

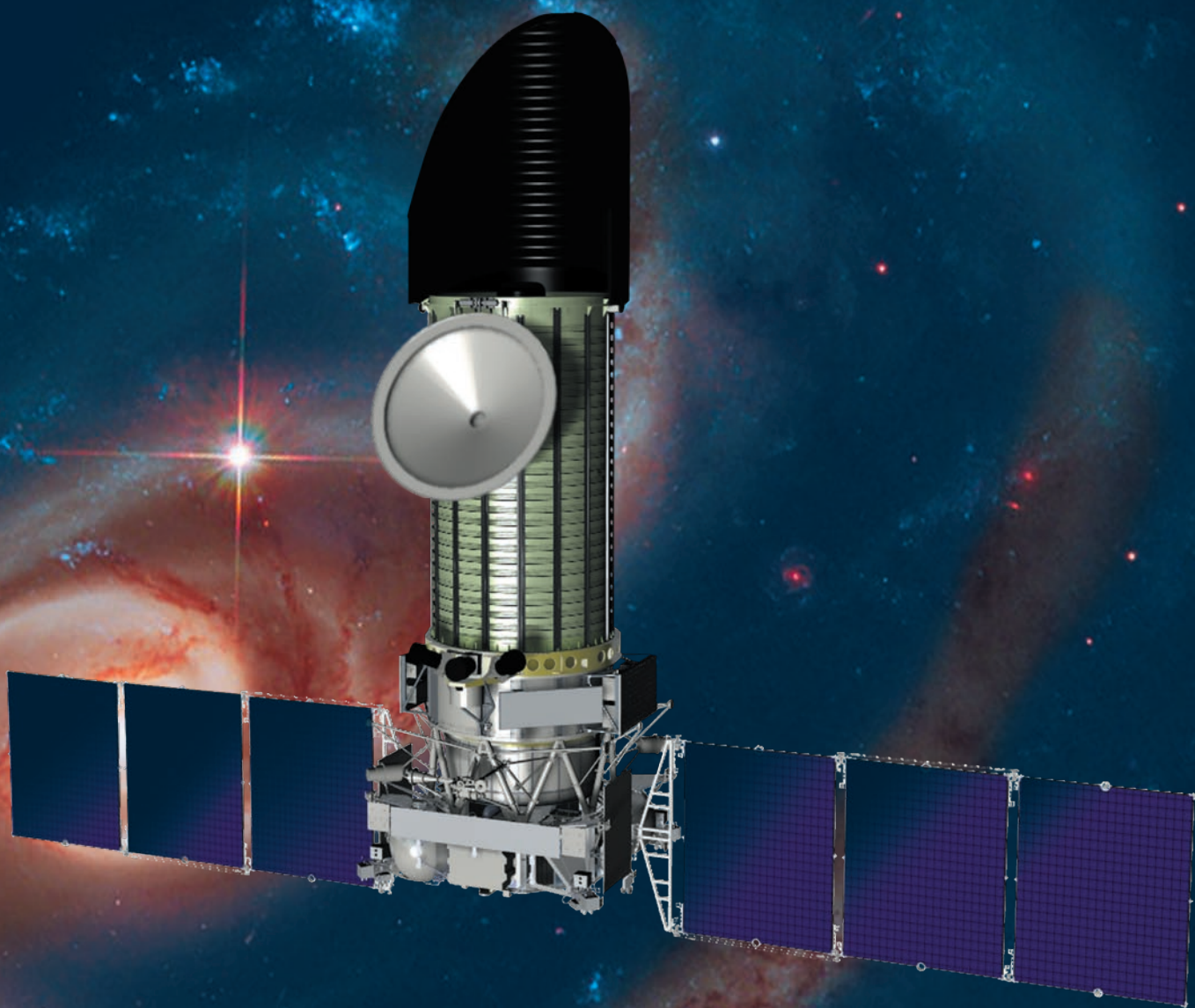


ВЕСТНИК
НПО ИМЕНИ С.А. ЛАВОЧКИНА

ISSN 2075-6941

(26) **5**
2014

С НОВЫМ
2015
ГОДОМ!



**ВСЕМИРНАЯ
КОСМИЧЕСКАЯ
ОБСЕРВАТОРИЯ
УЛЬТРАФИОЛЕТ -
СПЕКТР УФ
СОЗДАЕТСЯ
В РОССИИ**

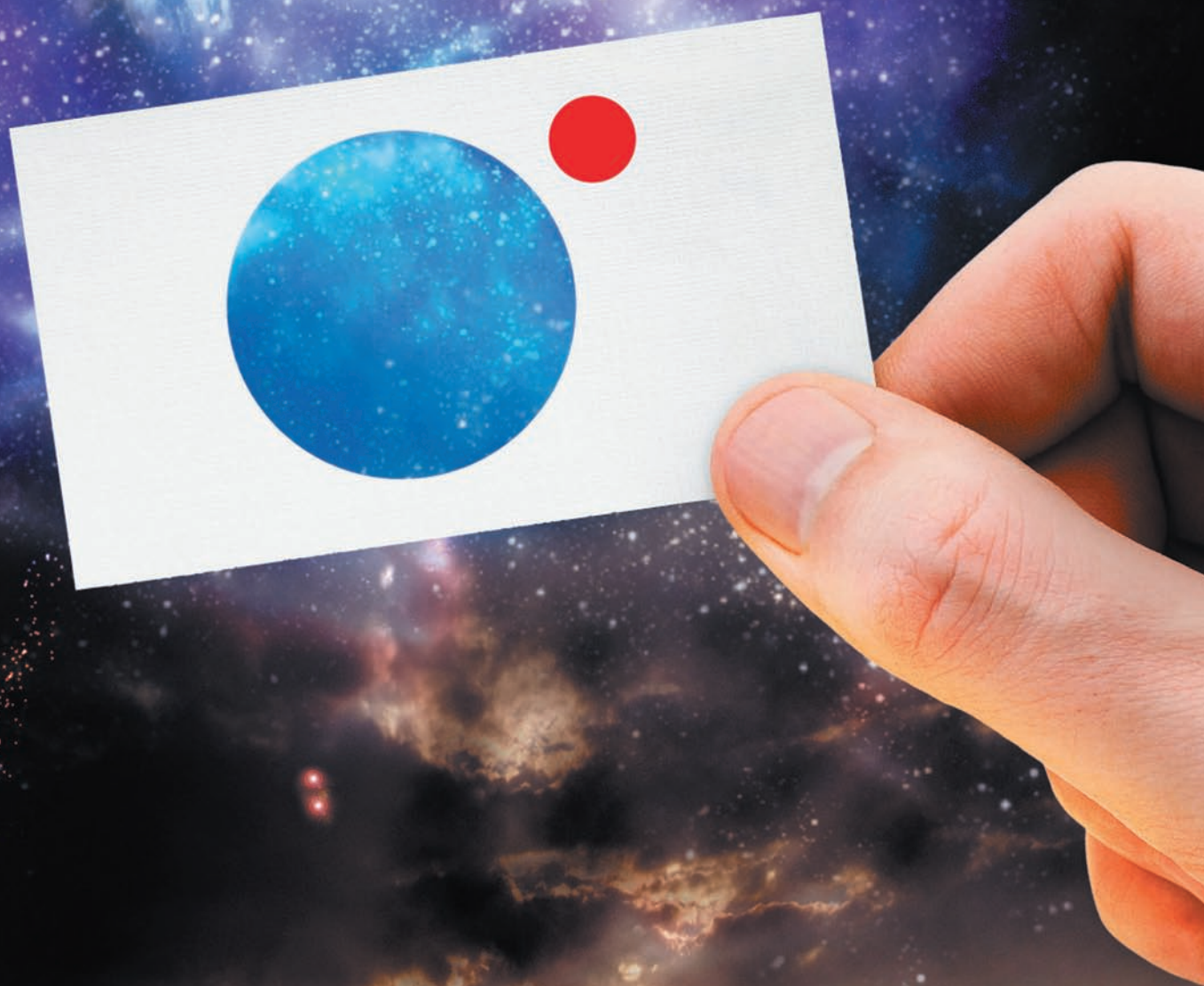
Научные задачи
многоцелевой обсерватории:

- исследование эволюции Вселенной;
- физика аккреции;
- изучение ранней эволюции звезд типа Солнца и протопланетных дисков;
- изучение физико-химического состава атмосфер планет Солнечной системы и экзопланет.

СПУТНИК

СТРАХОВОЙ ЦЕНТР

Реклама. Номер лицензии: С 3541 77



СТРАХОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

 +7 495 787 25 25

с о д е р ж а н и е

Редакционная статья	3
Шустов Б.М., Сачков М.Е., Боярчук А.А., Моисеев А.А., Гомес де Кастро А.И. Космические перспективы изучения ультрафиолетовой Вселенной: проект «СПЕКТР-УФ»	4
Моисеев А.А., Бабышкин В.Е., Мартынов Б.Н., Скрипунов Е.В., Иванов А.В. Проектная концепция космического аппарата «СПЕКТР-УФ»	16
Шейхет А.И., Корноухов В.С., Моисеев А.А., Погодин А.В. Выбор начальных параметров рабочей орбиты космического аппарата «СПЕКТР-УФ»	20
Губанов И.П., Артюхов М.И., Молодцов В.А. Организация функционирования бортовых систем КА «СПЕКТР-УФ»	24
Сачков М.Е., Шустов Б.М., Моисеев А.А., Власенко О.В. и др. Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ»	34
Казакевич Ю.В., Шустов Б.М., Сачков М.Е., Малков О.Ю. и др. Наземный сегмент космической обсерватории «СПЕКТР-УФ»	40
Моисеев А.А., Ильясов М.Ф., Зверев А.В., Рыков Е.В., Алексеев С.В. Особенности конструкции телескопа Т-170М	53
Яскович А.Л., Власенко О.В., Макаров В.П. Оптическая схема телескопа Т-170М комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ»	61
Власенко О.В., Яскович А.Л., Шустов Б.М., Абдулкадыров М.А. и др. Конструктивная реализация оптической системы телескопа Т-170М	67
Саванов И.С., Шустов Б.М., Сачков М.Е., Шугаров А.С. и др. Блок спектрографов проекта «СПЕКТР-УФ»	74
Гомес де Кастро А.И., Переа Абарка Б., Шугаров А.С., Саванов И.С., Сачков М.Е. Блок камер поля	81
Шугаров А.С., Саванов И.С., Кузин С.В. Приемники излучения в проекте «СПЕКТР-УФ»	86
Жупанов В.Г., Федосеев В.Н., Голышко Е.А., Моисеев А.А. и др. Функциональное покрытие оптических элементов комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ»	92
Тулин Д.В., Ефремова Т.Н., Плугарь С.М., Шабарчин А.Ф. Система обеспечения теплового режима телескопа Т-170М и научной аппаратуры ..	97
Чулков И.В., Ануфрейчик К.В., Коновалов А.А., Тимонин Д.Г., Семенов А.В., Никифоров А.В. Служебный комплекс телескопа Т-170М	104
Беляев Б.Б., Ульяшин А.И., Ковалев Ф.А. Система точного гидирования	108
Аванесов Г.А., Белинская Е.В., Воронков С.В., Строилов Н.А., Катасонов И.Ю., Никитин А.В., Шугаров А.С. Система датчиков гида телескопа Т-170М. Результаты наземной отработки	114

журнал является рецензируемым изданием

- журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещаемую на платформе НАУЧНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ БИБЛИОТЕКИ на сайте <http://www.elibrary.ru>
- журнал включен в перечень российских рецензируемых научных журналов ВАК
- мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей
- редакция не несет ответственность за содержание рекламы
- рукописи не возвращаются
- при перепечатке материалов ссылка на «ВЕСТНИК «НПО ИМ. С.А. ЛАВОЧКИНА» обязательна.
- плата с аспирантов за публикацию статей не взимается
- статьи журнала и требования к оформлению представленных авторами рукописей приведены на сайте журнала <http://www.vestnik.laspase.ru>
- подписной индекс 37156 в каталоге «Газеты и журналы» (Роспечать)
© ФГУП «НПО ИМ. С.А. ЛАВОЧКИНА»
© авторы статей

ежеквартальный научно-технический журнал издается с 2009 года

адрес редакции: 141400 Московская обл., г. Химки, ул. Ленинградская, д. 24
телефоны: (495) 575 55 63, (495) 575 54 69
факс: (495) 572 00 68
адрес электронной почты: VESTNIK@LSPACE.RU
адрес в Интернете: <http://WWW.VESTNIK.LSPACE.RU>

главный редактор –
д.т.н., профессор **К.М. Пичхадзе**
заместитель главного редактора –
д.т.н., профессор **В.В. Ефанов**

редакционная коллегия

к.т.н. **П.А. Грешилов**
В.М. Давыдов
д.т.н. **К.А. Занин**
к.э.н. **Х.Ж. Карчаев**
к.т.н. **М.Б. Мартынов**
к.т.н. **А.А. Моисеев**
д.т.н. **А.Е. Назаров**
к.э.н. **В.М. Романов**
А.В. Савченко
С.Н. Солодовников

редакционный совет

председатель д.т.н.,
профессор **В.В. Хартов**
чл.-корр. РАН **О.М. Алифанов**
д.ф.-м.н., профессор **В.В. Асмус**
академик РАН **А.А. Боярчук**
д.т.н., профессор **Б.И. Глазов**
академик РАН **Л.М. Зеленый**
чл.-корр. АНРТ **Х.И. Ибадинов**
д.т.н., профессор **А.А. Любомудров**
академик РАН **М.Я. Маров**
д.т.н., профессор **Ю.А. Матвеев**
д.т.н., профессор **В.Ю. Мелешко**
д.ф.-м.н., чл.-корр.
НАН Беларуси **О.Г. Пенязьков**
академик РАН **Г.А. Попов**
д.т.н., профессор **В.Е. Усачов**
д.т.н. **В.С. Финченко**
д.т.н., профессор **Е.Н. Хохлачев**
чл.-корр. РАН **Б.М. Шустов**
академик
НАН Украины **Я.С. Яцкив**

журнал является рецензируемым изданием

у ч р е д и т е л ь

ФГУП «НПО им. С.А. ЛАВОЧКИНА»
журнал зарегистрирован
в Федеральной службе по надзору
в сфере связи и массовых
коммуникаций.
свидетельство ПИ № ФС77-55759
от 28 октября 2013 г.

ISSN 2075-6941



14005



9 772075 694002

chief editor – d.eng.,
professor

K.M. Pichkhadze

deputy chief editor –
d.eng., professor

V.V. Efanov

editorial board
c.sc. (eng.)

