

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-11-113-123

УДК 520.35

Оптическая система мультиспектральной видеокамеры

Владислав Игоревич Батшев^{1✉}, Александр Владимирович Крюков²,
Александр Сергеевич Мачихин³, Анастасия Александровна Золотухина⁴

^{1, 2, 3, 4}Научно-технологический центр уникального приборостроения Российской академии наук,
Москва, Россия

^{1, 2}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

¹batshev.vi@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

²alex_krioukov@mail.ru <https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>

³machikhin@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

⁴zolotukhina.aa@ntcup.ru <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>

Аннотация

Предмет исследования. Методика проектирования оптико-электронной системы, обеспечивающей одновременное получение широкополосного и 15 спектральных изображений. **Цель работы.** Разработка и апробация мультиспектральной видеокамеры на основе системы объективов, формирующей изображения на одном матричном приемнике в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра и обладающей достаточно широким полем зрения и светосилой. **Метод.** Предлагаемое решение основано на системе объективов, построенных по схеме реверсивного телеобъектива с вынесенным входным зрачком, независимо оптимизированных для каналов ультрафиолетового и видимого/ближнего инфракрасного диапазонов. Описанная методика проектирования объективов позволяет обеспечить минимальные поперечные габариты, равенство масштабов спектральных изображений, а также возможность фокусировки каждого объектива независимо от остальных объективов. **Основные результаты.** Разработанная мультиспектральная оптико-электронная система позволяет синхронно регистрировать 16 изображений: одно широкополосное и 15 спектральных изображений в диапазоне 300–1000 нм с равным шагом (50 нм) и шириной (10 нм) спектральных каналов. Приведены результаты моделирования, данные для абберационного анализа и тестовые изображения, полученные во всех 16-ти каналах, демонстрирующие высокое качество изображений. Апробация рассчитанной системы объективов проведена в составе макета мультиспектральной видеокамеры. Зарегистрированы изображения растительного образца, по результатам их обработки получена спектральная зависимость коэффициента отражения, соответствующая типичному спектру отражения листьев растений. **Практическая значимость.** Предложенная мультиспектральная оптико-электронная система позволяет обеспечить высокое качество изображений в каждом спектральном канале и их простую замену на наиболее эффективные в решении задачи производительного сбора пространственно-спектральных данных в точном земледелии, экомониторинге, медицине и неразрушающем контроле.

Ключевые слова: мультиспектральная камера, оптико-электронная система, синтез объектива, ультрафиолетовый диапазон, ближний инфракрасный диапазон

Благодарность: работа выполнена в рамках Государственного задания НТИЦ УП РАН (проект FFNS-2022-0010).

Ссылка для цитирования: Батшев В.И., Крюков А.В., Мачихин А.С., Золотухина А.А. Оптическая система мультиспектральной видеокамеры // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 11. С. 113–123. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-113-123>

Коды OCIS: 110.4234, 110.0110, 120.4820

Multispectral video camera optical system

VLADISLAV I. BATSEV¹✉, ALEXANDER V. KRIOUKOV²,
ALEXANDER S. MACHIKHIN³, ANASTASIA A. ZOLOTUKHINA⁴

^{1, 2, 3, 4}Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^{1, 2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹batshev.vi@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>

²alex_krioukov@mail.ru

<https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>

³machikhin@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>

⁴zolutukhina.aa@ntcup.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>

Abstract

Subject of study. A method for designing an optical-electronic system that provides simultaneous acquisition of wideband and 15 spectral images. **Aim of study.** Development and testing of a multispectral video camera based on a system of lenses that form images on a single sensor in the ultraviolet, visible and near infrared spectral ranges. **Method.** The proposed solution is based on a lens system of two optical configurations of a reversing telephoto lens with a remote entrance pupil, independently optimized for ultraviolet and visible/near infrared channels. The described design technique ensures minimum transverse dimensions, equal scales of spectral images, and the possibility of installing a light filter between the last surface of the lens and the image plane. **Main results.** The developed multispectral optoelectronic system synchronously captures 15 spectral images in the range of 300–1000 nm with an equal step (50 nm) and width (10 nm) of spectral channels. The results of modeling and data for assessing the quality of images in the ultraviolet, visible and near infrared ranges, as well as in the broadband channel are presented. Testing of the designed lens system was carried out as a prototype of a multispectral video camera. After correcting the recorded spatial-spectral data of the plant sample and averaging over its area, the spectral reflectance was obtained, which coincides with the typical reflectance spectrum of plant leaves. **Practical significance.** The proposed multispectral optoelectronic system provides high quality images in each spectral channel and their easy replacement with the most efficient ones for solving the problem of rapid collection of spatio-spectral data in precision agriculture, eco-monitoring, medicine and non-destructive testing.

Keywords: multispectral camera, optoelectronic system, lens synthesis, ultraviolet range, near infrared range

Acknowledgment: the work was carried out within the framework of the State Assignment of the Scientific and Technological Centre of Unique Instrumentation of the RAS (project FFNS-2022-0010).

For citation: Batshev V.I., Krioukov A.V., Machikhin A.S., Zolotukhina A.A. Multispectral video camera optical system [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 11. P. 113–123. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-11-113-123>

OCIS codes: 110.4234, 110.0110, 120.4820

ВВЕДЕНИЕ

Приборы для пространственно-спектрального анализа получили широкое распространение при решении задач экомониторинга [1], сельского хозяйства [2], неразрушающего контроля [3], биологии и медицины [4, 5].

Они позволяют проводить качественные и количественные исследования спектрального состава излучения, испускаемого, поглощаемого, отражаемого или рассеиваемого объектом, и таким образом судить о его свойствах, химическом составе и характере физических

процессов, связанных с излучением или взаимодействием света с веществом объекта. Для получения спектральных изображений используются разные подходы и аппаратура, отличающиеся физическими принципами, пространственным и спектральным разрешением, скоростью сбора данных [6, 7].

