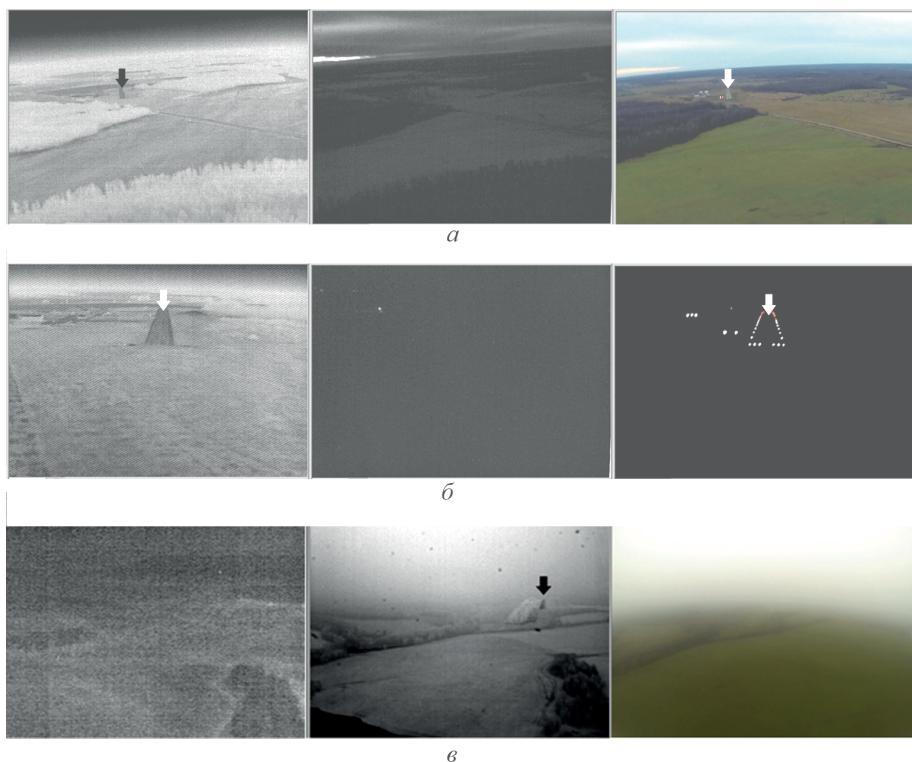


Рис. 3. Изображения бетонной ВПП в трех спектральных диапазонах (слева 7,5...14,0 мкм, в центре 0,9...1,7 мкм, справа 0,4...0,8 мкм), полученные с помощью разработанного бортового мультиспектрального комплекса, в разных метеорологических условиях (стрелкой показано положение ВПП):

a — сумерки, МДВ 10 000 м, НГО 1000 м; *б* — ночь, МДВ 10 000 м, НГО 1000 м; *в* — день, МДВ 5000 м, НГО 80 м

ратурный контраст ВПП и фона 0,6 °С. При указанных метеорологических условиях ни видимый, ни дальний ИК-канал не оказываются эффективными. Только ОЭС, работающая в ближнем ИК-диапазоне, формирует информативное изображение ВПП.

Заключение. Проведенные летные экспериментальные исследования показывают, что в сложных метеоусловиях зачастую недостаточно двух традиционно используемых каналов регистрации видеoinформации: видимого (0,4...0,8 мкм) и теплового (7,5...14 мкм). Дополнение СУВ третьим ближним (0,9...1,7 мкм) ИК-каналом позволяет в условиях низкой облачности значительно повысить дальность действия и информативность СУВ и, следовательно, дать пилоту больше времени для принятия решения во время снижения летательного аппарата, захода на посадку и его посадки.

В настоящее время на базе описанного бортового оптико-электронного комплекса мультиспектральной регистрации изображений разрабатывается СУВ реального времени для всепогодной посадки летательных аппаратов.

Авторы выражают благодарность администрациям ФИНАМ ООО “Большое Грызлово” (Московская обл.) и Авиационного комплекса “Кудиново” (Калужская обл.) за базирование и диспетчерское сопровождение летных испытаний, ООО “АБ Оптик” (Москва) — за безвозмездно предоставленную ИК-аппаратуру, ЗАО “Авиафотоинформ” (Москва) — за предоставленный в аренду летательный аппарат АС-5МР.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Planecrashinfo.com STATISTICS*. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.planecrashinfo.com/cause.htm> (дата обращения: 06.02.2014).
2. *Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения: Курс лекций и практических занятий / Ю.В. Визильтер, С.Ю. Желтов, А.В. Бондаренко, М.В. Ососков, А.В. Моржин*. М.: Физматкнига, 2010. 672 с.
3. *Система улучшенного видения EVS для самолетов фирмы “Гольфстрим” // Экспресс-информация. Авиационные системы*. 2001. № 48. С. 3–4.
4. *Chen C. Attenuation of electromagnetic radiation by haze, fog, clouds and rain // Report R-1694-PR, 1975. 41 p.* [Электронный ресурс]. URL: <http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2006/R1694.pdf> (дата обращения: 06.02.2014).
5. *Measurement and modeling of infrared imaging systems of conditions of reduced visibility (fog) for traffic applications / K. Beier, R. Boehl, J. Fries, W. Hahn, D. Hausamann, V. Tank, G. Wagner, H. Weisser*. // *Proc. SPIE*. 1994. Vol. 2223. P. 175–186.
6. *Lane R. The SWIR advantage // Proc. SPIE*. 1995. Vol. 2555. P. 246–255.
7. *Hansen M., Malchow D. Overview of SWIR detectors, cameras and applications // Proc. SPIE*. 2008. Vol. 6939. P. 69390I-1–69390I-11.
8. *Hinesa G., Rahman Z., Jobson D., Woodell G. Multi-image registration for an enhanced vision system // Proc. SPIE*. 2003. Vol. 5108. P. 231–241.
9. *Real-time enhanced vision system / G. Hinesa, Z. Rahman, D. Jobson, G. Woodell, S. Harrah*. // *Proc. SPIE*. 2005. Vol. 5802. P. 127–132.