P.A. Greshilov

V.M. Davydov

d.eng.

K.A. Zanin

c.sc. (ec.)

K.Z. Karchayev

c.sc. (eng.)

M.B. Martynov

c.sc. (eng.)

A.A. Moisheev

d.eng.

A.E. Nazarov

c.sc. (ec.)

V.M. Romanov

A.V. Savchenko

S.N. Solodovnikov

editorial council

chairman – d.eng.,

V.V. Khartov

professor

corresponding

member RAN

O.M. Alifanov

doctor of physical and mathematical

sciences, professor

V.V. Asmus

academician RAN

A.A. Boyarchuk

d.eng., professor

B.I. Glazov

academician RAN

L.M. Zelenyi

corresponding

member ANRT

H.I. Ibadinov

d.eng., professor

A.A. Lyubomudrov

academician RAN

M.Y. Marov

d.eng., professor

Y.A. Matveev

d.eng., professor

V.Y. Meleshko

doctor of physical and mathematical

sciences, corresponding

member NASB

O.G. Peniazkov

academician RAN

G.A. Popov

d.eng., professor

V.E. Usachov

d.eng.

V.S. Finchenko

d.eng., professor

E.N. Khokhlachev

corresponding

member RAN

B.M. Shustov

academician NASU

Ya.S. Yatskiv

**the journal is a reviewed
publication**

f o u n d e r

FSUE «LAVOCHKIN ASSOCIATION»
the journal is registered in Federal Ser-
vice for telecommunications and mass
media oversight.
certificate ПИ № ФС77–55759
dated october 28, 2013

t a b l e o f c o n t e n t s

Editorial article	3
Shustov B.M., Sachkov M.E., Boyarchuk A.A., Moisheev A.A., Gomez de Castro A.I.	
Space Prospects for Study the Universe: The «SPEKTR-UF» Project	4
Moisheev A.A., Babyshkin V.E., Martynov B.N., Skripunov E.V., Ivanov A.V.	
Design concept of «SPEKTR-UF» Spacecraft	16
Sheikhet A.I., Kornoukhov V.S., Moisheev A.A., Pogodin A.V.	
Selection of initial parameters of «SPEKTR-UF» Spacecraft operational orbit.	20
Gubanov I.P., Artyukhov M.I., Molodtsov V.A.	
Management of «SPEKTR-UF» SC onboard systems' operating.	24
Sachkov M.E., Shustov B.M., Moisheev A.A., Vlasenko O.V. et al.	
Scientific Instrumentation Complex of the «SPEKTR-UF» Observatory.	34
Kazakevich Yu.V., Shustov B.M., Sachkov M.E., Malkov O.Yu. et al.	
Ground segment of «SPEKTR-UF» Space Observatory	40
Moisheev A.A., Ilyasov M.F., Zverev A.V., Rykov E.V., Alekseev S.V.	
Special features of T-170M telescope's structure.	53
Yaskovich A.L., Vlasenko O.V., Makarov V.P.	
Optical arrangement of T-170M telescope of «SPEKTR-UF»	
Scientific Instrumentation Complex	61
Vlasenko O.V., Yaskovich A.L., Shustov B.M., Abdulkadyrov M.A. et al.	
Structural implementation of T-170M telescope optical system	67
Savanov I.S., Shustov B.M., Sachkov M.E., Shugarov A.S. et al.	
Spectrographs unit of «SPEKTR-UF» mission	74
Gomez de Castro A.I., Perea Abarca B., Shugarov A.S., Savanov I.S., Sachkov M.E.	
The ISSIS	81
Shugarov A.S., Savanov I.S., Kuzin S.V.	
Radiation receivers of «SPEKTR-UF» mission	86
Zhupanov V.G., Fedoseev V.N., Golyshko E.A., Moisheev A.A. et al.	
Functional coating for «SPEKTR-UF» Scientific Instrumentation	
Complex optical elements	92
Tulin D.V., Efremova T.N., Plugar S.M., Shabarchin A.F.	
Thermal control system of T-170M telescope and scientific instruments	97
Chulkov I.V., Anufreychik K.V., Konovalov A.A., Timonin D.G., Semenov A.V., Nikiforov A.V.	
Housekeeping complex of T-170M telescope.	104
Belyaev B.B., Ulyashin A.I., Kovalev F.A.	
Fine guidance system.	108
Avanesov G.A., Belinskaya E.V., Voronkov S.V., Stroilov N.A., Katasonov I.Yu., Nikitin A.V., Shugarov A.S.	
T-170M telescope fine guidance sensors' system. Results of ground verification	114

the journal is a reviewed publication

- the journal is included into data base «Russian Index of Scientific Citation» (RISC) located at ELECTRONIC SCIENTIFIC LIBRARY, internet link <http://www.elibrary.ru>
- the journal is in the list of editions, authorized by the SUPREME CERTIFICATION COMMITTEE OF THE RUSSIAN FEDERATION to publish the works of those applying for a scientific degree
- the opinion of editorial staff not always coincide with authors' viewpoint
- editorial staff is not responsible for the content of any advertisements
- manuscripts are not returned
- no part of this publication may be reprinted without reference to Space journal of «VESTNIK «NPO IM. S.A. LAVOCHKINA»
- post-graduates have not to pay for the publication of articles
- magazine articles and features required of author manuscript design are available at Internet Site <http://www.vestnik.laspase.ru>
- subscription index 37156 in catalogue «GAZETY I JURNALY» (ROSPECHAT)
- © FSUE «LAVOCHKIN ASSOCIATION»
- © article writers

**scientific and technical quarterly journal
published since 2009**

editorial office address: 141400 Moscow region, Khimki,
Leningradskaya str., 24
phone: (495) 575 55 63, (495) 575 54 69
fax: (495) 572 00 68
e-mail: VESTNIK@LASPASE.RU
internet: <http://WWW.VESTNIK.LASPASE.RU>

Редакционная статья

С начала космической эры, рождение которой было определено запуском первого искусственного спутника Земли 4 октября 1957 года в СССР, были продемонстрированы огромные возможности, реализующиеся космической техникой в научном, социально-экономическом и оборонном направлениях. В частности, это позволило создать новое направление фундаментальных исследований – внеатмосферную астрономию.

В начале 1970-х годов директор Крымской астрофизической обсерватории (КрАО) академик А.Б. Северный поставил задачу создания орбитальной астрофизической обсерватории. В то время, он, естественно, обратился к самому знаменитому тогда предприятию – НПО «Энергия». Но положительного результата не было, т.к. эта организация была перегружена проектами пилотируемых полетов. И только в НПО имени С.А. Лавочкина А.Б. Северный нашел понимание и интерес в создании космической астрофизической обсерватории.

Трудностей на этом пути было немало. Даже не удалось привлечь к созданию необходимого инновационного телескопа Ленинградское оптико-механическое объединение (ЛОМО). Тогда НПО имени С.А. Лавочкина вместе с КрАО взялись за создание космического телескопа УФ-диапазона спектра излучения, который называли «СПИКА» по имени самой яркой звезды в созвездии Девы. Был создан сравнительно компактный с диаметром главного зеркала 0,8 м телескоп.

Первая отечественная астрофизическая космическая обсерватория «АСТРОН» была запущена более 30 лет назад – 23 марта 1983 года. Наш и зарубежный опыт показал, что создание таких обсерваторий весьма сложная научно-техническая и дорогая задача, и в настоящее время она может решаться только Россией, США и Евросоюзом.

«АСТРОН» положил начало в нашей стране созданию внеатмосферных обсерваторий. 1 декабря 1989 года была запущена на орбиту обсерватория «ГРАНАТ», работающая в рентгеновском и гамма диапазонах излучения. 18 июля 2011 года – запущена обсерватория «РАДИОАСТРОН». На ближайшую перспективу готовятся к запуску «СПЕКТР-РГ» и «СПЕКТР-УФ». В НПО имени С.А. Лавочкина ведется проектирование перспективных автоматических космических аппаратов «ГАММА-400» и «СПЕКТР – МИЛЛИМЕТРОН».

Современные космические обсерватории создаются на одной многофункциональной орбитальной платформе «НАВИГАТОР», подтвердившей свою эффективность в составе аппаратов «ЭЛЕКТРО-Л» № 1 и «СПЕКТР-Р».

Применение широких возможностей ультрафиолетовых технологий объясняет большой интерес к нему со стороны астрономов и проведения в последние годы десятков космических экспериментов, в том числе с помощью знаменитого орбитального телескопа им. Хаббла. Астрофизические наблюдения в УФ-диапазоне обладают многими преимуществами, наиболее значительные: в этом спектральном участке спектра наибольшая плотность физической информации о звёздах и газе; фон космического излучения самый низкий, что обеспечивает наименьший естественный шум при исследованиях.

«СПЕКТР-УФ» создается Россией с широкой международной кооперацией (в основном – европейской). Структура научной программы наблюдений следующая: базовая программа; национальные программы стран-участниц; открытая программа для международного сообщества.

В рамках рассматриваемого проекта для углубленного излучения планируется: физика ранней Вселенной; звездообразование в галактиках; образование галактик; сверхмассивные звёзды; формирование нашей Галактики; протопланетные диски и атмосферы вокруг экзопланет; тела Солнечной системы.

В этом выпуске журнала представлены статьи, дающие полное представление о проекте «СПЕКТР-УФ», о планируемых экспериментах и о перспективе развития астрофизических исследований в УФ-диапазоне спектра электромагнитного излучения.

КОСМИЧЕСКИЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИЗУЧЕНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОЙ ВСЕЛЕННОЙ: ПРОЕКТ «СПЕКТР-УФ»

SPACE PROSPECTS FOR STUDY THE UNIVERSE: THE «SPEKTR-UF» PROJECT

Б.М. Шустов¹,
доктор физико-
математических
наук, член-
корреспондент РАН,
bshustov@inasan.ru;
B.M. Shustov

М.Е. Сачков¹,
доктор физико-
математических наук,
msachkov@inasan.ru;
M.E. Sachkov

А.А. Боярчук¹,
доктор физико-
математических
наук, академик РАН,
aboyar@inasan.ru;
A.A. Boyarchuk

А.А. Моисеев²,
кандидат
технических наук,
moisheev@laspace.ru;
A.A. Moisehev

**А.И. Гомес
де Кастро³,**
профессор,
aig@ucm.es;
**A.I. Gomez
de Castro**

Представлен краткий обзор задач и методов ультрафиолетовой астрономии. Основное внимание уделено прогрессу в этом направлении за последние несколько лет. Дано общее описание международного (при основной роли России) проекта «СПЕКТР-УФ» (международное название «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет»), направленного на создание крупной космической обсерватории для работы в УФ-участке спектра (110–310 нм). Проект находится в продвинутой фазе создания.

Ключевые слова:
ультрафиолетовая астрономия;
космические проекты;
космическое приборостроение.

ВВЕДЕНИЕ

Современная астрономия – сложная разветвленная область знаний. Общее определение астрономии как фундаментальной науки, предметом которой является изучение природы Вселенной, т.е. различных космических объектов и процессов, протекающих в космосе на различных пространственных и временных масштабах, понятно каждому. Однако в практике научных исследований можно встретить довольно много различных разновидностей «астрономий». Одни из них получили свое название по предмету исследования и, частично, по историческим причинам («звездная», «внегалактическая» и т.д.). Другие – по степени прикладного назначения («практическая», «мореходная» и т.д.). Пожалуй, наиболее часто выделение «астрономий» происходит по спектральному (энергетическому) диапазону и по технологии наблюдений: гамма-, рентгеновская, оптическая,

Methods and goals of ultraviolet astronomy are briefly overviewed.

The paper focuses on the progress in this direction over the past few years. A general description of the international (with the main role of Russia) project «SPEKTR-UF» (internationally named as World Space Observatory – Ultraviolet), aimed at creating a large space observatory for UV region of the spectrum (110–310 nm) is presented. The project is in an advanced phase of creation.

Key words:
ultraviolet astronomy;
space missions;
space instrumentation.

инфракрасная, радио-, гравитационная и т.д. В этом ряду стоит и понятие «ультрафиолетовая астрономия». Конечно, все эти «астрономии» не являются «изолированными» друг от друга. Речь идет лишь о различных технологиях изучения объектов и процессов во Вселенной. Некоторые из таких «астрономий» предоставляют возможность получать важные научные сведения практически обо всех астрономических объектах, другие – только об избранных классах объектов, и каждый технологический подход имеет свои преимущества.

В этом плане «ультрафиолетовая астрономия», предметом которой является получение научной информации о Вселенной, заключенной в электромагнитном излучении из космоса в диапазоне длин волн от 10 нм (более короткие длины волн лежат уже в рентгеновской области) до 310 нм (граница атмос-

¹ ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow.

² ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.
Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia,
Moscow region, Khimki.

³ Мадридский Университет Комплутенсе, Испания, Мадрид.

Madrid Complutense University, Spain, Madrid

ферной прозрачности), выделяется в ряду других. Это прежде всего связано с тем фактом, что большая часть наблюдаемого вещества во Вселенной находится в состоянии, которое наиболее эффективно диагностируется методами ультрафиолетовой (УФ) спектроскопии. Уникальные возможности предоставляет УФ-спектроскопия для изучения межгалактической среды, в частности для поиска скрытого барионного вещества, для точного определения химического состава межзвездной среды, для исследования внутренних областей аккреционных дисков и т.д. В некоторых направлениях исследований (например, изучение структуры областей массового звездообразования в галактиках, структуры горячих корон и газовых торов вокруг планет) построение изображений в УФ дает важнейшую информацию, которую трудно или даже невозможно получить с помощью других технологий. Менее популярны, но также очень информативны методы поляриметрии в УФ-участке спектра.

С технической точки зрения понятие «ультрафиолетовая астрономия» входит в более общее понятие «внеатмосферная астрономия». Это связано с тем, что свойства земной атмосферы ограничивают возможности наземных наблюдений довольно узкими окнами прозрачности. За пределами этих окон: в гамма-, рентгеновском, ультрафиолетовом диапазонах, а также в значительной части ИК- и субмиллиметрового диапазона – наблюдения возможны только из космоса.

Широкий набор важнейших научных целей и возможностей УФ-технологий наблюдений Вселенной объясняют, почему за непродолжительный период развития УФ-астрономии (примерно 45 лет) в мире проведены многие десятки кратковременных космических экспериментов и запущено около двух десятков долговременных космических аппаратов (обсерваторий) для наблюдений объектов в этом диапазоне. История ранних этапов развития УФ-астрономии как технологии описана, в частности, в обзоре (Москаленко Е.И., 1984); история УФ-спектроскопии – в работе (Панчук В.Е. и др., 2006); современное состояние технологий УФ-астрономии и краткий экскурс в перспективы – в (Shustov B. et al., 2011; Сачков М.Е., 2013) и в написанной Б.М. Шустовым главе 4 тома 1 «Астрофизика» книги (Фундаментальные космические исследования, 2013).