Зачастую, например, при ограниченном перечне исследуемых объектов с заранее известными спектральными свойствами или в случае нескольких заданных спектральных интервалов, в которых необходимо проводить анализ, достаточной оказывается регистрация небольшого конечного числа (обычно 5–15) спектральных изображений [8, 9]. При этом прибор настроен на те фиксированные оптимальные интервалы спектра излучения, где отсутствуют фоновые помехи и наиболее интенсивно проявляются физические, химические и другие свойства исследуемого объекта, что позволяет получить изображение, контрастно отображающее именно эти свойства. Такой подход, называемый мультиспектральной съемкой, позволяет уменьшить объем регистрируемых пространственно-спектральных данных и увеличить скорость их сбора и обработки.

При необходимости одновременной регистрации всего массива мультиспектральных данных, что важно, например, при использовании подвижных носителей или исследовании нестационарных объектов, спектральное или пространственное сканирование оказывается недопустимым. В этих случаях применяются оптико-электронные системы (ОЭС), обеспечивающие синхронную регистрацию нескольких изображений одним матричным приемником излучения (МПИ).

Такие системы делятся на три основных типа. Первый предполагает использование нескольких независимых ОЭС, работающих в требуемых спектральных интервалах [10–12]. При этом, как правило, число спектральных каналов не велико и ограничено требованиями к массе, габаритам, энергопотреблению и стоимости изделия. Второй тип систем для одновременной регистрации нескольких спектральных изображений основан на применении специализированных МПИ с попиксельной спектральной фильтрацией [13]. В этом случае может использоваться стандартный объектив, однако число, положения и ширина спек-

тральных каналов не подлежат управлению и изменению. Третий тип мультиспектральных систем предполагает применение нескольких миниатюрных объективов, оснащенных спектральными фильтрами и одновременно формирующих изображения на одном МПИ [14, 15]. В этом случае прибор оказывается свободен от указанных ранее недостатков, однако требует использования специализированной многоканальной оптической системы и дорогостоящего МПИ большого размера и высокого разрешения. Представленные на сегодняшний день решения не реализованы в широком спектральном диапазоне без снижения качества изображений.

Целью настоящей работы являются разработка и экспериментальная апробация ОЭС третьего типа — мультиспектральной видеокамеры на основе системы объективов, формирующей изображения на одном матричном приемнике в ультрафиолетовом (УФ), видимом и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах спектра и обладающей достаточно широким полем зрения и светосилой.

ПРЕДЛАГАЕМОЕ РЕШЕНИЕ

Схема компоновки предлагаемой мультиспектральной ОЭС [16] представлена на рис. 1, в которой в качестве МПИ используется сенсор КМОП *Gpixel GSENSE400BSI* с разрешением 2048×2048 пикселей, диагональю 22,5×22,5 мм и широким спектральным диапазоном чувствительности 0,25–1,0 мкм. 16 объективов формируют изображения в области 512×512 пикселей. Светофильтры установлены вблизи МПИ и выполняют также роль диафрагм, ограничивающих поля зрения каждого канала и не позволяющих этим полям накладываться друг на друга. Объективы установлены в индивидуальных оправах, не позволяющих излучению проходить через соседние светофильтры и дающих возможность их независимой фокусировки при сборке мультиспектральной камеры. Кроме того, опорные поверхности оправ выступают в качестве апертурных диафрагм.

Поле изображения, ограниченное светофильтром, представляет собой круг диаметром 5 мм. Перед объективами установлено защитное стекло. Длины волн в нанометрах, соответствующие максимумам пропускания

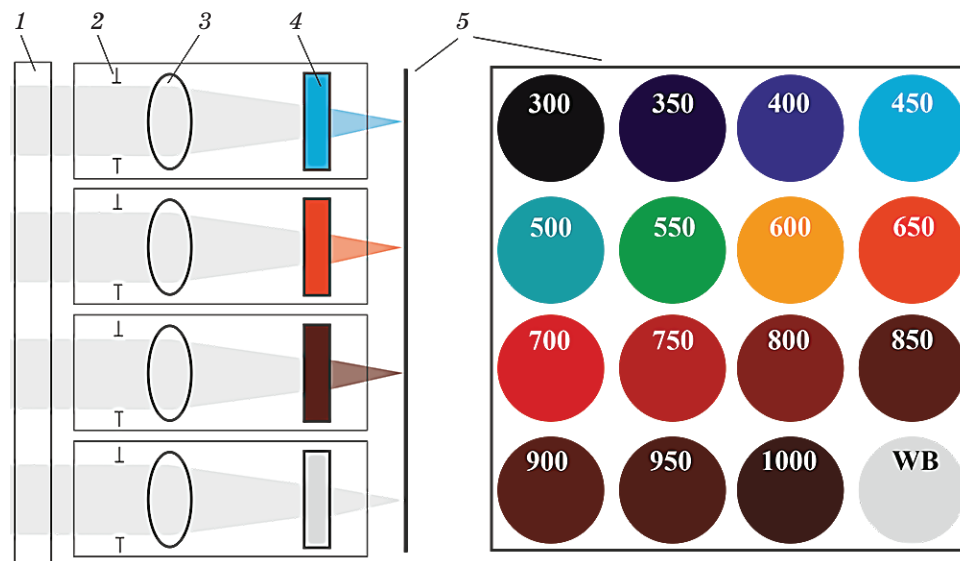


Рис. 1. Схема компоновки мультиспектральной камеры. Защитное стекло — 1, апертурные диафрагмы — 2, 16 объективов — 3, светофильтры — 4, МПИ — 5. WB — широкополосный канал

Fig. 1. Multispectral camera scheme. (1) Protective glass, (2) aperture diaphragms, (3) 16 lenses, (4) filters, (5) matrix radiation detector. WB is broadband channel

светофильтров, представлены на рис. 1. Ширина пропускания каждого фильтра по уровню 0,5 составляет 10 нм. Один из каналов, обозначенный на рис. 1 как «WB», является широкополосным. В нем вместо спектрального установлен нейтральный фильтр, уменьшающий освещенность изображения до значений, сопоставимых с освещенностями в узкополосных каналах.

