
ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 520.2, 520.6.07
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-9-752-758

ХАРАКТЕРИСТИКИ БЛОКА КАМЕР ПОЛЯ ДЛЯ ПРОЕКТА „СПЕКТР-УФ“

Н. Ф. ЕРХОВА¹, Е. Н. СЕЧАК², В. Е. ШМАГИН³

¹ Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, 119991, Москва, Россия
E-mail: erhovanf@lebedev.ru

² Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

³ Институт астрономии РАН, 119017, Москва, Россия

Приведены результаты разработки оптической схемы блока камер поля для проекта „Спектр-УФ“. Блок камер поля, предназначенный для работы в ультрафиолетовом диапазоне длин волн, обладает достаточно высоким качеством изображения и служит для использования в оптико-электронных приборах космического базирования. Представлены основные технико-эксплуатационные характеристики блока камер поля и дана оценка влияния дефектов изготовления и сборки оптических элементов блока на качество изображения.

Ключевые слова: ультрафиолетовый диапазон, пятно рассеяния, среднеквадратическое отклонение по волновому фронту, качество изображения, оптическая схема

Введение. Решение астрофизических и космологических задач требует создания новой научно-технической аппаратуры, работающей в различных диапазонах длин волн. Для проведения наблюдений в дальнем и ближнем ультрафиолетовом (УФ) диапазонах электромагнитного спектра (115—310 нм) создается космическая обсерватория „Спектр-УФ“ [1, 2].

„Спектр-УФ“ откроет новые возможности для исследований планет, звездной, внегалактической астрофизики и космологии. С помощью этой космической обсерватории планируется изучать физико-химические свойства планетных атмосфер и комет, физику атмосфер горячих звезд и хромосферной активности холодных звезд, свойства пылевых частиц межзвездного и околозвездного вещества, природу активных галактических ядер, межгалактических газовых облаков и гравитационных линз. Космическая обсерватория „Спектр-УФ“ позволит, возможно, определять важные для выбора космологической модели соотношения содержания легких элементов и их изотопов [3, 4].

Основные научные инструменты космической обсерватории — телескоп Т-170М, блок спектрографов (БС) и блок камер поля (БКП).

Телескоп Т-170М разработан на основе оптической схемы Ричи — Кретьена с диаметром главного зеркала 1,7 м, относительным отверстием 1:10 и полем зрения 30'. Блок спектрографов состоит из двух эшшеле-спектрографов высокого разрешения (более 50 000), предназначенных для изучения спектра звезд до 17-й звездной величины, и спектрографа низкого разрешения (более 1000), снабженного длинной щелью и предназначенного для получения спектров низкого разрешения точечных и протяженных объектов [5].

Телескоп Т-170М совместно с БКП в условиях сильного УФ-излучения должен проводить исследования в таких актуальных научных областях, как изучение механизмов образования галактик, строения и эволюции галактики, физики аккреции и истечения, атмосферы экзопланет и астрохимии [2].

Цель настоящего исследования — анализ возможных вариантов исполнения оптической схемы БКП, анализ качества изображения, формируемого системой „телескоп — БКП“, а также оценка допустимых погрешностей изготовления и сборки БКП.

Основные характеристики блока камер поля. БКП предназначен для получения изображений космических объектов в УФ-диапазоне с высоким разрешением при использовании светофильтров. БКП включает два канала: для работы в ближнем ультрафиолетовом (БУФ) диапазоне и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазоне. Канал БУФ оснащен ПЗС-детектором, чувствительным к диапазону 174—1000 нм, канал ВУФ — МКП-детектором, чувствительным в диапазоне 115—176 нм [6].

Канал БУФ является „обзорным“, обладает значительным полем зрения по сравнению с инструментом Advanced Camera for Surveys космического телескопа „Хаббл“ [7] и другими подобными системами [8—11], и для обеспечения требований к его разрешающей способности достаточно применения светофильтров и одного плоского зеркала, направляющего изображения на детектор. Отличительные особенности канала БУФ — сравнительно большое поле зрения (около 6'), большой динамический диапазон и, как следствие, высокая чувствительность. Канал БУФ расположен в центре поля зрения телескопа Т170-М и состоит из плоского зеркала, размещенного перед фокусом телескопа, колес спектральных фильтров, выполненных в виде плоскопараллельных пластин, и ПЗС-приемника. Приемник излучения помещен в герметичный корпус с плоским входным окном, изготовленным из фторида магния (MgF_2) [12, 13].