Современная наука развивается очень быстро. За прошедшие с момента выхода этих работ несколько лет появились новые взгляды как на актуальность научных задачи так и на перспективные технологии в этой области наблюдений Вселенной и ее космоса. Эти вопросы обсуждались на крупных международных конференциях, таких, как «Challenges in UV-astronomy» («Актуальные проблемы УФ-астрономии»), состоявшейся в Европейской Южной обсерватории

(Гархинг, Германия) в октябре 2013 года и на симпозиуме «Next Step in Studying the Ultraviolet Universe: WSO-UV», проведенном в рамках 40-й ассамблеи COSPAR в августе 2014 года в Москве.

В данной статье в основном обсуждаются именно эти современные и перспективные аспекты развития ультрафиолетовой астрономии, как научные, так и технические. Естественно в этой связи проанализировать актуальность крупного отечественного проекта «СПЕКТР-УФ», направленного на создание большой космической обсерватории для работы в УФ-участке спектра.

В разделе 1 кратко обсуждаются актуальные научные проблемы, стоящие перед исследователями в области ультрафиолетовой астрономии, в разделе 2 – современные и перспективные наблюдательные средства (т.е. планируемые космические УФ-обсерватории и инструменты), в разделе 3 – современное состояние проекта «СПЕКТР-УФ» и его место в общей перспективе развития этой области внеатмосферной астрономии.

1. Актуальные научные задачи изучения Вселенной методами УФ-астрономии

Общепризнано, что наиболее выдающимися фундаментальными астрономическими достижениями, полученными методами УФ-астрономии в предыдущие годы, являются:

- Прямое обнаружение молекул H_2 . Эту наиболее распространенную молекулу во Вселенной нельзя обнаружить ни в видимом, ни в радиодиапазонах спектра. В статье (Carruthers G.R., 1970) сообщалось об обнаружении резонансных Лайман-альфа полос этой молекулы в ультрафиолетовом спектре звезды ξ Per, полученном с помощью спектрографа в ракетном проекте AEROBEE-150.
- Открытие горячей фазы межзвездной среды. Это открытие совершенно изменило наши представления о структуре и эволюции как межзвездной среды, так и галактик в целом (Jenkins E.B., Meloy D.A., 1974). Открытие сделано с помощью специализированной космической УФ-обсерватории COPERNICUS.
- Установление величины относительного содержания дейтерия к водороду, чрезвычайно важной величины, определяющей выбор космологической модели Вселенной (Rogerson J.B., York D.G., 1973). Здесь также были использованы возможности КА COPERNICUS.
- Массовое высокоточное определение химического состава звезд. Только методами УФ-спектроскопии удалось с высокой точностью определить, из чего состоят внешние слои (ат-

мосферы) звезд и межзвездный газ. Здесь особенно велика роль обсерватории IUE (International Ultraviolet Explorer). Основные результаты проекта IUE концентрированно представлены в книге (*Ultraviolet Astrophysics Beyond the IUE Final Archive*, 1998).

- Выявление направления поиска резервуаров скрытого барионного вещества во Вселенной. Наиболее важные наблюдения выполнены на космическом телескопе им. Хаббла (KTH) и обсерватории FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer).
- Выявление природы структур (например, корона, колец нейтрального газа и т.д.) и процессов, протекающих во внешних областях атмосфер планет-гигантов. Огромный вклад здесь внесен работами, выполненными по ультрафиолетовым наблюдениям на KTH.

Запущенная в СССР космическая обсерватория «АСТРОН» (Боярчук А.А., Мошнеев А.А., 2013) также внесла свой вклад. С помощью спутника «АСТРОН» был получен ряд важных результатов по следующим проблемам: истечение вещества из звезд различных спектральных классов по профилям резонансных ультрафиолетовых линий; содержание химических элементов в атмосферах необычных (пекулярных) звезд классов Ар и Ам; свойства нестационарных звезд (например, карликовых Новых), квазаров и галактик, галактических туманностей и диффузного ультрафиолетового излучения Галактики. С помощью КА «АСТРОН» удалось пронаблюдать такие явления, как кома кометы Галлея с 1985 по 1986 год и вспышка Сверхновой в Большом Магеллановом облаке в конце февраля 1987 года (SN1987A).

В данной статье мы ограничились астрофизическими проблемами и не рассматриваем крупнейшие достижения, полученные методами УФ-астрономии в области гелиофизики.

Круг задач, решаемых методами современной УФ-астрономии, весьма широк. Наиболее полный и относительно современный охват этой тематики представлен в сборнике (*UV Astronomy 2011*, 2012). Конечно, ни один проект не может быть ориентирован на выполнение всех возможных задач в такой широкой области, как ультрафиолетовая астрономия. В проекте «СПЕКТР-УФ» (см. раздел 3) в первые два года наблюдений предусмотрено выполнение т.н. «Основной Программы» (Core Program). В нее включены отдельные наиболее актуальные проблемы:

1. Определение содержания барионов в диффузной компоненте Вселенной и эволюция галактик и межгалактической среды (МГС).
2. Физика аккреции и истечений в астрофизических объектах.
3. Образование и эволюция Галактики.

4. Атмосферы экзопланет и астрохимия в сильном поле УФ-излучения.

Список этот не является жестко фиксированным. Он лишь отражает состояние взглядов на наиболее актуальные научные задачи УФ-астрономии, сложившиеся на начало этого десятилетия. Более подробное описание роли УФ-наблюдений в этих направлениях исследований имеется в работе (Шустов Б.М., Сачков М.Е., 2013) и в книге (*Фундаментальные космические исследования*, 2013). Отметим, что дальнейшее развитие науки только подтверждает правильность выбора содержания «Основной Программы» проекта «СПЕКТР-УФ».

В силу естественной ограниченности объема статьи далее в этом разделе приведем лишь два примера актуальности УФ-наблюдений по направлению 1.

Первый пример относится к проблеме поиска т.н. скрытых барионов в галактических окрестностях и межгалактической среде. Последние лет десять эта проблема очень интенсивно обсуждается, а недавно, с помощью космической обсерватории KTH, здесь получено несколько новых важных результатов, подтверждающих актуальность задачи, и подчеркивающих перспективность наблюдений с помощью обсерватории «СПЕКТР-УФ».

Вклад различных компонентов Вселенной обычно описывается на языке плотности вещества-энергии «омега». Общая плотность Вселенной $\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$, где $\rho_{\text{crit}} = 3H_0^2 / 8\pi G = h^2 \times 1.88 \times 10^{-29}$ г/см³ – критическая плотность, а константа Хаббла H_0 представлена в виде $H_0 = h \times 100$ км/с Мпс⁻¹. Согласно недавним оценкам (Lahav O., Liddle A.R., 2012), $\Omega = 1.02 \pm 0.02$, $h = 0.704 \pm 0.025$. Основными составляющими Ω являются плотность так называемой темной энергии $\Omega_\Lambda = 0.73 \pm 0.03$, плотность небарионного темного вещества $\Omega_m = 0.226 \pm 0.012$, и плотность барионного вещества $\Omega_b = 0.0454 \pm 0.0012$.

Проверить последний вывод теории напрямую трудно, а так лишь часть (согласно Nicastro F. et al., 2003 – менее 50%) барионного вещества доступна современным наблюдениям. В настоящее время эта доля несколько возросла, но, тем не менее, «недостача» остается весьма существенной. И, естественно, исследователей будоражит вопрос: где и в какой форме существует это ненаблюдаемое (темное) барионное вещество?

Барионное вещество во Вселенной может быть разделено на четыре фазы в соответствии с плотностью и температурой:

1. Конденсированная фаза – звезды и холодный газ в галактиках. Хорошо обнаруживаемая фаза.
2. Горячая фаза – газ в скоплениях галактик с температурой $T > 10^7$ К. Наблюдается по рентгеновскому излучению.

3. Диффузная фаза – большинство структур, наблюдающихся в L_α -линиях поглощения в спектрах далеких квазаров (т.н. L_α -абсорберы). Линия L_α лежит в УФ-участке спектра.

4. Тепло-горячая (warm-hot) фаза – газ, нагретый ударными процессами до температур $10^5 \leq T \leq 10^7$ K. Этот газ трудно обнаружим по линиям поглощения L_α вследствие высокой степени ионизации и из-за малой интенсивности излучения вследствие низкой плотности. Однако наблюдаются линии высокоионизованных тяжелых элементов (O, C, Si и т.д.), которые также лежат в УФ-диапазоне спектра.

Относительная доля этих компонентов менялась в ходе эволюции Вселенной (рисунок 1). Согласно расчетам (Davé R., 2005) эволюции барионов во Вселенной, значительная доля темного барионного вещества в ближней Вселенной ($z < 2$) должна находиться именно в фазах 3 и 4.

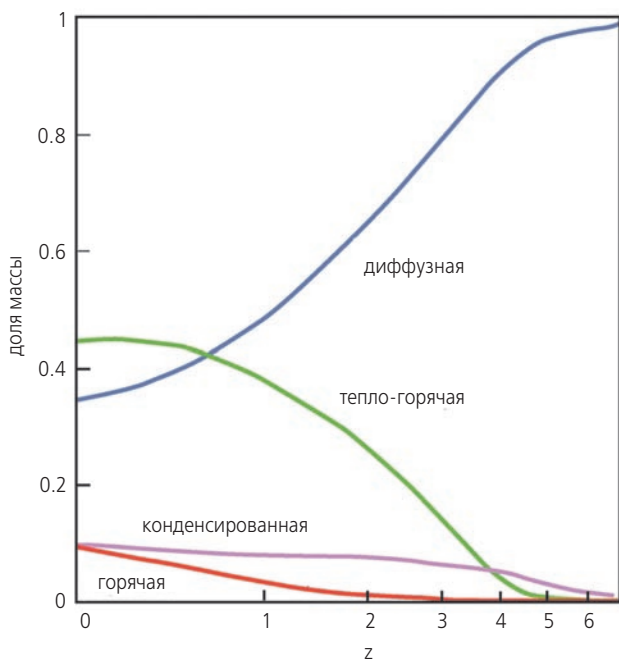


рисунок 1. Изменение относительной доли по массе различных фаз барионного вещества в процессе эволюции Вселенной в зависимости от космологического фактора z согласно (Davé R., 2005)

В то время как наблюдения L_α -поглощающих систем, т.е. межгалактических облаков водорода (диффузная фаза) на больших z ($z > 2$), осуществляется с помощью спектрографов, установленных на крупных наземных оптических телескопах, т.к. линия L_α из-за космологического смещения частоты переходит в оптический диапазон, наблюдения L_α -линий водородных облаков в ближней Вселенной ($z < 2$) возможно только с помощью УФ-инструментов. Важно, в частности, наблюдать спектр масс таких облаков. Если он крутой (показатель в распределении числа обла-

ков в зависимости от массы меньше -2), то основная масса межгалактического водорода будет содержаться в маломассивных облачках, которые практически не обнаружимы.

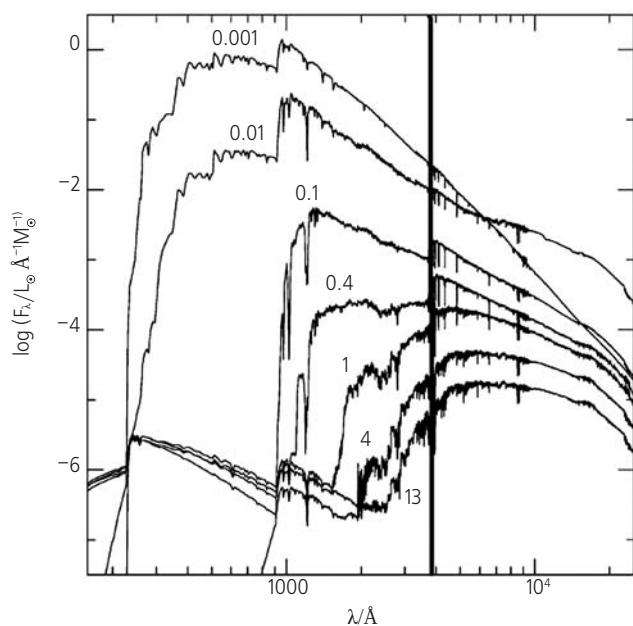
Подтверждением больших перспектив поиска барионов в межгалактической среде служит обнаружение в окрестностях Галактики большого числа поглощающих облаков по наблюдениям в дальнем ультрафиолетовом участке спектра линий поглощения OVI (Savage B.D. et al., 2003). С помощью космического аппарата FUSE были получены спектры 100 квазаров, в которых обнаружены линии OVI, ассоциируемые с объектами (облаками) в фазе 4. Такие облака заполняют галактическую корону и пространство, занимаемое Местной группой галактик. Полная масса барионов в этих облаках оценивается при относительном содержании кислорода 0.1 от солнечного в $\sim 10^{12} M_\odot$. Этого достаточно, чтобы объяснить динамическую стабильность Местной группы галактик (Nicastro F. et al., 2003).

Выявление природы газа в непосредственной близости от галактик и его связи с межгалактической средой представляет важную задачу для наблюдательной астрономии. Изучение этих структур в диапазоне угловых расстояний от галактики обеспечит фундаментальную информацию о барионном содержании газа, его физических условиях, его происхождении и его роли в формировании эволюции галактик.

УФ-спектроскопия ультрафиолетовых линий поглощения в настоящее время является наиболее прямым способом исследований газа в галактических окрестностях. Для такой работы требуется спектроскопия высокого разрешения слабых источников, т.е. необходим большой космический телескоп. Недавние результаты, полученные с помощью KTX (со спектрографом COS), подтверждают этот вывод. В (Tumlinson J. et al., 2013) на основе наблюдений окрестностей 44-х близких галактик ($z=0,15-0,35$) показано, что в окрестностях всех этих галактик водорода довольно много; для галактик с активным звездообразованием его масса может быть сравнима с галактической звездной массой. В (Lehner N. et al., 2013) показано, что в окрестностях многих галактик, расположенных на $z \sim 1$, имеется много ранее не обнаруженных холодных, бедных металлами облаков, а также подтвердили наличие значительного количества тепло-горячих облаков, обогащенных металлами. Результатам наблюдений системы (облаков) с поглощением и в OVI и H I линиях посвящена статья (Savage B.D. et al., 2014), и снова показано, что эти окологалактические системы содержат массу, сравнимую с массой барионов галактик.