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОБЪЕКТИВОВ

Ввиду широкого спектрального диапазона предлагаемой мультиспектральной ОЭС в ней применяются две конфигурации объективов, различающихся оптическими схемами. Коррекция aberrаций, прежде всего хроматических, во всем диапазоне 300–1000 нм может быть выполнена лишь в сложной многолинзовой системе, что приведет к сложности изготовления и сборки объективов. Хотя каждый отдельно взятый объектив работает в узком спектральном интервале, необходимо обеспечить равенство масштабов спектральных изображений, т.е. хроматизм увеличения должен быть исправлен. Как показали расчеты, наиболее простыми получатся оптические системы объективов, если первая конфигура-

ция оптимизирована для каналов в УФ диапазоне (300 и 350 нм), а вторая — для всех остальных спектральных каналов видимого и ближнего ИК диапазонов и широкополосного канала.

Объективы обеих конфигураций обладают одинаковыми фокусными расстояниями $f' = 8$ мм, чем достигается равенство полей зрения: при диаметре изображения $2y' = 5$ мм угловое поле в пространстве предметов составляет

$$2\omega = 2\arctg(y'/f') = 35^\circ.$$

Диаметры линз объективов исчисляются 4,3 мм, что позволяет установить их в индивидуальных цилиндрических оправках с внешним диаметром 5 мм, имеющих возможность продольного смещения для формирования изображения в плоскости наилучшей установки. В качестве апертурной диафрагмы выступает опорная поверхность оправы, расположенная первой по ходу лучей на расстоянии $s_p = 2$ мм от первой поверхности объектива. Диаметр апертурной диафрагмы 2,5 мм, при этом относительное отверстие каждого из объективов 1:3,2.

Ниже представлена методика расчета, общая для объективов обеих конфигураций. Минимальные поперечные габариты линз объектива могут быть обеспечены при использовании оптической схемы реверсивного теле-

объектива с вынесенным входным зрачком [17]. Увеличенный по сравнению с обычными объективами задний фокальный отрезок позволяет разместить светофильтр между последней поверхностью объектива и плоскостью изображения.

Структурная схема реверсивного телеобъектива с вынесенным входным зрачком, построенная на основе толстого мениска и расположенного на конечном расстоянии тонкого последующего компонента, представлена на рис. 2. Толстый мениск, обращенный вогнутой поверхностью к пространству предметов, выступает в качестве корректора aberrаций высших порядков, как например в работе [18]. При любой оптической силе Φ_I мениска можно обеспечить выполнение условия реверсивного телеобъектива, когда задний фокальный отрезок $a'_{F'}$ превышает фокусное расстояние объектива [16]. При размещении апертурной диафрагмы и совпадающего с ней входного зрачка вблизи передней фокальной плоскости объектива достигается близкий к телецентрическому ход главного луча в пространстве изображений, что важно для уменьшения углов падения лучей наклонных пучков на светофильтры [19].

Внешние параметры схемы, к которым относятся оптические силы компонентов, рассто-

яние между компонентами и конструктивные параметры мениска, должны быть рассчитаны из условий обеспечения заданных масштаба, значения коэффициента $k_t = a'_{F'}/f'$ реверсивного телеобъектива (принят равным 1,23), коррекции кривизны поля изображения и телецентрического хода главного луча в пространстве изображений.

Значение коэффициента k_t было определено эмпирически. Впоследствии при оптимизации было допущено некоторое отступление от приведенных выше условий.

Конструктивные параметры объективов рассчитаны на основе теории aberrаций III порядков после определения внутренних параметров схемы. К последним относятся aberrационные параметры P_{II} , W_{II} , C_{II} тонкого компонента, которые обеспечивают получение заданной коррекции двух монохроматических и одной хроматической aberrаций — меридиональной комы, астигматизма и хроматизма увеличения.

Базовые схемы объективов обеих конфигураций синтезировались на основе описанного метода, а затем оптимизировались с использованием программного обеспечения ZEMAX. Итоговые оптические схемы объективов представлены ниже.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБЪЕКТИВА ВИДИМОГО И БЛИЖНЕГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНОВ

Оптическая система спектрального канала, рассчитанного на работу в видимой и ближней ИК областях спектра, смоделированная для анализа в программе ZEMAX, приведена на рис. 3а. Оптические и габаритные характеристики объектива для узких спектральных каналов с полосой пропускания 10 нм (в пределах диапазона 400–1000 нм) следующие: фокусное расстояние от 8,1 мм (при длине волны излучения $\lambda = 400$ нм) до 8,2 мм (при $\lambda = 1000$ нм), относительное отверстие 1:3,3, расстояние от первой поверхности защитного стекла до плоскости изображения 25 мм. При таких ограничениях на диаметры линз неизбежно виньетирование наклонных пучков, которое в данной схеме составляет около 50%. Это сказывается на изображении, но в целом его можно считать приемлемым, как будет показано при обсуждении изготовленного опытного образца данной мультиспектральной ОЭС.

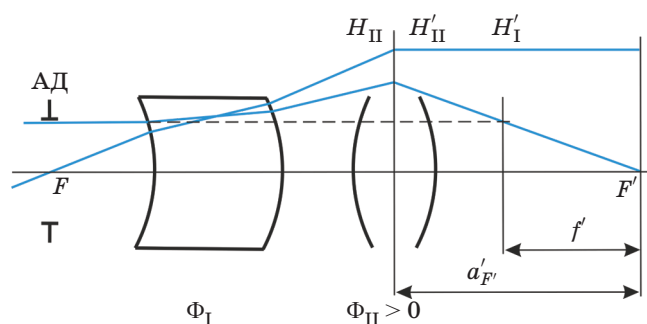


Рис. 2. Структурная схема реверсивного телеобъектива с вынесенным зрачком. АД — апертурная диафрагма, Φ_I , Φ_{II} — оптические силы фронтального мениска и последующего компонента, H_{II} , H'_{II} — главные плоскости последующего компонента, H'_I — эквивалентная задняя главная плоскость

Fig. 2. The structure of a reverse telephoto lens with a remote entrance pupil. АД is aperture diaphragm, Φ_I , Φ_{II} are optical powers of the frontal meniscus lens and the subsequent component, H_{II} , H'_{II} are principal planes of the subsequent principal component, H'_I is equivalent secondary principal plane