Канал ВУФ для достижения необходимых параметров требует усложненной схемы, так как канал расположен ближе к краю поля зрения телескопа, где на качество изображения оказывают влияние полевые аберрации.

Основные характеристики каналов БУФ и ВУФ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Канал	Диапазон регистрации, нм	Разрешающая способность, ..."/элемент	Размер элемента ФПУ, мкм	Поле зрения, ...'
БУФ	174—305	0,15	12	6
ВУФ	115—176	0,05	10	1,5

Рассмотрим подробно канал ВУФ, для которого был произведен оптический расчет схемы, удовлетворяющий заданным массогабаритным характеристикам, а именно: канал ВУФ БКП должен вписываться в круг радиусом 700 мм, а его общая высота не должна превышать 173 мм. Цель работы заключается в том, чтобы в этом канале получить дифракционный предел качества изображения, что позволит решить поставленные научные задачи.

Выбор оптической схемы канала ВУФ БКП. Для обеспечения требований по пространственному разрешению, чтобы размер пятна рассеяния не превышал размера элемента фотоприемного устройства (ФПУ), в канале ВУФ необходима оптическая система, удлиняющая фокусное расстояние телескопа и корректирующая его аберрации. Были рассмотрены различные варианты реализации оптической схемы. Обратные телескопические и прочие симметричные схемы не позволяют добиться требуемого качества изображения. В связи с этим была выбрана схема с асферическим внеосевым зеркалом, компенсирующим несимметричное распределение аберраций в данной области поля зрения. Асферическое внеосевое зеркало представляет собой асферическую полиномиальную поверхность, форма которой задается следующим уравнением:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + a_1r^2,$$

где c — кривизна поверхности, r — радиальная координата, k — коническая константа (в рассматриваемом случае $k=0$), a_1 — полином, описывающий отклонение от сферической поверхности.

Предпочтительным вариантом оказалась схема, состоящая из одного плоского зеркала, одного сферического, одного асферического и набора светофильтров. В выбранном спектральном диапазоне значительное влияние на качество изображения оказывает поперечная хроматическая аберрация на входном окне ФПУ, в связи с чем в качестве формы спектральных фильтров выбрана выпукло-вогнутая линза (мениск).

Принципиальная схема хода лучей в системе телескопа Т-170М с каналом ВУФ приведена на рис. 1; оптическая схема канала ВУФ — на рис. 2 [8], где 1 — плоское зеркало, 2 — сферическое зеркало, 3 — асферическое зеркало, 4 — спектральный фильтр, 5 — фотоприемное устройство.

Были рассмотрены два варианта компоновки схемы (рис. 3). Вариант 1 обеспечивает лучшее качество изображения, но возникают трудности с размещением ФПУ и оправы сферического зеркала; вариант 2 более компактный и обеспечивает больший угол при асферическом зеркале, что способствует удобному размещению элементов.