В качестве второго примера рассмотрим проблему определения возрастов галактик. УФ-спектроскопия

низкого разрешения эффективна для определения возрастов молодых галактик. Спектры молодых галактик любого типа сильно изменяются с возрастом. На рисунке 2 (адаптированном из работы (Bruzual G., Charlot S., 2003)) показана теоретическая эволюция распределения энергии в спектре галактики. Видно, что в УФ-области (слева от цветной вертикальной линии) это распределение меняется очень сильно в зависимости от возраста галактики, что позволяет по форме распределения (определяемого по спектрам низкого разрешения или по снимкам, сделанным в различных УФ-фильтрах) определять возраст.

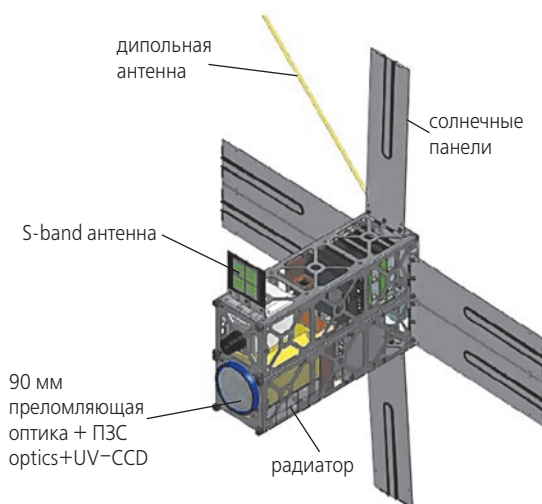


рисунк 2. Теоретическая эволюция распределения энергии в спектре галактики. Возрасты галактики, соответствующие кривым распределения, указаны в млрд. лет

2. Новые проекты и технологии ультрафиолетовой астрономии

Развитие технологии ультрафиолетовых наблюдений астрономических объектов с помощью заатмосферных средств достигло серьезного прогресса. Далее в этом разделе описаны обсуждаемые в мировой науке проекты будущих УФ-обсерваторий. Мы не претендуем на полноту обзора и рассматриваем проекты, по нашему мнению представляющие наиболее характерные тенденции в развитии методов УФ-астрономии. Далеко не все предложенные проекты будут реализованы, особенно маловероятно скорое осуществление крупных проектов (за исключением проекта «СПЕКТР-УФ», описанного в разделе 3), но, тем не менее, все они представляют существенный интерес. Для удобства изложения проекты описаны в порядке возрастания апертуры телескопа.

В (Brosh N. et al., 2014) предложена концепция малых космических телескопов, которые, тем не менее, способны обеспечить заметный научный вклад. Подобный проект может быть реализован на базе сверхмалого спутника класса кубсат (cubesat). Малые размеры оптики, возможность максимально сократить количество промежуточных моделей и использование готовых компонентов делают стоимость таких спутников очень умеренной (менее 10 млн. евро), что доступно, например, для научных и технических вузов. На рисунке 3 показан общий вид такого аппарата, спроектированного в варианте 6U (шесть элементарных кубических объемов со стороной 10 см). Полезной нагрузкой является 90-мм УФ-камера. Масса КА – 7 кг. Главное научное назначение – провести обзор областей близ ярких звезд, не охваченных УФ-обсерваторий GALEX, в силу того, что детекторы GALEX не предназначены для работы по ярким источникам.



рисунк 3. Сверхмалый космический аппарат с 90-мм УФ-камерой

Из более крупных инструментов можно отметить UVIT – телескопы на индийской космической обсерватории ASTROSAT (Hutchings J.B., 2014). Два 40-см телескопа для наблюдений (построения изображений) в ближнем и дальнем УФ, а также в оптическом диапазоне, с полями зрения 0.5° и разрешением ~1" подготовлены к запуску (запланирован на 2015 год). Они будут работать соосно с тремя рентгеновскими телескопами.

Более сложная конструкция телескопа (камеры) предложена в проекте MESSIER. Зеркальная внеосевая оптика (апертура 45 см, f/2.5) обеспечивает в практически плоском (неплоскостность <0.05%) поле 3×2 очень стабильную функцию рассеяния точки с низкоамплитудными крыльями (из-за отсутствия центрального экранирования). Формат ПЗС детектора – мозаика из восьми матриц 4K×4K, масштаб

1"/пиксел. Стоимость проекта – 150 млн. евро. В режиме сканирования изображение объекта (например, галактики) используется режим ВЗН (временной задержки и накопления). Камера предназначена для проведения наблюдений галактик и узлов «космической паутины» в различных длинах волн и на различных расстояниях, характеризующихся т.н. космологическим фактором z , с тем, чтобы прояснить картину эволюции «космической паутины» и формирования галактик. Эта информация была представлена Valls-Gabaud на уже упоминавшейся конференции «Next Step in Studying the Ultraviolet Universe: WSO-UV». 2013 год, Гархинг.

Проект более крупного телескопа для построения УФ и оптических изображений представлен в работе (Côté P., 2014). 1-метровый телескоп CASTOR (The Cosmological Advanced Survey Telescope for Optical and UV Research) проектируется для построения широкоугольных (более 0.7 кв. градуса) изображений в диапазоне (150–550 nm).

В (Neiner C. et al., 2014) представлен проект космического 1.3-метрового телескопа для спектроскопии магнитных звезд с целью выявления их характеристик и построения 3D-карт таких звезд и их окрестностей.

Таким образом, почти все проекты малых и умеренного размера космических УФ-телескопов нацелены на построение УФ-изображений космических объектов. Это связано с тем, что для спектроскопии (и особенно спектроскопии высокого разрешения) требуется гораздо больше фотонов и, соответственно, необходимы более крупные телескопы.

Один из таких более крупных проектов GESE (Galaxy Evolution Spectroscopic Explorer) включает 1.5-метровый телескоп (f/5), оснащенный мультиобъектным селектором щели (используется цифровой микродвигатель) и позволяющий одновременно по четырем спектроскопическим каналам получать спектры низкого разрешения ($R=400$) в УФ, синем, красном, и ближнем ИК-участках спектра. Научной целью проекта является спектроскопия более миллиона галактик с целью выявления эволюционных процессов, ведущих к формированию последовательности Хаббла. Многие элементы проекта уже отработаны «в железе», так что авторы (Heap S.R. et al., 2013) полагают, что есть серьезные шансы в следующую декаду получить финансирование. Интересно, что сами авторы считают этот телескоп малым (small).

В более отдаленном будущем просматривается ряд амбициозных проектов, основанных на использовании больших и очень больших телескопов. Кратко представим наиболее часто обсуждаемые из них.

По следам успеха КТХ американские ученые предложили создать новый 2.4-метровый УФ-оптический

космический телескоп, оснащенный современными инструментами. Телескоп – трехзеркальный анастигмат, обеспечит высокое качество изображения по большому полю. Будут использованы сверхоблегченные оптические элементы, а при малом фокальном отношении (предварительно F/1.2) телескоп будет еще и очень компактным. УФ-оптические фотокамеры используют два массива детекторов $21k \times 21k$. Детектор для канала дальнего ультрафиолетового диапазона – МКП. В настоящее время этот проект, названный HORUS (The High-ORbit Ultraviolet-visible Satellite), является в НАСА одним из наиболее продвинутых в области УФ-астрономии. Считается, что HORUS обеспечит в 100 раз большую эффективность построения изображений и будет иметь более чем в 10 раз высокую УФ-спектроскопическую чувствительность, чем КТХ (Scowen Paul A., 2013).

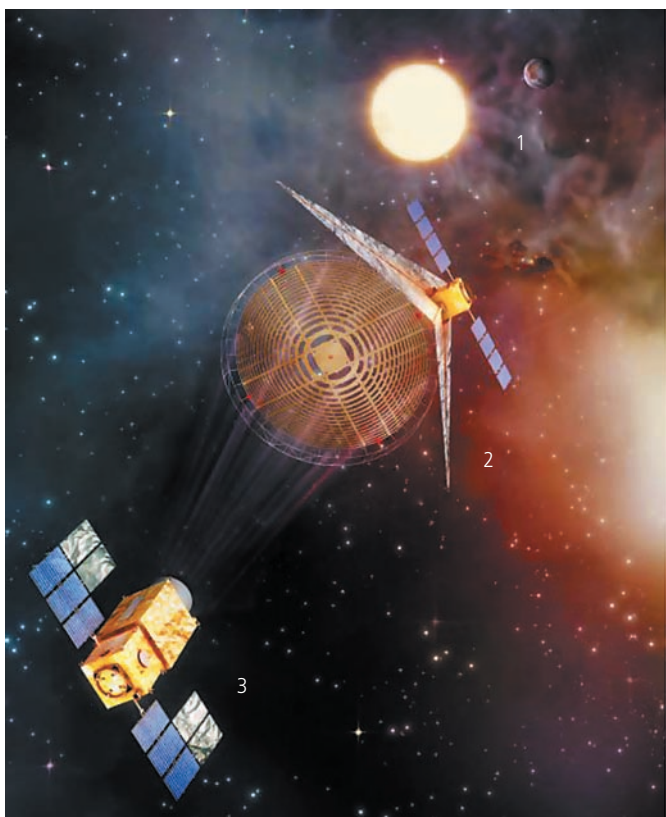
Предложенный учеными США (Spergel D.N., 2010) проект THEIA включает телескоп с 4-метровым Al/MgF_2 зеркалом и три основных инструмента с LiF покрытием. Среди них двухканальная УФ-камера поля оптических изображений с полем $19' \times 15'$ с размером пикселя 0.018 угл. с, многоцелевой высокочувствительный УФ-спектрограф, оптимизированный для наблюдений слабых астрономических объектов в диапазоне 100–300 нм со спектральным разрешением 30000–100000 и три узкопольные камеры для наблюдений экзопланет от УФ до ближнего ИК.

Многоволновая обсерватория ATLAST (США) представляет собой набор концепций миссий для нового поколения космических обсерваторий с диаметром главного инструмента в 8–16-метровом диапазоне, что позволит выполнить некоторые из самых сложных наблюдений и ответить на самые важные вопросы, в том числе «Есть ли жизнь в другом месте в Галактике?» (Pasquale B. et al., 2010). В 16-метровом варианте зеркало предлагается сделать сегментируемым и складываемым! В проекте 10-метрового телескопа компании BELL AEROSPACE главное зеркало также предлагается сделать сегментированным, причем сборка должна осуществляться в космосе (Сачков М.Е., 2013).

Европейские ученые недавно предложили концепцию большого космического телескопа 4–8 метрового класса EUVO – European Ultraviolet – Visible Observatory (Gómez de Castro A.I. et al., 2014).

Очень интересен проект, предложенный учеными Франции – телескоп на основе зон Френеля. Предлагаемый инструмент представляет собой ультралегкий телескоп, демонстрирующий новые оптические концепции, основанные на дифракционной фокусировке (Raksataya T. et al., 2012). Он позволяет получать высокий динамический диапазон изображений, одновременно снижая ограничения на размещение и изготовление основных оптических элементов. Эта концепция должна открыть путь к очень большому

(до 50 м) апертурам, размещенным в космосе. В этом инструменте, состоящем из двух космических аппаратов, один аппарат несет на себе фокусирующий блок – зонную пластину Френеля, второй аппарат оснащен оптикой поля, фокальными инструментами и детекторами (рисунок 4). Поле зрения телескопа невелико, и он наиболее эффективен для изучения с очень высоким угловым разрешением компактных объектов (например, протопланетных дисков).



1 – источник (звезда+планета); **2** – пластина Френеля, установленная на автономной платформе; **3** – фокальный узел, также установлен на отдельной платформе.

рисунок 4. Дифракционный телескоп Френеля

Все эти проекты весьма интересны, но реальность такова, что крупные космические УФ-обсерватории появятся не раньше конца 2020-х годов. Сроки для планирования и осуществления обсерваторий, таких как КТХ или крупнее, довольно большие, не менее 15–20 лет, и пока все предложенные проекты находятся на ранних стадиях развития. Нужно также учесть, что амбициозный и очень дорогостоящий (начальная оценка стоимости 3.5 млрд. долларов, современная – не менее 12 млрд.) американский проект JWST продвигается с огромной задержкой (около 10 лет), съедая ресурсы, и по неоднократным заявлениям руководства NASA до его запуска (возможно, в 2017 году) никакие другие проекты крупных космических телескопов не получают существенной финансовой поддержки.

3. Проект «СПЕКТР-УФ» – главное окно в ультрафиолетовую Вселенную на будущее десятилетие

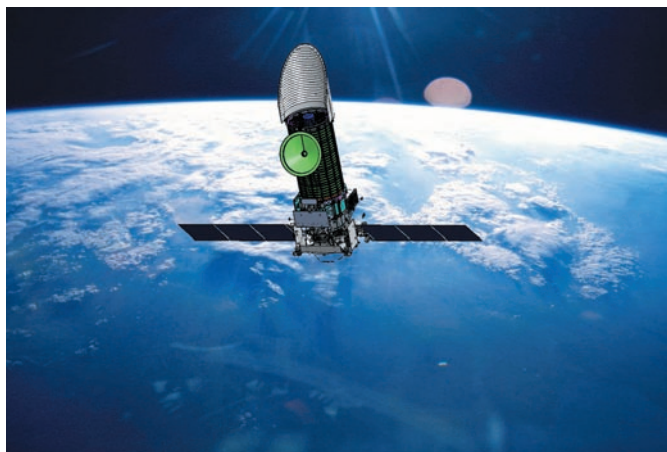
Необходимость такой космической обсерватории как «СПЕКТР-УФ» в настоящее время представляется очень острой. Срок активного существования КТХ на орбите определен примерно до 2018 года, а в планах крупнейших космических агентств нет УФ-миссий следующего поколения на период вплоть до 2030 года. Впервые за почти полвека космических исследований астрономы столкнулись с проблемой доступа к УФ-диапазону. На период до конца 20-х годов проект «СПЕКТР-УФ» является главной и единственной российской и международной перспективой иметь «ультрафиолетовое окно» во Вселенную. Поэтому к проекту приковано пристальное внимание со стороны международного сообщества, что было отмечено на крупнейших конференциях «Challenges in UV-Astronomy» (2013), SPIE-2014 см. (*Sachkov M. et al. Instrumentation...*, 2014), COSPAR-2014. Проект получил международное название «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет» (ВКО–УФ), «World Space Observatory – Ultraviolet» (WSO–UV) он включен в Федеральную космическую программу (ФКП) России на период 2006–2015 гг. и в проект ФКП 2016–2025 гг. под двумя названиями: «СПЕКТР-УФ» и «Всемирная космическая обсерватория» (*Shustov B. et al.*, 2009; *Боярчук А.А. и др.*, 2012; *Sachkov M. et al. WSO-UV project...*, 2014).