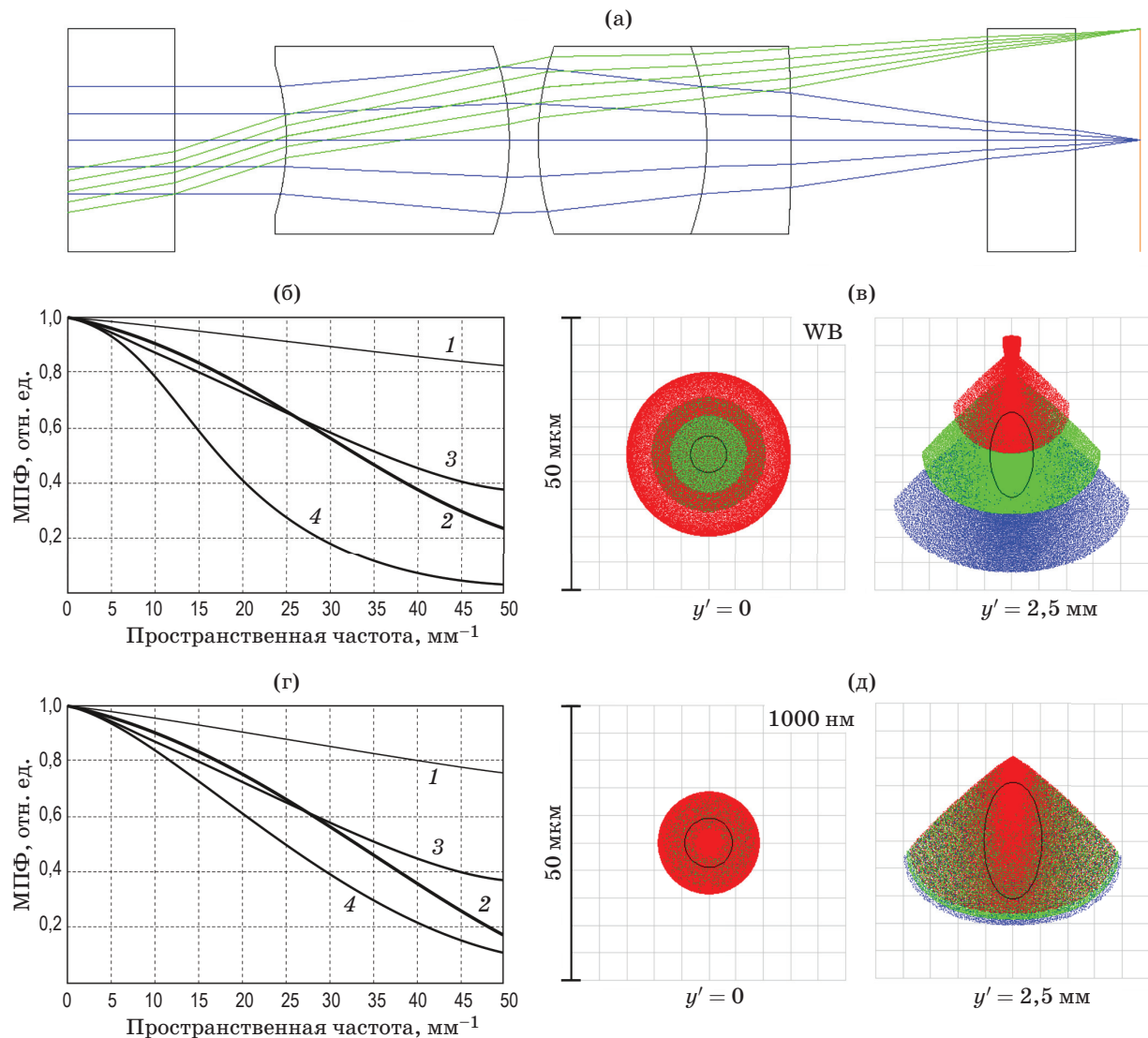


Рис. 3. Объектив видимого и ближнего ИК спектральных диапазонов. Оптическая схема (а), МПФ в широкополосном канале (б) и в канале 1000 нм (г), линия 1 показывает дифракционный предел оптической системы, МПФ в центре поля — 2, в сагиттальном сечении крайнего пучка — 3, в меридиональном сечении крайнего пучка — 4. Диаграммы пятен рассеяния в широкополосном канале (в) и в канале 1000 нм (д)

Fig. 3. Visible and near infrared ranges lens. (a) Optical design, modulation transfer functions in (б) the broadband channel and in (г) the 1000 nm channel, line 1 shows the diffraction limit of the optical system, the modulation transfer functions in (2) the center of the field, in (3) the sagittal section of the extreme beam, in (4) the tangential section of the extreme beam. Scattering spot diagrams in (в) the broadband channel and in (д) the 1000 nm channel

Таблица 1. Модуляционная передаточная функция на критической частоте в каналах видимого и ближнего ИК диапазонов

Table 1. Modulation transfer function at the critical frequency in the channels of the visible and near infrared ranges

$y', \text{ мм}$	Спектральный канал, нм													
	400	450	500	550	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	WB
0	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33	0,32	0,3	0,29	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26	0,28
2,5	0,35	0,31	0,29	0,28	0,27	0,26	0,27	0,27	0,27	0,28	0,28	0,29	0,29	0,2

На рис. 3 также представлены данные для оценки качества изображения в широкополосном канале (рис. 3б, в) и в канале 1000 нм (рис. 3г, д): графики полихроматической модуляционной передаточной функции (МПФ), диаграммы пятен рассеяния. Модуляционную передаточную функцию следует оценивать на критической пространственной частоте, соответствующей частоте Найквиста, которая для используемого приемника излучения с размером пиксела 11 мкм составляет 45 мм^{-1} . Во всех спектральных каналах характер кри-

вых МПФ в анализируемом частотном диапазоне такой же, как на рис. 3: они плавно убывают, МПФ в центре поля и в сагиттальном сечении крайнего пучка очень близки, а МПФ в меридиональном сечении крайнего пучка ниже остальных кривых, но не достигает нуля. Дифракционный предел представленной на рис. 3а оптической схемы демонстрирует линия 1.