REFERENCES

- [1] *PlaneCrashInfo.com, STATISTICS*. Available at: <http://www.planecrashinfo.com/cause.htm> (accessed 02.02.2014).
- [2] *Vizil'ter Yu.V., Zheltov S.Yu., Bondarenko A.V., Ososkov M.V., Morzhin A.V. Obrabotka i analiz izobrazheniy v zadachakh mashinnogo zreniya: Kurs lektсий i prakticheskikh zanyatiy [Processing and image analysis in computer vision's problems]*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 672 p.
- [3] *EVS enhanced vision system for aircraft company "Gulf Stream". Ekspress-informatsiya. Aviatsionnye sistemy [Express information. Aviation systems]*, 2001, no. 48, pp. 3–4 (in Russ.). Available at: <http://www.gosniias.ru/issue.php?y=2001> (accessed 02.02.2014).
- [4] *Chen C. Attenuation of electromagnetic radiation by haze, fog, clouds and rain. Report R-1694-PR, 1975*. Available at: <http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/reports/2006/R1694.pdf> (accessed 06.02.2014).
- [5] *Beier K., Boehl R., Fries J., Hahn W., Hausamann D., Tank V., Wagner G., Weisser H. Measurement and modeling of infrared imaging systems of conditions of reduced visibility (fog) for traffic applications. Proc. SPIE, 1994, vol. 2223, pp. 175–186.*

- [6] Lane R. The SWIR advantage. *Proc. SPIE*, 1995, vol. 2555, pp. 246–255.
- [7] Hansen M., Malchow D. Overview of SWIR detectors, cameras and applications. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 6939, pp. 69390I–69390I-11.
- [8] Hinesa G., Rahman Z., Jobson D., Woodell G. Multi-image registration for an enhanced vision system. *Proc. SPIE*, 2003, vol. 5108, pp. 231–241.
- [9] Hinesa G., Rahman Z., Jobson D., Woodell G., Harrah S. Real-time enhanced vision system. *Proc. SPIE*, 2005, vol. 5802, pp. 127–132.

Статья поступила в редакцию 21.02.2014

Юрий Аршалуйсович Акопджанян — канд. техн. наук, начальник сектора ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”. Автор 52 научных работ в области авиационных пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов.

ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”, Российская Федерация, 125167, Москва, ул. Викторенко, д. 7.

Yu.A. Akopdzhanyan — Cand. Sci. (Eng.), head of department of the Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”. Author of 52 publications in the field of aircraft manned and unmanned aerial vehicles.

Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”, ul. Viktorenko 7, Moscow, 125167 Russian Federation.

Вячеслав Викторович Биланчук — инженер ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”. Специализируется в области бортового радиотехнического оборудования.

ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”, Российская Федерация, 125167, Москва, ул. Викторенко, д. 7.

V.V. Bilanchuk — engineer of the Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”. Specializes in the field of on-board radio engineering equipment. Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”, ul. Viktorenko 7, Moscow, 125167 Russian Federation.

Владимир Николаевич Дрынкин — начальник сектора ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”. Автор 11 научных работ в области оптико-электронных систем и обработки изображений.

ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”, Российская Федерация, 125167, Москва, ул. Викторенко, д. 7.

V.N. Drynkin — head of department of the Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”. Author of 11 publications in the field of opto-electronic systems and image processing.

Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”, ul. Viktorenko 7, Moscow, 125167 Russian Federation.

Эдуард Яковлевич Фальков — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”. Автор 50 научных работ в области авиационного дистанционного зондирования.

ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”, Российская Федерация, 125167, Москва, ул. Викторенко, д. 7.

E. Ya. Fal'kov — Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of the Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”. Author of 50 publications in the field of airborne remote sensing.

Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”, ul. Viktorenko 7, Moscow, 125167 Russian Federation.

Анатолий Иванович Фоменко — ведущий инженер ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”. Автор 10 научных работ в области бортового механического оборудования.

ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”, Российская Федерация, 125167, Москва, ул. Викторенко, д. 7.

A.I. Fomenko — leading engineer of the Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”. Author of 10 publications in the field of on-board mechanical equipment.

Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”, ul. Viktorenko 7, Moscow, 125167 Russian Federation.

Татьяна Игоревна Царёва — канд. биол. наук, старший научный сотрудник ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”. Автор 19 научных работ в области исследования физических характеристик подстилающих поверхностей.

ФГУП “Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем”, Российская Федерация, 125167, Москва, ул. Викторенко, д. 7.

T.I. Tsareva — Cand. Sci. (Biol.), senior researcher of the Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”. Author of 19 publications in the field physical characteristics of the underlying surfaces.

Federal State Unitary Enterprise “State Research Institute of Aviation Systems”, ul. Viktorenko 7, Moscow, 125167 Russian Federation.

Александр Мачихин — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ФГБУН “Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН”. Автор 50 научных работ в области видеоспектрометрии, обработки изображений и тепловидения.

ФГБУН “Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН”, Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15.

A.S. Machikhin — Cand. Sci. (Phys.-Math.), senior researcher of the FSBIS “Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS”. Author of 50 publications in the field of imaging spectrometry, image processing and infrared imagery.

FSBIS “Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation RAS”, ul. Butlerova 15, Moscow, 117342 Russian Federation.