Проект «СПЕКТР-УФ» стал естественным шагом в развитии в нашей стране направления УФ-астрономии, начавшегося еще в 70-е годы. Самым ярким событием был запуск и успешная работа УФ-обсерватории «АСТРОН» (1983–1989 гг.). Научным руководителем проекта был академик А.А. Боярчук, главным конструктором – А.А. Моисеев (*Боярчук А.А. и др.*, 2013). Основным инструментом обсерватории «АСТРОН» был крупнейший в то время 80-см космический телескоп «СПИКА», оснащенный французским сканирующим спектрографом. Некоторые технические решения, предложенные и проверенные в проекте «АСТРОН» получили продолжение в проекте «СПЕКТР-УФ».

Проект «СПЕКТР-УФ» с общей структурной точки зрения рассматривается как космический комплекс. Космический комплекс (КК) включает в себя: космический аппарат (КА) «СПЕКТР-УФ», наземный сегмент (НС) «СПЕКТР-УФ» и ракетно-космический комплекс (РКК). Мы не будем останавливаться на описании РКК и его компонентов, включающих: ракету-носитель, технический комплекс космодрома, стартовый комплекс космодрома, комплекс средств измерений, сбора и обработки информации на участке выведения, т.к. эти компоненты стандартны для

всех проектов (возможен выбор ракеты-носителя и разгонного блока из ограниченного списка). Для вывода КА «СПЕКТР-УФ» планируется использовать ракету космического назначения (РКН) «ПРОТОН».

На рисунке 5 показан КА «СПЕКТР-УФ». Главные компоненты КА – служебный модуль (платформа) и полезная нагрузка – комплекс научной аппаратуры (КНА).



рисунки 5. КА «СПЕКТР-УФ»

3.1. Служебный модуль (платформа) «НАВИГАТОР»

В качестве служебного модуля используется базовый модуль (БМ) «НАВИГАТОР». «НАВИГАТОР» разработан как универсальный служебный модуль для ряда космических проектов. Момент сборки БМ «НАВИГАТОР» в НПО им. С.А. Лавочкина показан на рисунке 6.



рисунки 6. Сборка служебного модуля «НАВИГАТОР» в НПО им. С.А. Лавочкина

На базе этого служебного модуля уже успешно реализованы проекты космической радиоастрономической обсерватории «РАДИОАСТРОН» (запущен на орбиту в 2011 году) и КА ДЗЗ «ЭЛЕКТРО».

Все функции управления и контроля осуществляет бортовой комплекс управления (БКУ). БКУ БМ «НАВИГАТОР» обеспечивает:

- управление движением центра масс и движением вокруг центра масс КА;
- управление бортовыми системами;
- контроль работоспособности бортовых систем, переключение резервных устройств и приборов.

БКУ реализует следующие режимы:

- режим поиска Солнца из произвольного положения, ориентацию и стабилизацию КА в заданном направлении относительно Солнца;
- режим построения базовой ориентации КА относительно инерциальной системы координат, переориентацию КА в заданном направлении и прецизионную стабилизацию КА в этом направлении при проведении научных исследований;
- режим выдачи заданного импульса коррекции орбиты;
- режим закрутки КА вокруг заданной оси в заданном направлении относительно Солнца для пассивной гироскопической стабилизации КА.

Основные характеристики КА «СПЕКТР-УФ», в том числе обеспечиваемые служебным модулем «НАВИГАТОР», приведены в таблице 1.

таблица 1 – Основные характеристики КА «СПЕКТР-УФ»

характеристика	значение
время активного существования	не менее 5 лет
масса КА (с топливом)	2900 кг
масса полезной нагрузки	1625.5 кг
мощность, потребляемая полезной нагрузкой	до 1000 Вт
скорость передачи научных данных	до 4 Мбит/с
точность наведения и стабилизации с помощью системы датчиков гида (3σ)	0.1 угл. с

3.2. Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ»

КНА «СПЕКТР-УФ» оптимизирован для наблюдений в диапазоне 110–310 нм. В принципе УФ-диапазон намного шире, но в крайнем УФ (10–91 нм), как показал опыт предыдущих миссий (EUVE, ROSAT), наблюдения астрофизических объектов очень затруднены из-за сильного поглощения излучения межзвездным водородом и гелием. В диапазоне 91–110 нм (весьма интересном с астрофизической точки зрения) используемые покрытия оптических элементов $Al+MgF_2$, к сожалению, неэффективны (Жупанов В.Г. и др., 2014). Покрытия LiF , эффектив-

ные в этом диапазоне, весьма сложны в эксплуатации, так что в качестве компромисса выбран диапазон 110–310 нм.

В состав КНА «СПЕКТР-УФ» входят:

- телескоп Т-170М;
- комплекс основных научных приборов (КОНП) в составе:
 - блок спектрографов – БС, включающий каналы ВУФЭС, УФЭС и СДЦ,
 - блок камер поля (БК),
 - блок управления научными данными (БУНД);
- научная аппаратура «КОНУС-УФ» (НА «КОНУС-УФ»).

КНА в целом описан в работе (Сачков М.Е и др., 2014). Подробные описания основных инструментов см.: телескопа – в (Яскович А.Л. и др., 2014; Мошнев А.А. и др., 2014); блока спектрографов – в (Саванов И.С. и др., 2014); блок камер поля – в (Гомес де Кастро и др., 2014). Мы отсылаем читателей к этим работам, а здесь приведем только краткие сведения о характеристиках КНА в табличном виде. В таблице 2 представлены самые общие характеристики телескопа Т-170М, в таблице 3 – каналов УФЭС, ВУФЭС и СДЦ блока спектрографов, в таблице 4 – каналов дальнего и ближнего УФ блока камер поля.

таблица 2 – Основные оптические параметры телескопа Т-170М

тип оптической системы	Ричи – Кретьен
диаметр апертуры D	1700 мм
фокальное отношение	10.0
угловой диаметр поля зрения	0.50° (200 мм)
доступный спектральный диапазон	110–700 нм

таблица 3 – Основные характеристики каналов УФЭС и ВУФЭС и СДЦ

УФЭС и ВУФЭС	
спектральный диапазон УФЭС	174–310 нм
ВУФЭС	110–176 нм
разрешающая сила	>50000
СДЦ	
спектральный диапазон	110–320 нм
разрешающая сила	1000–2500
пространственное разрешение	0.5–1 угл. с

таблица 4 – Основные характеристики БКП

канал	диапазон, нм	разрешение, угл. с	поле зрения, угл. с
дальний УФ (FUV)	115–175	0.1	70×75
ближний УФ (NUV)	185–320	0.1	70×75

3.3. Наземный сегмент обсерватории «СПЕКТР-УФ»

На рисунке 7 показана упрощенная схема наземного сегмента проекта «СПЕКТР-УФ». Основными составляющими наземного сегмента являются наземный комплекс управления (НКУ) и наземный научный комплекс (ННК). В проекте «СПЕКТР-УФ» НКУ и ННК фактически реализуются в виде двух копий: российской и испанской. В некотором смысле это аналог организации наземного сегмента в проекте IUE. Главные составляющие НКУ – Центр управления полетом и наземные пункты с приемопередающими антеннами (в России – Медвежий Озера, в Испании – Маспаломас, Канарские острова). Главные составляющие ННК – Центр обработки научной информации и (возможно) дополнительные приемные антенны (наземные пункты). Более подробно наземный сегмент проекта «СПЕКТР-УФ» описан в работе (Казакевич Ю.В. и др., 2014).



рисунк 7. Схема наземного сегмента проекта «СПЕКТР-УФ»

Согласно принятому (базовому) варианту обсерватория «СПЕКТР-УФ» будет работать на геосинхронной орбите с наклоном 51°.4. Влияние тени Земли на работу аппарата будет минимальным, и орбитальный период – 1 сутки – позволит исследовать движущиеся объекты (например, планеты Солнечной системы) и быстро перестраивать программу наблюдений для наведения на важные непредсказуемые объекты (например, при вспышке Сверхновых). Выбор геосинхронной орбиты был сделан исходя из следующих критериев:

- минимизация нахождения аппарата в радиационных поясах Земли;
- возможности ракеты-носителя;
- обеспечение зон длительной видимости объектов;
- минимальное время нахождения в тени Земли;
- стабильность орбиты;
- доступное техническое оборудование космического и наземного сегментов для радиосвязи, обеспечивающее скорость передачи научных данных не менее 2 Мбод.

На рисунке 8 показана проекция орбиты КА на Землю (базовый вариант при долготе узла, соответствующей станции «МАСПАЛОМАС»). При таком наклонении оба пункта в России и в Испании не будут иметь 24-часовую видимость КА. В связи с переходом с ракеты-носителя «ЗЕНИТ» на ракету космического назначения «ПРОТОН» появилась возможность уменьшить наклонение орбиты до 14 градусов. Это позволит иметь 24-часовой видимости КА с обоих пунктов. Окончательное положение орбиты будет выбрано позднее. Подробнее об орбите КА «СПЕКТР-УФ» см. (Шейхет А.И. и др., 2014).



рисунок 8. Трасса подспутниковой точки КА «СПЕКТР-УФ» на поверхности Земли. $i=51.4$ градуса, долгота узла, соответствует станции «Маспаломас»

3.4. Организация проекта

История развития проекта насчитывает уже более 20 лет, однако реальная работа по его реализации началась только во второй половине первой декады текущего века. В эти годы проект имел более обширную международную кооперацию. Однако впоследствии большая часть стран, выразивших намерение участвовать в проекте, не смогла подтвердить эти намерения. С выходом Германии из проекта в 2013 году проект стал российско-испанским. Роскосмос взял на себя дополнительные расходы, и сейчас доля России в проекте превышает 80%. К настоящему времени по проекту работает развитая кооперация в России и в Испании.

3.4.1. Кооперация в России

Финансирование проекта «СПЕКТР-УФ» осуществляет Роскосмос в рамках Федеральной космической программы. Роскосмос также осуществляет общий контроль за реализацией проекта как в России, так и на международном уровне.

В таблице 5 показана основная кооперация по проекту в России.

3.4.2. Кооперация в Испании

В Испании нет космического агентства и функции организации и финансирования космической деятельности распределены как минимум по четырем организациям. Финансирование проекта осуществляется Министерством промышленности, энергетики и туризма и Министерством образования и науки.

Головной научной организацией проекта в Испании является Университет Комплутенсе (Мадрид). Промышленные партнеры – компания SENER (она ответственна за проектирование и изготовление БКП) и компания GMV (ответственна за разработку элементов наземного сегмента).

таблица 5 – Основная кооперация по проекту «СПЕКТР-УФ» в России

организация		ответственность в проекте
НПО им. С.А. Лавочкина + кооперация		<u>головная организация по проекту:</u>
		- телескоп Т-170М - платформа «НАВИГАТОР» - запуск КА на орбиту - управление полетом и участие в наземном научном комплексе
Институт астрономии РАН		<u>головная научная организация:</u>
		- научная программа - комплекс научной аппаратуры - наземный научный комплекс
основные соисполнители для ИНАСАН по КНА	ЛЗОС	оптические элементы телескопа Т-170М
	ВНИИЭФ	оптико-механический блок блока спектрографов
	ИТМО, ГОИ им. С.И. Вавилова	оптические элементы и тестирование блока спектрографов
	ИКИ РАН	- бортовой блок управления научными данными - система датчиков гида
для НПО им. С.А. Лавочкина по СДГ	НПО «Луч»	- проведение электрических испытаний КНА покрытия оптических элементов

3.4.3. Организация использования обсерватории астрономическим сообществом

Общее наблюдательное время распределяется между тремя видами научных программ:

1. Базовая (основная) программа проекта (Core Program).
2. Национальные программы стран-участниц проекта.
3. Открытая программа для международного сообщества (Open Program).

Направления исследований, включенные в базовую программу, перечислены в разделе 1. Базовая программа сформирована Научным комитетом проекта. Научный комитет включает исследователей из стран-участниц и внешних специалистов по УФ-исследованиям. Эта программа будет выполняться в течение первых двух лет работы обсерватории.

Национальные программы стран-участниц проекта будут формироваться национальными научными комитетами. Время в рамках этих программ распределяется пропорционально вкладу (в финансовом эквиваленте) этих стран в проект.

В практике организации современных проектов крупных многоцелевых обсерваторий (таких, как КТХ) некоторая доля времени (после выполнения основной программы) выделяется на выполнение заявок от представителей международного астрономического сообщества на основе открытого конкурса, независимо от того, является ли заявитель представителем страны-участницы проекта. В проекте «СПЕКТР-УФ» также предполагается такая возможность наблюдений в рамках открытой программы (Open Program).

Более подробно эти вопросы освещены в (*Malkov O. et al.*, 2011).

Текущая информация по проекту публикуется на официальном web-сайте по адресу: <http://wso.inasan.ru>.

заключение

Ультрафиолетовая астрономия – весьма важное и быстро прогрессирующее направление изучения Вселенной. Успешная работа на орбите таких обсерваторий, как *Cornicus*, *IUE*, российской обсерватории АСТРОН, космического телескопа им. Хаббла (HST), обсерваторий FUSE и GALEX убедительно подтвердили высокую значимость наблюдений в УФ для развития современной астрофизики. В некоторых направлениях исследований эти наблюдения являются определяющими.

К сожалению, в планах крупнейших космических агентств нет УФ-миссий следующего поколения на период вплоть до 2030 года. Впервые за почти полвека космических исследований астрономы столкнулись с проблемой доступа к УФ-диапазону. Крупный отечественный (с участием зарубежного партнера –

Испании) проект «СПЕКТР-УФ» является на период 2020–2030 гг. главной и единственной российской и международной перспективой иметь «широкое ультрафиолетовое окно» во Вселенной.

список литературы

Боярчук А.А., Мошнеев А.А. 30 лет первой отечественной астрофизической станции «АСТРОН» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 3-7.

Боярчук А.А., Шустов Б.М., Мошнеев А.А., Сачков М.Е. Проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 4. С. 64-73.

Гомес де Кастро А.И., Переа Абарка Б., Шугаров А.С., Саванов И.С. и др. Блок камер поля // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 81-85.

Жупанов В.Г., Федосеев В.Н., Гольшико Е.А., Мошнеев А.А. и др. Функциональное покрытие оптических элементов комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 92-96.