По виду пятен рассеяния (рис. 3д) можно сделать вывод о наличии остаточного хроматизма увеличения, который в диапазоне

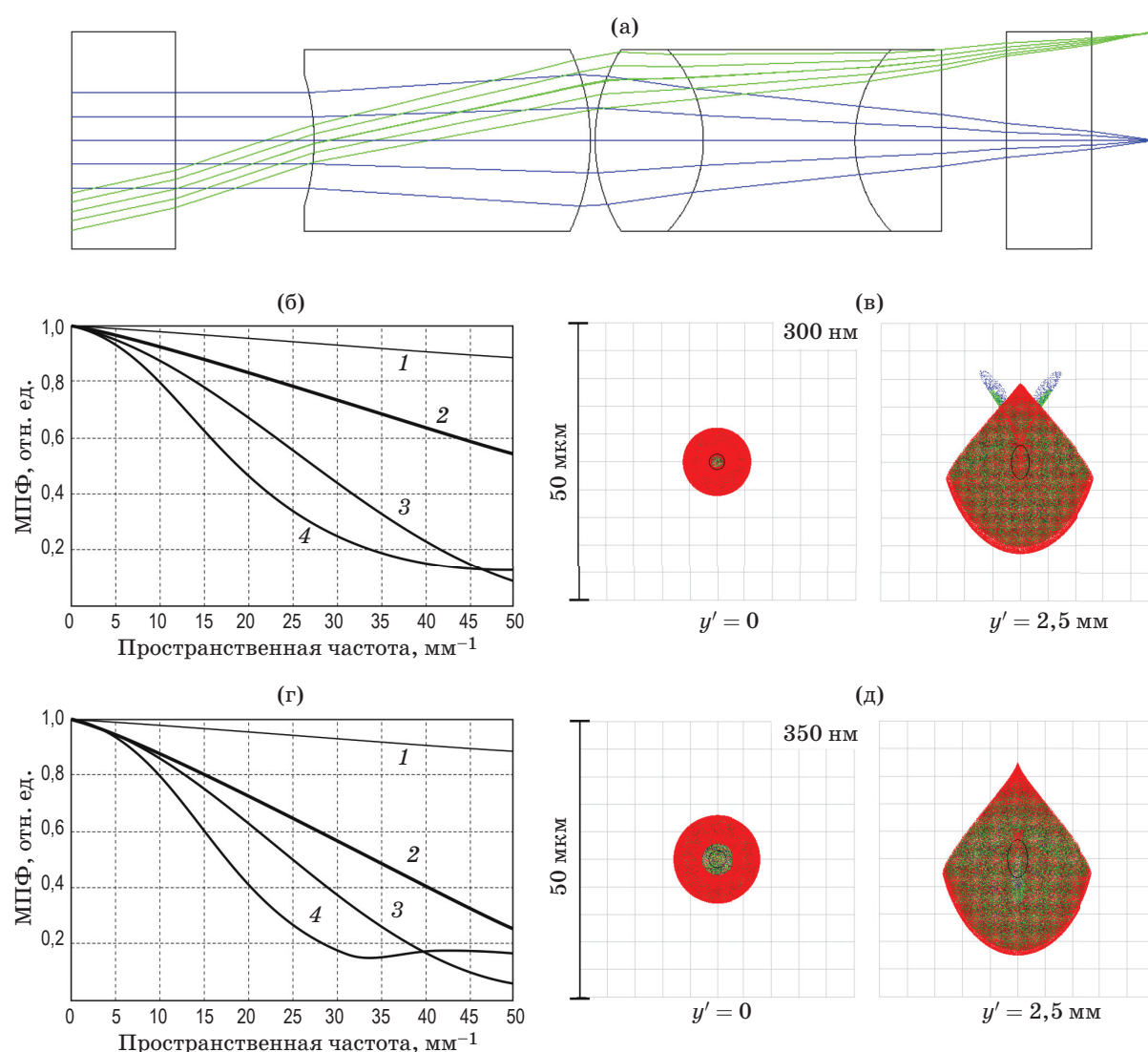


Рис. 4. Объектив УФ спектрального диапазона. Оптическая схема (а), МПФ (обозначения кривых см. в подписи к рис. 3) в канале 300 нм (б) и в канале 350 нм (г), диаграммы пятен рассеяния в канале 300 нм (в) и в канале 350 нм (д)

Fig. 4. Ultraviolet spectral range lens. (a) Optical scheme, modulation transfer functions in (б) the 300 nm channel and in (г) the 350 nm channel (for curve designations, see caption to Fig. 3), scattering spot diagrams in (в) the 300 nm channel and in (д) the 350 nm channel

400–1000 нм составляет 15 мкм, что соответствует 1,4 пиксела МПИ.

В табл. 1 приведены значения МПФ на критической частоте во всех спектральных каналах, значения на крае поля усреднялись по меридиональному и сагиттальному сечениям.

Видно, что МПФ на критической частоте в любой точке изображения в любом спектральном канале не хуже 0,2, что удовлетворяет критерию Фуко для разрешающей способности.

ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБЪЕКТИВА УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ДИАПАЗОНА

Так как большинство оптических стекол непрозрачны на длинах волн менее 300 нм, в качестве материалов объективов УФ каналов использованы кварцевое стекло КУ-1, а также фториды кальция и магния.