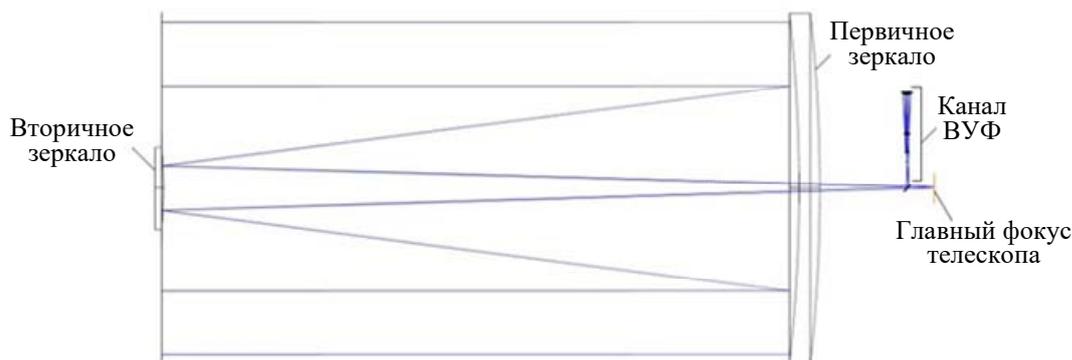


Рис. 1

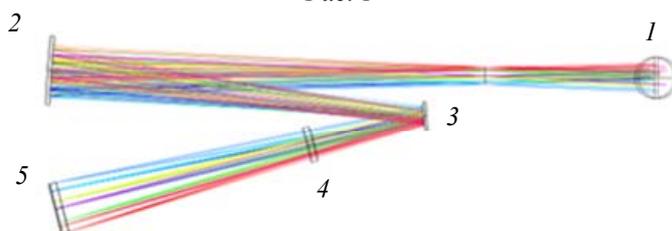


Рис. 2

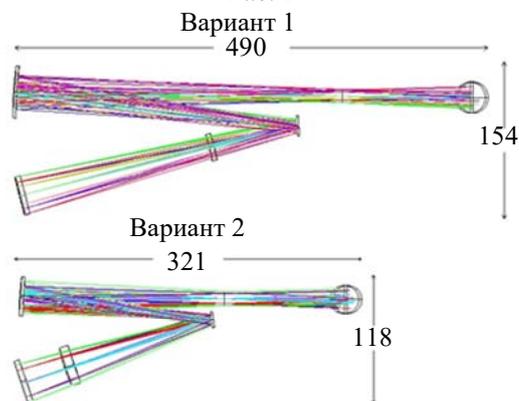


Рис. 3

При пространственной частоте $K=100$ лин/мм, соответствующей размеру чувствительного элемента ФПУ, контраст изображения (C) должен составлять не менее 0,2 (рис. 4). Путем сравнения характеристик обоих вариантов для дальнейшей проработки был выбран вариант 1.

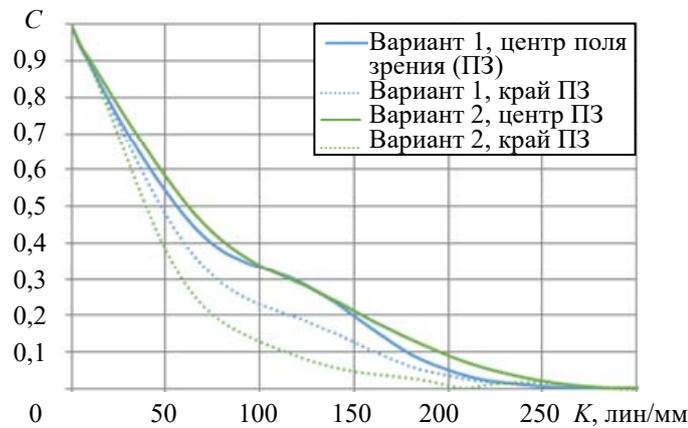


Рис. 4

Оценка качества изображения. Путем оптимизации было достигнуто дифракционное качество изображения, поэтому размер пятна рассеяния незначительно превысил размер диска Эйри. В канале ВУФ пятна рассеяния имеют изопланатическую форму по всему полю, что облегчает обработку изображений. Среднеквадратический радиус пятен рассеяния не превышает 3,5 мкм. Большая часть площади пятен рассеяния укладывается в размер ячейки детектора.

Концентрация энергии в изображении точечного объекта в круге диаметром 10 мкм (размер чувствительного элемента ФПУ) составляет 55 %. Если бы система была строго дифракционного качества, то концентрация энергии составила бы 59 %. Таким образом, качество изображения в данном канале является близким к дифракционному пределу. Диаграмма пятен рассеяния в канале ВУФ БКП (скриншот) представлена на рис. 5.