Казакевич Ю.В., Шустов Б.М., Сачков М., Малков О.Ю. и др. Наземный сегмент космической обсерватории «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 40-52.

Мошнеев А.А., Ильясов М.Ф., Зверев А.В., Рыков Е.В. и др. Особенности конструкции телескопа Т-170М // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 53-63.

Москаленко Е.И. Методы внеатмосферной астрономии. М.: Наука, 1984. 284 с.

Панчук В.Е., Юшкин М.В., Шустов Б.М. Ультрафиолетовая спектроскопия астрофизических объектов // Оптический журнал. 2006. 73. № 4. С. 49-59.

Саванов И.С., Шустов Б.М., Сачков М.Е., Шугаров А.С. и др. Блок спектрографов проекта «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 74-80.

Сачков М.Е. Ультрафиолетовые обсерватории будущего // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 16-20.

Сачков М.Е., Шустов Б.М., Мошнеев А.А., Власенко О.В. и др. Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 34-39.

Фундаментальные космические исследования. Т.1. Астрофизика / Под. общ. ред. д.т.н., проф. Г.Г. Райкунова. Королев, ФГУП ЦНИИмаш, 2013. 532 с.

Шейхет А.И., Корноухов В.С., Мошнеев А.А., Погондин А.В. Выбор начальных параметров рабочей орбиты космического аппарата «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 20-23.

Шугаров А.С., Саванов И.С., Кузин С.В. Приемники излучения в проекте «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 86-91.

Шустов Б.М., Сачков М.Е. Научные задачи проекта «СПЕКТР-УФ» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 8-15.

Яскович А.Л., Власенко О.В., Макаров В.П. Оптическая схема телескопа Т-170М комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 61-66.

Brosh N., Balabanov V., Behar E.S. Small observatories for the UV // *Astrophysics and Space Science*. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-1972-1.

Bruzual G., Charlot S. Stellar population synthesis at the resolution of 2003 // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2003. Vol. 344, Issue 4. P. 1000-1028.

Carruthers G.R. Rocket Observation of Interstellar Molecular Hydrogen // *Astrophysical Journal*. 1970. 161. P. L81-85.

Côté P. Wide-field UV imaging: Current capabilities and performance requirements for future missions // *Advances in Space Research*. 2014. 53, 6. P. 982-989.

Davé R. Simulations of the Intergalactic Medium // *Maps of the Cosmos*, Proc. IAU Symp. 2003. № 216. Eds. Matthew Colless M., Lister Staveley-Smith L., Stathakis R. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific. 2005. P. 251-265.

Gómez de Castro A.I., Appourchaux T., Barstow M. Building galaxies, stars, planets and the ingredients for life between the stars. The science behind the European Ultraviolet-Visible Observatory // *Astrophysics and Space Science*. 2014. Online First.

Heap S.R., Kruk J.W., Rigby J.R., Robberto M. Small Space Telescopes for Spectroscopic Surveys of $z > 1$ Galaxies // *American Astronomical Society. AAS Meeting*. 2003. 221. 147.27.

Hutchings J.B. The UVIT telescopes on the Astrosat observatory // *Astrophysics and Space Science*. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-1953-4.

Jenkins E.B., Meloy D.A. A survey with Copernicus of interstellar O VI absorption // *Astrophysical Journal*. 1974. 193. P. L121-L125.

Lahav O., Liddle A.R. The Cosmological Parameters // In: J. Beringer et al. (Particle Data Group), Review of Particle Properties. Phys. Rev. 2012, D86, 010001.

Lehner N., Howk J.C., Tripp T.M., Tumlinson J. et al. The bimodal metallicity distribution of the cool circumgalactic medium at $z \lesssim 1$ // *Astrophysical Journal*. 2013. 770. P. 138-145.

Malkov O., Sachkov M., Shustov B. et al. Scientific program construction principles and time allocation scheme for the World Space Observatory – Ultraviolet mission // *Astrophysics and Space Science*. 2014. 335. P. 323-327.

Neiner C., Petit P., Parès L. UVMag: a UV and optical spectropolarimeter for stellar physics // *Magnetic Fields throughout Stellar Evolution*, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium. 2014. Vol. 302. P. 348-349.

Nicastro F., Zezas A., Elvis M., Mathur S. et al. The far-ultraviolet signature of the 'missing' baryons in the Local Group of galaxies // *Nature*. 2003. 421. P. 719-721.

Pasquale B., Stahl P., Feinberg L., Howard J. et al. Comparative concepts for ATLAST optical designs // *Proceedings of the SPIE*. 2010. 7731, article id. 77312L. 10 p.

Raksataya T., Gomez de Castro A.I., Koechlin L., Rivet J.-P. A space Fresnel Imager for ultra-violet astrophysics: example on accretion disks // *Experimental Astronomy*. 2012. 30, issue 2-3. P. 183-194.

Rogerson J.B., York D.G. Interstellar Deuterium Abundance in the Direction of Beta Centauri // *Astrophysical Journal*. 1973. 186. P. L95-98.

Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I. Instrumentation of the WSO-UV project // *Proc. of the SPIE*. 2014. 9144. 9144-1.

Sachkov M., Shustov B., Savanov I., Gomez de Castro A.I. WSO-UV project for high-resolution spectroscopy and imaging // *Astronomische Nachrichten*. 2014. 335. P. 46-50.

Savage B.D., Kim T.S., Wakker B.P., Keeney B. et al. The properties of low redshift intergalactic O VI absorbers determined from high S/N observations of 14 QSOs with the Cosmic Origins Spectrograph // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. 2014. 212. № 1. DOI:10.1088/0067-0049/212/1/8.

Savage B.D., Sembach K.R., Wakker B.P., Richter P. et al. Distribution and Kinematics of O VI in the Galactic Halo // *Astrophysical Journal Supplement Series*. 2003. 146, issue 1. P. 125-164.

Scowen Paul A. The HORUS Observatory – A Next Generation 2.4m UV-Optical Mission To Study Planetary, Stellar And Galactic Formation // *American Astronomical Society, AAS Meeting*. 2013. 221. 439.04.

Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A.I. et al. World space observatory-ultraviolet among UV missions of the coming years // *Astrophys. Space Sci*. 2011. 335. P. 273-282.

Shustov B., Sachkov M., Gomez de Castro A.I., Huang M. et al. WSO-UV – ultraviolet mission for the next decade // *Astrophysics and Space Science*. 2009. 320. P. 187-190.

Spergel D.N. THEIA: Telescope for Habitable Exoplanets and Interstellar/Intergalactic Astronomy // *Bulletin of the American Astronomical Society*. 2010. 42. P. 291.

Tumlinson J., Thom C., Werk J.K. et al. The COS-halos survey: rationale, design, and a census of circumgalactic neutral hydrogen // *Astrophysical Journal*. 2013. 777. P. 59-92.

Ultraviolet Astrophysics Beyond the IUE Final Archive // ESA Publications Division, ESTEC, The Netherlands. 1998. 871 p.

UV Astronomy 2011. Eds. Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M.E. Dopita. Berlin: Springer, 2012. 331 p.

Статья поступила в редакцию 01.10.2014 г.

ПРОЕКТНАЯ КОНЦЕПЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СПЕКТР-УФ»

DESIGN CONCEPT OF «SPEKTR-UF» SPACECRAFT

А.А. Моисеев¹,
кандидат
технических наук,
moisheev@laspace.ru;
A.A. Moisheev

В.Е. Бабышкин¹,
babyshkin@laspace.ru;
V.E. Babyshkin

Б.Н. Мартынов¹,
112@laspace.ru;
B.N. Martynov

Е.В. Скрипун¹,
skrip@laspace.ru;
E.V. Skripunov

А.В. Иванов¹,
alexander.ivanov@
laspace.ru;
A.V. Ivanov

В статье рассматривается концепция создания КА «СПЕКТР-УФ», его состав и ожидаемые результаты проведения космических экспериментов.

Ключевые слова:
базовый модуль служебных систем;
Всемирная космическая обсерватория;
научные наблюдения; космические эксперименты.

ВВЕДЕНИЕ

Высокий уровень развития космической отрасли в прошлом веке обеспечил возможность создания космических аппаратов (КА) для проведения внеатмосферных астрономических наблюдений практически во всем диапазоне электромагнитного излучения – от инфракрасного до рентгеновского и гамма-излучения. При этом оптимальной принята концепция создания специализированных под конкретные задачи астрофизики КА – орбитальных обсерваторий, при которой за счёт концентрации исследовательских усилий в каждом случае на каком-либо определённом участке спектрального диапазона обеспечивается получение наиболее подробной и полной научной информации.

Именно в рамках этой концепции НПО им. С.А. Лавочкина были успешно реализованы в конце прошлого века такие проекты, как «АСТРОН» и «ГРАНАТ» (*Автоматические космические аппараты...*, 2010).

Также в рамках этой концепции в Федеральной космической программе до 2015 г. было предусмотрено создание целой серии КА «СПЕКТР» для астрофизических исследований в радио- («СПЕКТР-Р»), рентгеновском («СПЕКТР-РГ»), ультрафиолетовом («СПЕКТР-УФ») и гамма-диапазонах («ГАММА-400») электромагнитного излучения.

Главным исполнителем по созданию и разработке такой серии КА является ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Для реализации таких астрофизических исследований требовались разработка и создание различных телескопов больших габаритных размеров, при проектировании которых необходимо было учитывать

The article presents «SPEKTR-UF» SC design concept, its breakdown structure and the expected outcome of space experiments conducting.

Key words:
housekeeping systems base module;
the World Space Observatory;
scientific observations; space experiments.

возможности средств выведения головного обтекателя. Речь идёт о так называемой зоне размещения полезного груза, т.е. о пространстве под головным обтекателем, которое может использоваться для размещения КА. Важной ключевой задачей этих проектов стало проектирование универсальной служебной платформы, которая обеспечивала бы установку и размещение научной аппаратуры с наибольшими возможными габаритами. Такая задача требовала создания конструкции служебной платформы минимальной высоты. Проектирование КА в НПО им. С.А. Лавочкина происходило с учётом этих ограничений, а также с учётом возможности использования в дальнейшем этих проектных и конструкторских разработок для других проектов.

Таким образом, в НПО им. С.А. Лавочкина была создана универсальная служебная платформа – базовый модуль служебных систем (БМСС) «НАВИГАТОР» (рисунок 1), разработанный как унифицированный модуль для КА серии «СПЕКТР» и «ЭЛЕКТРО». Поэтому его конструктивно-силовая схема и служебные системы разработаны как базовые для широкого спектра космических аппаратов, предназначенных, в зависимости от целевой задачи, для функционирования на низких круговых, эллиптических, геосинхронных и геостационарных орбитах, в точках либрации и т.д.

Масса КА – не более 2840 кг, в том числе масса комплекса научной аппаратуры (КНА) составляет 1625,5 кг.

Высота корпуса базового модуля спроектирована минимально возможной и достаточной для установ-

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

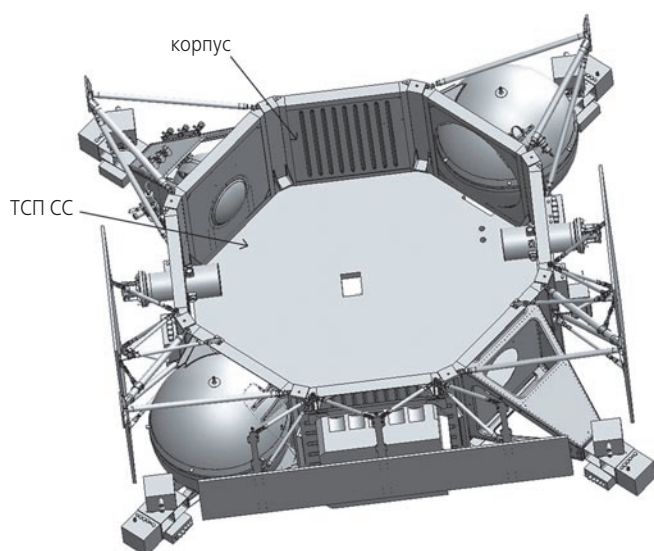


рисунок 1. Базовый модуль служебных систем «НАВИГАТОР»

ки всех необходимых агрегатов и приборов служебных систем. Вся аппаратура служебных систем устанавливается на единой тепловой сотопанели (ТСП), которая предназначена также для обеспечения и поддержания теплового режима установленных на неё приборов. ТСП располагается внутри корпуса базового модуля, что обеспечивает дополнительную радиационную и метеорную защиту. Ещё одной особенностью при проектировании базового модуля стало членение двигательной установки на четыре блока, каждый из которых включает в себя блок двигателей ориентации и стабилизации и топливный бак сферической формы.

БМСС «НАВИГАТОР» в рамках ОКР «СПЕКТР-Р» и «ЭЛЕКТРО» прошел все этапы наземной экспериментальной отработки, по результатам которой был допущен для изготовления летных изделий КА «СПЕКТР-Р» – международной орбитальной астрофизической обсерватории проекта «РАДИО-АСТРОН» и КА «ЭЛЕКТРО-Л» – геостационарного гидрометеорологического космического комплекса второго поколения. Оба КА были запущены в 2011 году и успешно выполняют свои задачи по настоящее время.

Одним из космических аппаратов для астрофизических исследований из серии «СПЕКТР» является КА «СПЕКТР-УФ».

Всемирная космическая обсерватория «СПЕКТР-УФ» – крупный международный космический проект («WSO-UV») – начал разрабатываться в 1990-е годы. Данная обсерватория предназначена для проведения фундаментальных астрофизических исследований в ультрафиолетовом и видимом диапазонах электромагнитного спектра с высоким угловым разрешением, а также для регистрации гамма-излучения в энергетическом диапазоне от 10 кэВ до 10 МэВ (*Автоматические космические аппараты...*, 2010).

Космический аппарат «СПЕКТР-УФ» предназначен для реализации программы научных исследований проекта в течение не менее пяти лет активного существования.

Космический аппарат «СПЕКТР-УФ», общий вид которого представлен на рисунках 2 и 3, спроектирован по модульному принципу и состоит из двух основных частей:

- модуля полезной нагрузки – КНА «СПЕКТР-УФ»;
- базового модуля служебных систем (БМСС) «НАВИГАТОР-УФ».

Такая конфигурация КА обеспечивает независимость создания и наземной отработки КНА «СПЕКТР-УФ» и БМСС «НАВИГАТОР-УФ» вплоть до этапа комплексных испытаний собранного КА.