Оптическая система спектрального канала, рассчитанного на работу в УФ области спектра,

смоделированная для анализа в программе ZEMAX, а также графики для оценки качества изображения, представлены на рис. 4. Силовой компонент получился сложнее, чем в объективе видимых и ИК каналов, что обусловлено большим наклоном дисперсионных кривых оптических материалов в УФ области, а также меньшей их номенклатурой, и как следствие — более сложной абберационной коррекцией. Оптические и габаритные характеристики объектива обоих УФ каналов (300 и 350 нм)

Таблица 2. Модуляционная передаточная функция на критической частоте в каналах УФ диапазона
Table 2. Modulation transfer function at the critical frequency in the channels of the ultraviolet range

$y', \text{ мм}$	Спектральный канал, нм	
	300	350
0	0,2	0,18
2,5	0,4	0,25

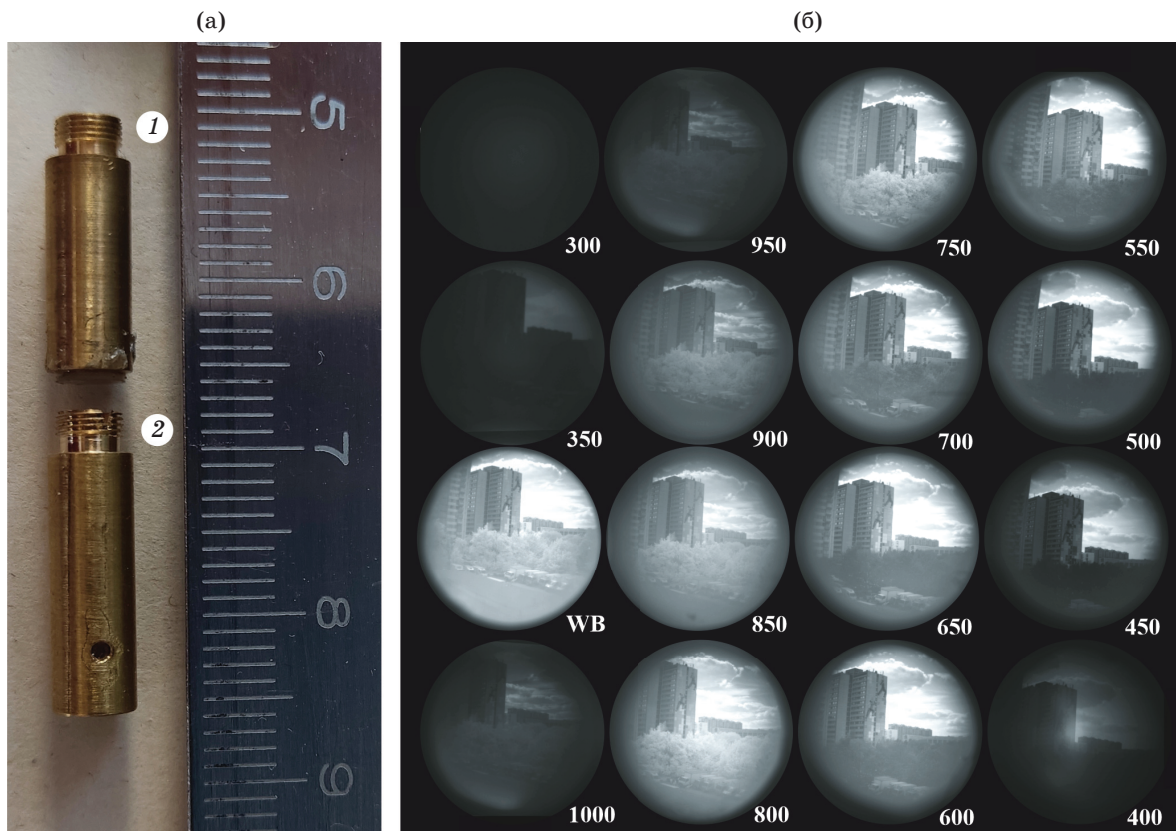


Рис. 5. Внешний вид объективов в оправе (а) и пример зарегистрированного изображения (б). Конфигурация для видимого и ИК диапазонов обозначена цифрой 1, УФ диапазона — 2

Fig. 5. (a) Lenses and (b) an example of a registered image. The configuration for the visible and infrared ranges is indicated by the number 1, the UV range — 2

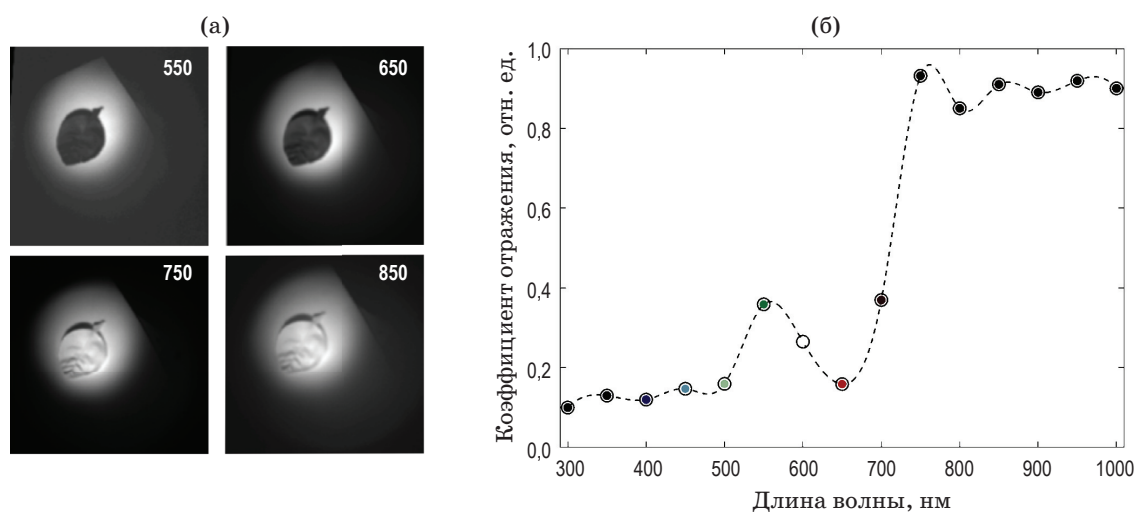


Рис. 6. Примеры 4 из 15 зарегистрированных спектральных изображений (а) и измеренный по ним спектр отражения листа *Hibiscus rosa-sinensis* при освещении его галогенной лампой (б)

Fig. 6. (a) Examples of 4 out of 15 registered spectral images and (б) the *Hibiscus rosa-sinensis* leaf reflectance spectrum measured from them when illuminated with a halogen lamp

следующие: фокусное расстояние 8,2 мм, относительное отверстие 1:3,3, расстояние от первой поверхности защитного стекла до плоскости изображения 25 мм.