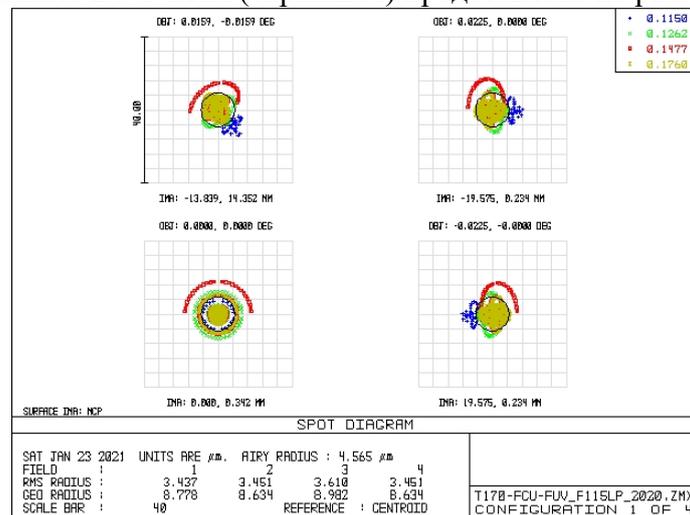


Рис. 5

Для оптических систем с качеством изображения, близким к дифракционному пределу, адекватным критерием качества является среднеквадратическая ошибка волнового фронта ($СКО_{в.ф}$) — $W_{скв}$. $СКО_{в.ф}$ на рабочей длине волны 126,2 нм составляет 1/16, что удовлетворяет критерию Маршала: $W_{скв} \leq \lambda/14$. Волновая aberrация соответствует критерию Рэлея: $\Delta W_{max} \leq \lambda/4$ [14, 15].

Расчет допусков. Для определения совокупности значений допусков необходим критерий оценки качества изображения, позволяющий суммировать влияние различных видов

допусков. Таким критерием является СКО ошибки волнового фронта. Для определения допустимой величины $W_{\text{СКВ}}$ была составлена модель, содержащая телескоп Т-170М, с учетом экранирования модулем вторичного зеркала с растяжками, включающая в себя погрешности изготовления поверхностей зеркал телескопа. В результате моделирования 1 000 000 систем со случайной ошибкой формы волнового фронта было получено значение $W_{\text{СКВ}}$, обеспечивающее выполнение требований по пространственному разрешению. Это значение используется в качестве общей ошибки σ при расчете совокупности значений допусков и составляет $\lambda/5$ на рабочей длине волны (0,115 мкм) [16, 17]. Общая ошибка σ состоит из следующих компонентов: расчетная ошибка канала (σ_p), ошибка изготовления оптических элементов ($\sigma_{\text{и}}$), ошибка сборки ($\sigma_{\text{сб}}$). Таким образом, общая ошибка

$$\sigma = \sqrt{\sigma_p^2 + \sigma_{\text{и}}^2 + \sigma_{\text{сб}}^2}.$$

В результате моделирования влияния ошибок изготовления и сборки были получены значения допусков на изготовление и позиционирование оптических элементов канала ВУФ БКП: допуски на изготовление представлены в табл. 2, допуски на позиционирование — в табл. 3.

Таблица 2

Вид погрешности	Значение погрешности, не более чем
Общее отклонение формы поверхности	0,05 λ
Местное отклонение формы поверхности	0,095 λ
Отклонение радиуса кривизны	0,1 мкм
Отклонение толщины детали	0,1 мкм

Таблица 3

Вид погрешности	Значение погрешности, не более чем
Осевое смещение	0,2 мм
Децентрировка	1 мм
Наклон	0,2°

Заключение. Исследованы характерные особенности каналов ВУФ и ВУФ БКП. Рассмотрены варианты построения оптической схемы канала ВУФ. Произведена оценка качества изображения и рассчитаны допуски на изготовление и позиционирование оптических элементов в канале ВУФ, позволяющие обеспечить соответствие критериям качества изображения и надежную работу оптико-электронного телескопического комплекса. Предложено реалистичное и технически реализуемое исполнение схемы БКП. Рассчитанное схемотехническое решение может быть использовано при создании блока камер поля космической обсерватории „Спектр-УФ“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сичевский С. Г., Шустов Б. М. Блок камер поля проекта „Спектр-УФ“ // Научные труды Института астрономии РАН. 2018. Т. 1. С. 377—382.
2. Канев Е. Н., Шустов Б. М. Научные задачи блока камер поля проекта „Спектр-УФ“ // Научные труды Института астрономии РАН. 2018. Т. 1. С. 383—388.
3. Shustov B., Gomez de Castro A. I. The World Space Observatory Ultraviolet (WSO-UV), as a bridge to future UV astronomy // *Ap&SS*. 2018. N 363. 62S.
4. Сачков М. Е., Сичевский С. Г. Блок камер поля проекта „Спектр-УФ“: обновленный дизайн и научные задачи // Вестн. „НПО имени С. А. Лавочкина“. 2018. № 3. С. 31—36.
5. Саванов И. С., Шустов Б. М. Спектрографы проекта „Спектр-УФ“ / Научные труды Института астрономии РАН. 2018. Т. 1. С. 364—369.