Основными составляющими элементами КНА «СПЕКТР-УФ» являются:

- телескоп Т-170М;
- научная аппаратура «КОНУС-УФ»;
- комплекс основных научных приборов, в который входят:
 - блок спектрографов,
 - блок камер поля,
 - блок управления научными данными,
 - бортовой маршрутизатор БМ-4.

БМСС «НАВИГАТОР-УФ» предназначен для обеспечения функционирования КА на всех этапах его автономного полета.

Конструктивно БМСС «НАВИГАТОР-УФ», общий вид которого представлен на рисунке 4, представляет собой восьмигранный корпус, на боковых гранях ко-

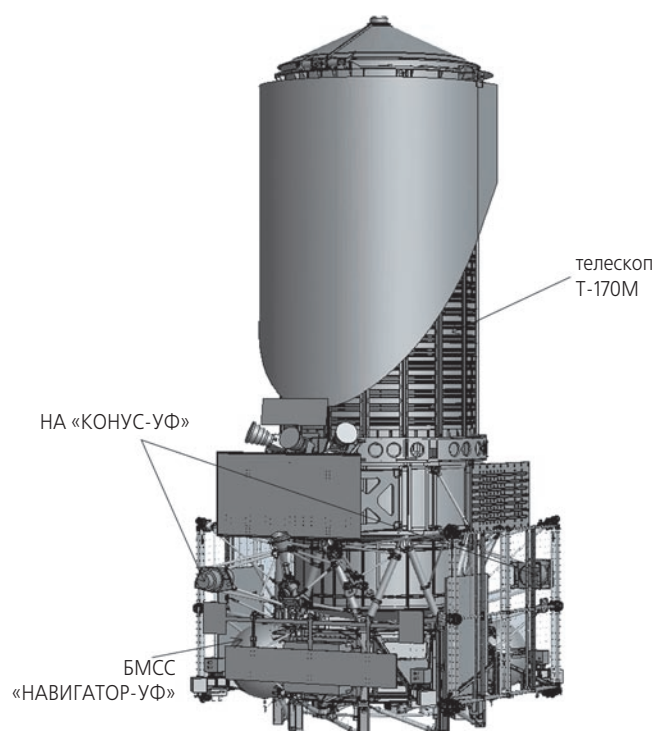
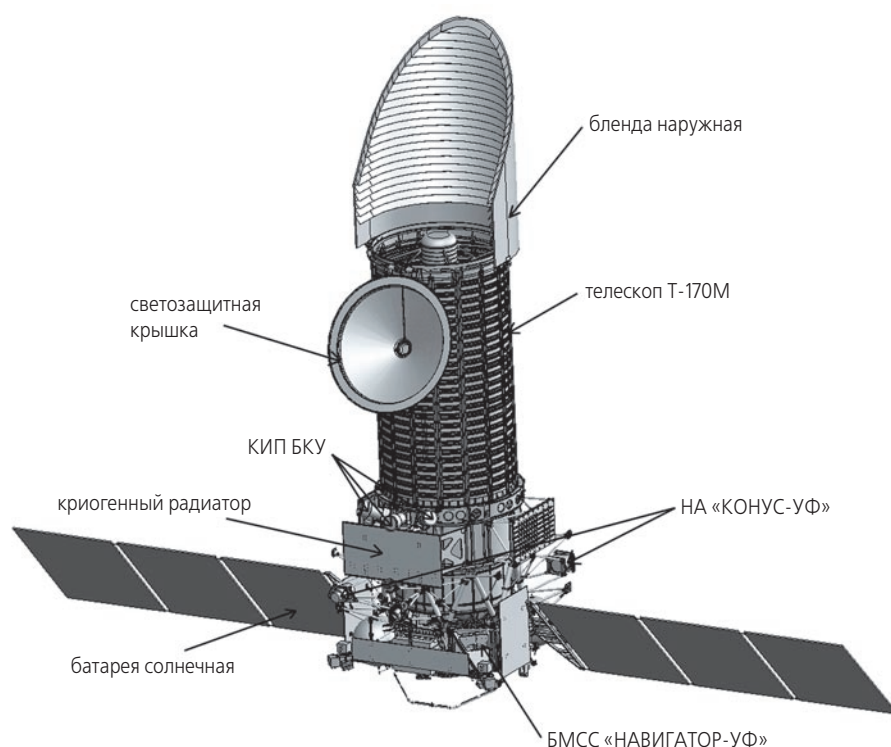


рисунок 2. Общий вид КА «СПЕКТР-УФ» в сложенном положении



рисунк 3. Общий вид КА «СПЕКТР-УФ» в рабочем положении

торого закреплены элементы двигательной установки, панели солнечных батарей с приводами поворота, радиаторы средств обеспечения теплового режима. К нижнему торцу корпуса крепится тепловая сотовая панель, на которой устанавливается практически вся аппаратура служебных систем базового модуля. На верхний торец корпуса устанавливается переходная ферма для крепления комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ», научной аппаратуры «КОНУС-УФ», установки малонаправленных, направленных рупорных антенн с электроприводами и зачеканки панелей солнечных батарей в сложенном транспортном положении.

БМСС включает в свой состав следующие служебные системы:

- бортовой комплекс управления;
- бортовой радиокомплекс;
- антенно-фидерную систему;
- систему ориентации солнечной батареи;
- телеметрическую систему;
- систему электроснабжения;
- систему контроля электризации;
- двигательную установку;
- привод направленной антенны;
- систему управления приводом направленной антенны;
- аппаратуру контроля дозовых и одиночных эффектов воздействия ионизирующего излучения космического пространства;
- блок подрыва пиропатронов;
- блоки коммутации нагревателей;
- бортовую кабельную сеть;
- средства обеспечения теплового режима.

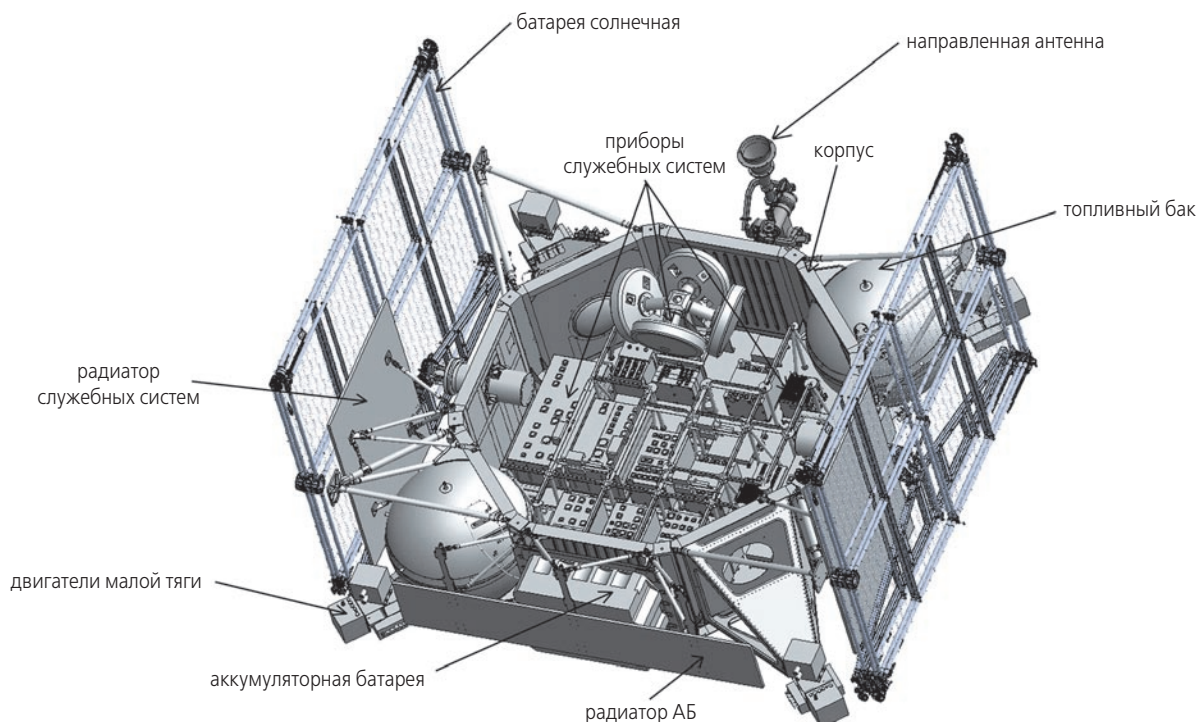
Все служебные системы спроектированы для работы в открытом космосе.

Отличительной особенностью компоновочного решения КА является расположение платформы с комплексом командно-измерительных приборов БКУ – звездных датчиков и гироскопического измерителя углового вектора скорости на корпусе телескопа Т-170М с целью минимизации погрешности измерений, вызванных деформациями конструкции КА различного происхождения.

БМСС «НАВИГАТОР-УФ» разрабатывается на базе БМСС «НАВИГАТОР-Р» и дорабатывается для обеспечения требований назначения КНА и КА «СПЕКТР-УФ» в части:

- повышения точности наведения продольной оси телескопа в заданную точку небесной сферы после проведения юстировок в полете до $1,5''$;
- снижения угловой скорости КА в режиме прецизионной стабилизации до уровня не более $0,036^\circ/\text{с}$;
- доведения амплитуды установившихся колебаний КА в режиме прецизионной стабилизации с использованием звездных датчиков КА до уровня не более $\pm 2,5''$;
- снижения вероятности ошибки на один информационный символ до уровня не более 10^{-8} при передаче научной информации.

Заданные параметры наведения и стабилизации, реализуемые БМСС, дали возможность создать вторичный контур наведения с использованием системы датчиков гида телескопа Т-170М для более точного наведения телескопа Т-170М на объект исследования и удержания его в этом направлении с заданной точностью в течение сеанса научного наблюдения. При



рисунки 4. Общий вид БМСС «НАВИГАТОР-УФ»

этом среднеквадратическая погрешность наведения оси телескопа Т-170М относительно заданной точки небесной сферы составляет не более 0,1" и среднеквадратическая погрешность стабилизационных отклонений от направления наведения на уровне 0,033".

Особенностью конструкции и технологии создания КА «СПЕКТР-УФ» является необходимость выполнения ряда специфических требований, обусловленных наличием на борту телескопа и уникальных научных приборов, работающих в УФ-спектре:

- защита оптических элементов от молекулярного и пылевого загрязнения;
- обеспечение прецизионности крупногабаритных конструкций: телескоп, блок камер поля, блок спектрографов;
- создание специализированной экспериментальной базы и уникальных методик по калибровке, юстировке и квалификации оптических систем телескопа и научных приборов.

Выполнение этих требований потребовало от НПО им. С.А. Лавочкина и от всей кооперации по созданию научных приборов доработки директивных техпроцессов, дооснащения технологического и испытательного оборудования и существенной модернизации рабочих мест.

При проведении космических экспериментов на КА «СПЕКТР-УФ» планируется получение уникальных научных результатов из конкретных направлений астрофизических исследований, среди которых можно назвать следующие:

- физика ранней Вселенной (исследование важно-го в истории Вселенной процесса реионизации);

- эволюционная взаимосвязь галактик и межгалактической среды (в частности, очень важный и весьма плохо изученный процесс обогащения межгалактической среды тяжелыми элементами);
- физика аккреционных процессов (аккреция – захват вещества некоторым гравитирующим центром, например, черной дырой или звездой);
- физика горячих звездных атмосфер;
- физика и химия планетных атмосфер и другие.

Также с помощью астрофизической обсерватории возможно обнаружение и раскрытие свойств темного барионного вещества во Вселенной, которое можно увидеть только с помощью УФ-инструментов (*Шустов Б.М., Сачков М.Е., 2013*).

Выведение КА должно быть осуществлено при помощи ракеты космического назначения «ПРОТОН-М» и разгонного блока 11С861-03.

Запуск КА «СПЕКТР-УФ» планируется в 2019–2020 гг.

список литературы

Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под общ. ред. д.т.н., проф. Г.М. Полищука и д.т.н., проф. К.М. Пичхадзе. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 600 с.

Шустов Б.М., Сачков М.Е. Научные задачи проекта «СПЕКТР-УФ» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 8-15.

Статья поступила в редакцию 23.09.2014 г.

ВЫБОР НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕЙ ОРБИТЫ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «СПЕКТР-УФ»

А.И. Шейхет¹,

кандидат технических наук,
член-корреспондент РАКЦ,
sheikhet@laspace.ru;

A.I. Sheikhet

В.С. Корноухов²,

vs.kornoukhov@physics.msu.ru;
V.S. Kornoukhov

SELECTION OF INITIAL PARAMETERS OF «SPEKTR-UF» SPACECRAFT OPERATIONAL ORBIT

А.А. Моисеев¹,

кандидат
технических наук,
moisheev@laspace.ru;

A.A. Moisheev

А.В. Погодин¹,

snorry@laspace.ru;
A.V. Pogodin

В статье представлены материалы по выбору начальных параметров рабочей орбиты космического аппарата (КА) для миссии «СПЕКТР-УФ», выведению на эту рабочую орбиту и условиям работы на ней; приведены основные баллистические характеристики рабочей орбиты. Предполагается, что в качестве носителя используется ракета космического назначения (РКН) «ПРОТОН-М», а в качестве разгонного блока (РБ) – «БЛОК ДМ».

Ключевые слова: рабочая орбита КА; эволюция параметров орбиты; схема выведения.

The article presents materials on selection of initial parameters of «SPEKTR-UF» Spacecraft (SC) operational orbit, injection into this operational orbit and its operational environment; main ballistic characteristics of the operational orbit are given. It is assumed that «PROTON-M» Space Rocket will be used as a launcher and «BLOCK DM» will be used as an upper stage.

Key words: SC operational orbit; evolution of orbit's parameters; injection profile.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания наиболее благоприятных условий для работы комплекса научной аппаратуры космического аппарата «СПЕКТР-УФ» его полет должен происходить вне радиационных поясов Земли на высотах не менее 35 тыс. км (Шустов Б.М., Сачков М.Е., 2013). При этом желательно, чтобы орбита КА была синхронной с вращением Земли, зоны видимости из двух наземных измерительных пунктов (НИП) – «Медвежьи Озера» и «Маспаломас» – были максимально возможны. Запуск КА планируется осуществить с космодрома Байконур.

Как показали проведенные расчеты, перечисленным условиям более всего соответствует ~24-часовая круговая орбита с высотой, равной высоте геостационарной орбиты, и наклоном, отвечающим требуемой выводимой массе, а также возможностям применяемой РКН.