Значения МПФ на критической частоте 45 мм^{-1} обоих УФ каналов в центре поля зрения и на краю приведены в табл. 2.

Видно, что в любой точке изображения в обоих спектральных каналах объектив формирует изображение удовлетворительного качества.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассчитанные объективы были изготовлены, собраны и протестированы на предмет качества формируемых изображений в составе опытного образца мультиспектральной ОЭС. Внешний вид объективов и пример зарегистрированного данной камерой изображения представлены на рис. 5.

Пространственно-спектральная калибровка опытного образца мультиспектральной ОЭС с учетом спектра излучения используемого источника позволила определить поправочные коэффициенты для коррекции интенсивности в зарегистрированных спектральных изображениях и корректного вычисления спектров отражения наблюдаемых объектов [20].

На рис. 6а приведены примеры 4 из 15 спектральных изображений листа комнатного рас-

тения *Hibiscus rosa-sinensis* при освещении его галогенной лампой мощностью 150 Вт. Усредненная по его площади спектральная зависимость коэффициента отражения, вычисленная после коррекции зарегистрированных изображений, приведена на рис. 6б и по форме соответствует типичному спектру отражения листьев растений [21]. Эти и другие экспериментальные данные свидетельствуют о достаточно высоком качестве регистрируемых изображений и возможности вычислять по ним пространственное распределение спектральных свойств исследуемых объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате разработана оптическая схема мультиспектральной видеокамеры, обеспечивающей одновременное получение широкополосного и 15 спектральных (в диапазоне 300–1000 нм с шагом 50 нм) изображений объектов с расстояния от 2 м до бесконечности в пределах углового поля $35\text{--}35^\circ$ без пространственного или спектрального сканирования. При этом все 15 узкополосных изображений оказываются пространственно и спектрально разнесены. Это позволяет обеспечить идентичные поля зрения и одинаково высокое качество изображения в каждом спектральном канале. Индивидуальная конструкция каждого объектива позволяет повысить относи-

тельное отверстие и при необходимости регулировать относительную освещенность за счет введения ослабляющих фильтров. В зависимости от решаемых задач оптическая схема каждого канала может быть оснащена светофильтрами с требуемыми спектральными характеристиками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Stuart M.B., McGonigle A.J.S., Willmott J.R. Hyperspectral imaging in environmental monitoring: A review of recent developments and technological advances in compact field deployable systems // *Sensors*. 2019. V. 19. № 14. P. 3071. <https://doi.org/10.3390/s19143071>
2. Khan A., Vibhute A.D., Mali Sh., et al. A systematic review on hyperspectral imaging technology with a machine and deep learning methodology for agricultural applications // *Ecological Informatics*. 2022. V. 69. P. 101678. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101678>
3. Patil T., Pagano Cl., Marani R., et al. Hyperspectral imaging for non-destructive testing of composite materials and defect classification // *Internat. Conf. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. June 19–23, 2022. P. 404–412.
4. Rehman A. Ul, Qureshi S.A. A review of the medical hyperspectral imaging systems and unmixing algorithms' in biological tissues // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. 2021. V. 33. P. 102165. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.102165>
5. Li Q., He X., Wang Y., et al. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: Achievements and challenges // *J. Biomed. Opt.* 2013. V. 18. № 10. P. 100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.10.100901>
6. Chang C.I. *Hyperspectral data exploitation: Theory and applications*. N.J.: John Wiley & Sons, 2006. 440 p.
7. Hagen N.A., Kudenov M.W. Review of snapshot spectral imaging technologies // *Opt. Eng.* 2013. V. 52. № 9. P. 090901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.9.090901>
8. Bai L., Xu C., Wang C. A review of fusion methods of multi-spectral image // *Optik*. 2015. V. 126. № 24. P. 4804–4807. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.201>
9. Ortega S., Halicek M., Fabelo H., et al. Hyperspectral and multispectral imaging in digital and computational pathology: A systematic review [Invited] // *Biomed. Opt. Exp.* 2020. V. 11. № 6. P. 3195–3233. <https://doi.org/10.1364/BOE.386338>
10. Akopdjani Y.A., Machikhin A.S., Bilanchuk V.V., et al. Flight study of on-board enhanced vision system for all-weather aircraft landing // *Proc. SPIE*. 2014. V. 9292. P. 92920X. <https://doi.org/10.1117/12.2075607>
11. Электронный ресурс URL: <https://www.parrot.com/en/shop/accessories-spare-parts/other-drones/sequoia> (Drones/Accessories & spare parts/Other drones/Parrot Sequoia).
12. Электронный ресурс URL: <https://www.geoscan.aero/ru/products/components/pollux> (Продукты/Компоненты/Geoscan Pollux).
13. Электронный ресурс URL: <https://www.imechyper-spectral.com/en/real-time-hyperspectral-snapshot-cameras> (Cameras/Real-time hyperspectral snapshot cameras).
14. Katsunuma A., Kodama K. Imaging device including a front optical system having a movable focusing lens group // *Patent US 9625789*. 2017.

Разработанная оптическая система может стать основой мультиспектральных ОЭС сельскохозяйственного, биомедицинского и других назначений при решении задач, связанных с необходимостью быстрого сбора пространственно-спектральных данных об объектах с известными свойствами.