6. *Gómez de Castro A. I., Díez L.* The detector for the far ultraviolet channel of the imaging instrument (FCU) on board the Spectrum-UV (WSO-UV) space telescope // Proc. of SPIE. 2020.
7. *Sirianni M., Clampin M., Hartig G. F., Ford H. C., Illingworth G. D., Sullivan P. C., Koldewyn W., Burmester B., Schrein R. J., Albright V., Lesser M. P., Blouke M. M.* Flight CCD detectors for the Advanced Camera for Surveys // Proc. SPIE 4669, Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications III, 24 Apr. 2002. DOI: 10.1117/12.463425.
8. *Шустов Б. М., Сачков М. Е.* Проект „Спектр-УФ“: новые штрихи // Вестн. „НПО имени С. А. Лавочкина“. 2020. № 2. С. 22—33.
9. *Sachkov M., Sichevsky S., Shustov B.* et al. Field camera unit of the WSO-UV mission // Proc. of SPIE. 2020.
10. *Sachkov M., Gómez de Castro A. I., Shustov B.* The World Space Observatory: ultraviolet mission: science program and status report // Proc. of SPIE. 2020.
11. *Shustov B., Gomez de Castro A. I., Shustov M.* et al. WSO-UV progress and expectations // Ap&SS. 2014. N 354. P. 155—161.
12. *Сичевский С. Г., Шугаров А. С.* Блок камер поля космической обсерватории „Спектр-УФ“ // Научные труды Института астрономии РАН. 2020. № 3. С. 129—133.
13. *Кузин С. В., Перцов А. А., Кириченко А. С.* и др. Космическая аппаратура для астрофизических исследований в проекте „Спектр-УФ“ // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2018. № 7. С. 49—53.
14. *Родионов С. А.* Основы оптики. Конспект лекций. СПб: СПб ГИТМО(ТУ), 2000. 172 с.
15. *Грамматин А. П., Романова Г. Э., Балащенко О. Н.* Расчет и автоматизация проектирования оптических систем: Учеб. пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 128 с.
16. *Михельсон Н. Н.* Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука, 1976. 512 с.
17. *Запругаева Л. А., Свешникова И. С.* Расчет и проектирование оптических систем: Учебник для вузов. М.: Изд-во МИИГАиК, 2009. Ч. I. 350 с.

Сведения об авторах

- Наталья Феликсовна Ерхова** — Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, астрокосмический центр, лаборатория астрофизики высокого разрешения; мл. научный сотрудник; E-mail: erhovanf@lebedev.ru
- Евгений Николаевич Сечак** — аспирант; Университет ИТМО, факультет прикладной оптики; E-mail: evgenysechak@gmail.com
- Владимир Евгеньевич Шмагин** — Институт астрономии РАН, отдел экспериментальной астрономии; мл. научный сотрудник; E-mail: shmagin@inasan.ru

Поступила в редакцию
18.05.2021 г.

Ссылка для цитирования: Ерхова Н. Ф., Сечак Е. Н., Шмагин В. Е. Характеристики блока камер поля для проекта „Спектр-УФ“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 9. С. 752—758.

CHARACTERISTICS OF THE FIELD CAMERA UNIT FOR THE SPECTRUM-UV PROJECT

N. F. Erkhova¹, E. N. Sechak², V. E. Shmagin³

¹*P.N. Lebedev Physical Institute of the RAS, 119991, Moscow, Russia
E-mail: erhovanf@lebedev.ru*

²*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*

³*Institute of Astronomy of the RAS, 119017, Moscow, Russia*

Results of development of optical scheme of the field camera unit (FCU) for the Spectrum-UV project are presented. The FCU is intended to work in the UV spectral range, it provides a sufficiently high image quality, and is used in space-based optoelectronic devices. The main technical and operational characteristics of the field camera unit are presented and the impact of manufacturing and assembly defects of optical elements in the unit on the image quality is assessed.