REFERENCES

1. Stuart M.B., McGonigle A.J.S., Willmott J.R. Hyperspectral imaging in environmental monitoring: A review of recent developments and technological advances in compact field deployable systems // *Sensors*. 2019. V. 19. № 14. P. 3071. <https://doi.org/10.3390/s19143071>
2. Khan A., Vibhute A.D., Mali Sh., et al. A systematic review on hyperspectral imaging technology with a machine and deep learning methodology for agricultural applications // *Ecological Informatics*. 2022. V. 69. P. 101678. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101678>
3. Patil T., Pagano Cl., Marani R., et al. Hyperspectral imaging for non-destructive testing of composite materials and defect classification // *Internat. Conf. Flexible Automation and Intelligent Manufacturing*. June 19–23, 2022. P. 404–412.
4. Rehman A. Ul, Qureshi S.A. A review of the medical hyperspectral imaging systems and unmixing algorithms' in biological tissues // *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. 2021. V. 33. P. 102165. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.102165>
5. Li Q., He X., Wang Y., et al. Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: Achievements and challenges // *J. Biomed. Opt.* 2013. V. 18. № 10. P. 100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.10.100901>
6. Chang C.I. *Hyperspectral data exploitation: Theory and applications*. N.J.: John Wiley & Sons, 2006. 440 p.
7. Hagen N.A., Kudenov M.W. Review of snapshot spectral imaging technologies // *Opt. Eng.* 2013. V. 52. № 9. P. 090901. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.9.090901>
8. Bai L., Xu C., Wang C. A review of fusion methods of multi-spectral image // *Optik*. 2015. V. 126. № 24. P. 4804–4807. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.201>
9. Ortega S., Halicek M., Fabelo H., et al. Hyperspectral and multispectral imaging in digital and computational pathology: A systematic review [Invited] // *Biomed. Opt. Exp.* 2020. V. 11. № 6. P. 3195–3233. <https://doi.org/10.1364/BOE.386338>
10. Akopdjani Y.A., Machikhin A.S., Bilanchuk V.V., et al. Flight study of on-board enhanced vision system for all-weather aircraft landing // *Proc. SPIE*. 2014. V. 9292. P. 92920X. <https://doi.org/10.1117/12.2075607>
11. Electronic resource URL: <https://www.parrot.com/en/shop/accessories-spare-parts/other-drones/sequoia> (Drones/Accessories & spare parts/Other drones/Parrot Sequoia).
12. Electronic resource URL: <https://www.geoscan.aero/ru/products/components/pollux> (Products/Components/Geoscan Pollux).
13. Electronic resource URL: <https://www.imechyper-spectral.com/en/real-time-hyperspectral-snapshot-cameras> (Cameras/Real-time hyperspectral snapshot cameras).
14. Katsunuma A., Kodama K. Imaging device including a front optical system having a movable focusing lens group // *Patent US 9625789*. 2017.

15. Мачихин А.С., Батшев В.И., Неверов С.М. Способ бесконтактного измерения пространственного распределения температуры и излучательной способности объектов без сканирования // Патент РФ № 2721097. Бюл. 2020. № 14.
16. Мачихин А.С., Батшев В.И., Крюков А.В. Способ одновременной регистрации мультиспектральных изображений // Патент РФ № 2800054. 2023.
17. Ровенская Т.С., Крюков А.В. Методика расчета оптических схем широкоугольных реверсивных телеобъективов несимметричной конструкции // Вестник МГТУ. 2000. Т. 3. № 40. С. 109.
18. Анитропова-Лившиц И.Л., Бронштейн И.Г. Широкоугольный объектив с вынесенным входным зрачком // Патент № 2133488. 1999.
19. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Бахолдин А.В. и др. Синтез объективов с вынесенным зрачком и телецентрическим ходом лучей // Оптический журнал. 2018. Т. 85. № 12. С. 30–34. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-12-30-34>
20. Zolotukhina A., Machikhin A., Guryleva A., et al. Extraction of chlorophyll concentration maps from AOTF hyperspectral imagery // Front Environ Sci. 2023. V. 11. P. 480. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1152450>
21. Knipling E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near infrared radiation from vegetation // Remote Sensing of Environment. 1970. V. 1. № 3. P. 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)
15. Machikhin A.S., Batshev V.I., Neverov S.M. Method for non-contact measurement of object temperature and emissivity spatial distribution without scanning // RU Patent № 2721097. Bull. 2020. № 14.
16. Machikhin A.S., Batshev V.I., Krioukov A.V. Simultaneous multispectral images registration method // RU Patent № 2800054. 2023.
17. Rovenskaya T.S., Krioukov A.V. Calculating the optical schemes of wide-angle reverse telephoto non-symmetrical design lenses [in Russian] // Herald of the BMSTU. 2000. V. 3. № 40. P. 109.
18. Anitropova-Livshits I.L., Bronstein I.G. Wide-angle lens with remote entrance pupil // Patent RU № 2133488. 1999.
19. Andreev L.N., Ezhova V.V., Bakholdin A.V., et al. Synthesis of telecentric-ray-path pinhole objectives // J. Opt. Technol. 2018. V. 85. № 12. P. 765–767. <https://doi.org/10.1364/JOT.85.000765>
20. Zolotukhina A., Machikhin A., Guryleva A., et al. Extraction of chlorophyll concentration maps from AOTF hyperspectral imagery // Front Environ Sci. 2023. V. 11. P. 480. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1152450>
21. Knipling E.B. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation // Remote Sensing of Environment. 1970. V. 1. № 3. P. 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)

АВТОРЫ

Владислав Игоревич Батшев — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Александр Владимирович Крюков — кандидат технических наук, научный сотрудник, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия; Scopus ID: 57213686784; <https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>; alex_krioukov@mail.ru

Александр Сергеевич Мачихин — доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

Анастасия Александровна Золотухина — инженер-исследователь, НТИЦ УП РАН, Москва, 117342, Россия; Scopus ID: 57724434900; <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>; zolotukhina.aa@ntcup.ru

AUTHORS

Vladislav I. Batshev — PhD (Engineering), Senior Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 26325278700; <https://orcid.org/0000-0002-7066-0106>; batshev.vi@ntcup.ru

Alexander V. Krioukov — PhD (Engineering), Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia; Scopus ID: 57213686784; <https://orcid.org/0009-0007-1807-2386>; alex_krioukov@mail.ru

Alexander S. Machikhin — Dr. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 23012533400; <https://orcid.org/0000-0002-2864-3214>; machikhin@ntcup.ru

Anastasia A. Zolotukhina — Engineer Researcher, Scientific and Technological Center of Unique Instrumentation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 117342, Russia; Scopus ID: 57724434900; <https://orcid.org/0000-0003-1043-7014>; zolotukhina.aa@ntcup.ru

Статья поступила в редакцию 05.06.2023
Одобрена после рецензирования 21.08.2023
Принята к печати 26.09.2023

The article was submitted to the editorial office 05.06.2023
Approved after review 21.08.2023
Accepted for publication 26.09.2023