Keywords: UV spectral range, blur spot, RMS WFE error, image quality, optical scheme

REFERENCES

1. Sichevsky S.G., Shustov B.M., Sachkov M.E., Shugarov A.S., Savanov I.S., Kanev E.N. *INASAN Science Reports*, 2018, vol. 1, pp. 377–382. (in Russ.)
2. Kanev E., Shustov B., Sachkov M., Sichevsky S., Savanov I., Shugarov A. *INASAN Science Reports*, 2018, vol. 1, pp. 383–388. (in Russ.)
3. Shustov B., Gomez de Castro A.I. *Ap&SS*, 2018, no. 4(363), DOI:10.1007/s10509-018-3280-7.
4. Sachkov M.E., Sichevskij S.G., Shustov B.M., Kanev E.N., Shugarov A.S. *Vestnik "NPO im. S.A. Lavochkina"*, 2018, no. 3, pp. 31–36. (in Russ.)
5. Savanov I.S., Shustov B.M., Sachkov M.E., Shugarov A.S., Sichevsky S.G., Kanev E.N. *INASAN Science Reports*, 2018, vol. 1, pp. 364–369. (in Russ.)
6. Gómez de Castro A.I., Diez L., Gestoso J.Y., Cazalla I.P. *Proc. of the Conference "Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray"*, December 2020, DOI:10.1117/12.2560330.
7. Sirianni M., Clampin M., Hartig G.F. et al. *Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications III*, 24 April 2002, Proc. SPIE, vol. 4669, <https://doi.org/10.1117/12.463425>.
8. Shustov B.M., Sachkov M.E. *Vestnik "NPO imeni S.A. Lavochkina"*, 2020, no. 2, pp. 22–33. (in Russ.)
9. Sachkov M., Sichevsky S.G., Shustov B.M., Shugarov A.S. *Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray*, December 2020, DOI:10.1117/12.2562962.
10. Sachkov M., Gómez de Castro A.I. *Proc. of the Conference "Space Telescopes and Instrumentation 2020: Ultraviolet to Gamma Ray"*, December 2020, DOI:10.1117/12.2562929.
11. Shustov B., Gomez de Castro A.I. *Ap&SS*, 2014, pp. 155–161.
12. Sichevsky S.G., Shugarov A.S. *INASAN Science Reports*, 2020, no. 3, pp. 129–133. (in Russ.)
13. Kuzin S.V., Pertsov A.A., Kirichenko A.S., Sachkov M.E., Savanov I.S., Shugarov A.S. *Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2018, no. 4(12), pp. 678–681.
14. Rodionov S.A. *Osnovy optiki. Konspekt lektsiy* (Fundamentals of Optics. Lecture Notes), St. Petersburg, 2000, 172 p. (in Russ.)
15. Grammatin A.P., Romanova G.E., Balatsenko O.N. *Raschet i avtomatizatsiya proyektirovaniya opticheskikh sistem* (Calculation and Automation of Design of Optical Systems), St. Petersburg, 2013, 128 p. (in Russ.)
16. Mikhel'son N.N. *Opticheskiye teleskopy. Teoriya i konstruktsiya* (Optical Telescopes. Theory and Construction), Moscow, 1976, 512 p. (in Russ.)
17. Zapryagayeva L.A., Sveshnikova I.S. *Raschet i proyektirovaniye opticheskikh sistem* (Calculation and Design of Optical Systems), Textbook for universities in 2 parts. Part I, Moscow, 2009, 350 p. (in Russ.)

Data on authors

- Nataliya F. Erkhova** — P. N. Lebedev Physical Institute of the RAS, Astro Space Center, Laboratory of High-Resolution Astrophysics; Junior Researcher; E-mail: erhovanf@lebedev.ru
- Evgeny N. Sechak** — Post-Graduate Student; ITMO University, Faculty of Applied Optics; E-mail: evgenysechak@gmail.com
- Vladimir E. Shmagin** — Institute of Astronomy of RAS, Department of Experimental Astronomy; Junior Researcher; E-mail: shmagin@inasan.ru

For citation: Erkhova N. F., Sechak E. N., Shmagin V. E. Characteristics of the field camera unit for the Spectrum-UV project. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 9. P. 752–758 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-9-752-758