Поскольку такая орбита дважды в сутки пересекает экваториальную область, в которой находятся геостационарные спутники (как в рабочем состоянии, так и уже вышедшие из строя), то, чтобы избежать возможных столкновений с ними, рабочая орбита КА «СПЕКТР-УФ» была выбрана с небольшим экс-

центриситетом (высота КА «СПЕКТР-УФ» при пересечении плоскости экватора отличается от высоты геостационарных спутников примерно на 500 км).

1. Основные баллистические характеристики рабочей орбиты

В качестве условной даты старта принята дата 21 ноября 2019 года, и все расчеты проводились применительно к этой дате.

1.1. Параметры рабочей орбиты

В соответствии с изложенными выше требованиями к рабочей орбите и схемам выведения были выбраны следующие начальные параметры рабочей орбиты КА «СПЕКТР-УФ», значения которых приведены в таблице.

Время старта РКН в заданную дату выбирается исходя из требований освещенности космической головной части (КГЧ) при выведении, временного интервала до первого захода в тень Земли и т.д.

С учетом эволюции восходящего узла такая орбита является синхронной с вращением Земли.

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki

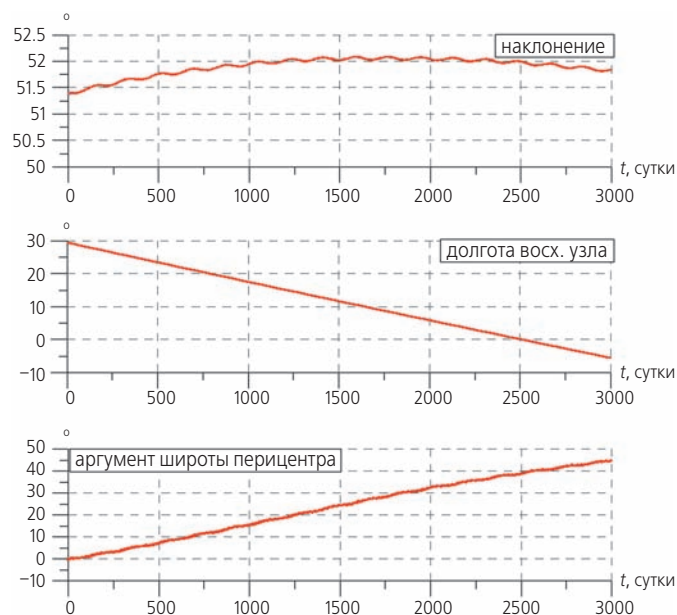
² ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

таблица – Начальные параметры рабочей орбиты КА «СПЕКТР-УФ»

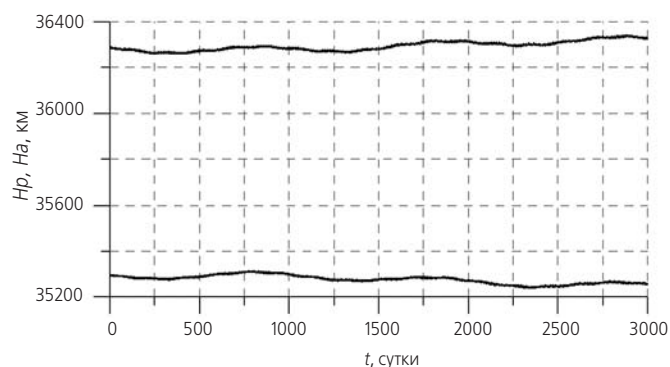
обозначение параметра	значение параметра
наклонение i , град	51.4
большая полуось a , км	42164
эксцентриситет e	0.01186
высота перицентра, км	35293
высота апоцентра, км	36293
долгота восходящего узла Ω^* , град	~ 50.0
драконический период обращения, с	86164
* долгота восходящего узла Ω приведена в системе координат WGS-84, связанной с вращающейся Землей.	

Под воздействием гравитационных возмущений от Солнца, Луны и нецентральности гравитационного поля Земли параметры рабочей орбиты КА претерпевают незначительные изменения. На рисунках 1 и 2 приведены графики изменения основных параметров рабочей орбиты для модельного варианта рабочей орбиты (см. таблицу, начальное значение аргумента широты перицентра принято равным 0°) на интервале 3000 суток с условной даты выхода на рабочую орбиту (21.11.2019).

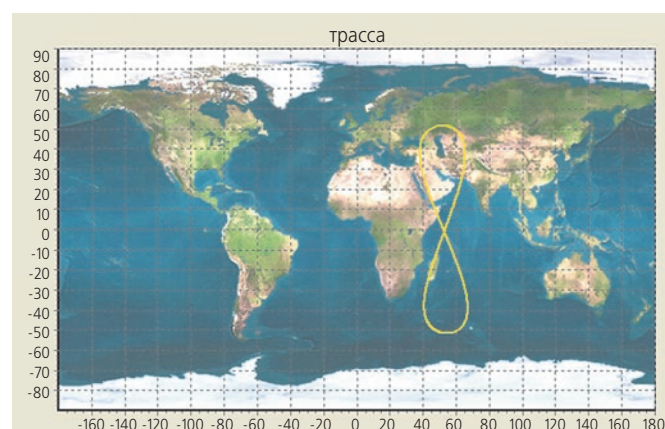
**рисунк 1.** Изменение параметров орбиты (наклонения, долготы восходящего узла, аргумента широты перицентра) во времени

1.2. Трасса КА

Трасса КА «СПЕКТР-УФ» на рабочей орбите представляет собой вертикально стоящую цифру 8 с центром, расположенным на экваторе на некоторой средней долготе $\lambda_{ср}$, с размахом по широте, равным наклонению рабочей орбиты ($\pm 51.4^\circ$), и отступлениями от средней долготы примерно на $\pm 15^\circ$.

**рисунк 2.** Изменение параметров орбиты (высоты перицентра и высоты апоцентра) во времени

На рисунке 3 приведен пример трассы подспутниковой точки на поверхности Земли.

**рисунк 3.** Пример трассы подспутниковой точки КА

Значение средней долготы $\lambda_{ср}$ зависит в основном от аргумента перигея переходной орбиты, связывающей опорную орбиту, формируемую РКН, с рабочей орбитой КА. По условиям наилучшей видимости КА с выбранных станций слежения желательно, чтобы значение этой долготы было по возможности ближе к долготе 50° в.д.

После выведения необходимо приведение трассы КА на заданную $\lambda_{ср}$.

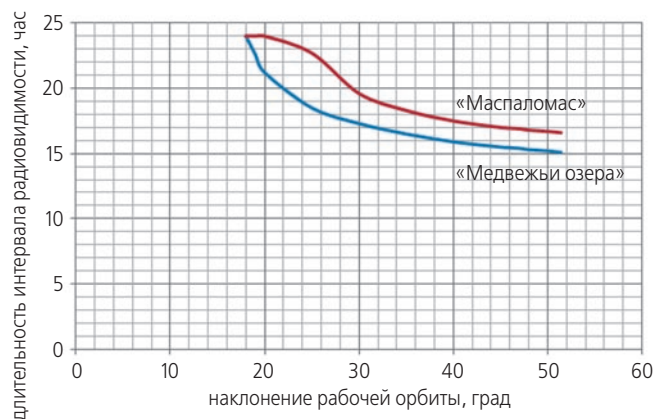
1.3. Условия радиосвязи

При заданной $\lambda_{ср}$ интервалы радиовидимости составят (при условии, что угол места КА с НИП будет не меньше 7 градусов) – с НИП «Медвежь Озера» и НИП «Маспаломас» 14–15 часов в сутки.

Для того чтобы связь с КА обеспечивалась круглосуточно, необходим еще один НИП, расположенный в Южном полушарии или в приэкваториальном районе.

На рисунке 4 показана зависимость длительности интервала радиовидимости КА с НИП «Медвежь Озера» и НИП «Маспаломас» от наклонения рабочей орбиты. Как видно из этого графика, с уменьшением

наклонения рабочей орбиты длительности интервалов радиовидимости возрастает и при значении наклонения орбиты, равном 20° , наступает круглосуточная радиовидимость КА с НИП «Маспаломас», а при значении наклонения орбиты, равном 18° , наступает круглосуточная радиовидимость КА также с НИП «Медвежий Озера».



рисунк 4. Зависимость длительности интервала радиовидимости КА с НИП «Медвежий Озера» и НИП «Маспаломас» от наклонения рабочей орбиты

С целью увеличения интервалов радиовидимости планируется провести дополнительные работы по оптимизации параметров рабочей орбиты, используя возможности средств выведения (РКН «ПРОТОН-М» и РБ «БЛОК ДМ»).

Дальность радиосвязи лежит в пределах 36–42 тыс. км, доплеровская скорость на рабочей орбите не превышает ± 400 м/с.

Следует отметить, что при увеличении угла места КА, для которого проводится расчет зон видимости, на 1° интервал видимости сокращается на 15 минут.

1.4. Теневые интервалы

В течение полета КА по рабочей орбите существуют интервалы (~ 30 суток), на которых КА заходит в тень Земли на каждом витке, причем максимальное время нахождения КА в тени составляет ~ 1.2 ч. Между этими интервалами существуют бестеневые участки длительностью ~ 140 суток (рисунок 5).

2. Схема выведения КА «СПЕКТР-УФ» на рабочую орбиту

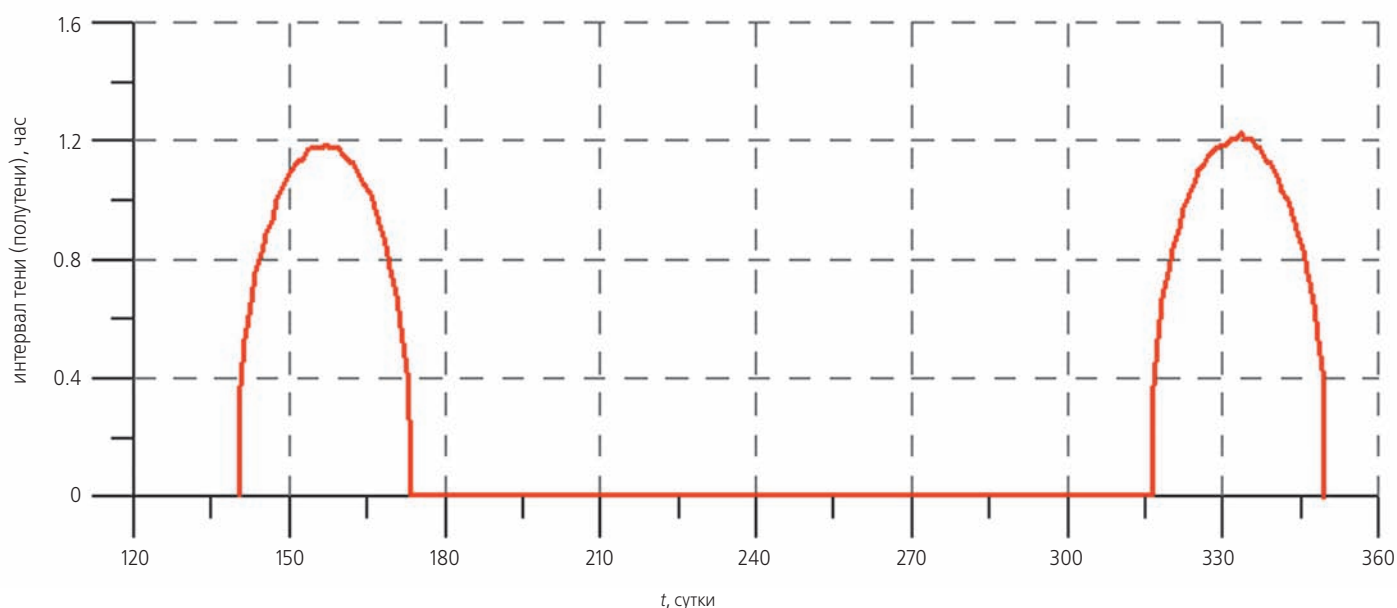
Космическая головная часть состоит из разгонного блока, переходной фермы и КА. РКН выводит КГЧ на опорную орбиту. Перевод КГЧ с опорной орбиты на рабочую осуществляется РБ.

РБ выводит КГЧ на рабочую орбиту КА «СПЕКТР-УФ» с высотами перигея и апогея 35290 км и 36290 км соответственно. Выведение осуществляется по стандартной схеме выведения на геосинхронную орбиту без изменения наклонения. Длительность выведения составляет (в зависимости от принятой схемы) 9.3 ч (для схемы с пятью включениями двигательной установки (ДУ) или 6.9 ч (для схемы с четырьмя включениями ДУ).

3. Точность выведения КА на рабочую орбиту

Точность выведения на рабочую орбиту обусловлена принятой схемой полета и определяется погрешностями при работе систем управления (СУ) РКН и РБ.

По предварительным данным, ошибки формирования опорной орбиты не превысят (по уровню 3σ) следующих значений:



рисунк 5. Теневые интервалы (включая зоны полутени) в течение года для модельной рабочей орбиты

- по периоду обращения ± 4 с;
- по высоте точки выведения ± 0.5 км;
- по высоте антиподной точки ± 4 км;
- по наклонению ± 2 угл. мин;
- по долготе восходящего узла ± 3 угл. мин.

Предполагается, что при выведении СУ РБ будет решать собственную навигационную задачу и вносить соответствующие коррективы в параметры всех включений. В результате погрешности выведения КА на рабочую орбиту, по предварительной оценке, могут достигать следующих значений (по уровню 3σ):

- по наклонению ± 7 угл. мин;
- по долготе восходящего узла ± 11 угл. мин;
- по большой полуоси ± 130 км;
- по эксцентриситету ± 0.0025 ;
- по периоду обращения ± 400 с.

Для исправления погрешности выведения в периоде рабочей орбиты КА потребуется провести одну-две коррекции с суммарной величиной импульса порядка 6 м/с.

Для обеспечения длительной видимости КА с НИП'ов необходимо поддерживать долготу восходящего узла орбиты в гринвичской системе координат $\Omega_{гр}$ в диапазоне от 20° западной долготы до 55° восточной долготы. В процессе полета для обеспечения требуемых интервалов видимости КА из НИП'ов потребуется периодическое проведение небольших коррекций периода рабочей орбиты (предварительный интервал периодичности проведения коррекций оценивается как шесть-восемь месяцев) с суммарным импульсом за год порядка 3 м/с.

Для обеспечения проведения коррекции параметров рабочей орбиты КА в течение пяти лет потребуется суммарный запас топлива, соответствующий приращению характеристической скорости порядка 21 м/с.

4. Области небесной сферы, доступные для проведения научных исследований

Проведенные расчеты по возможному обзору небесной сферы с учетом перечисленных ограничений на выбранную условную дату старта показали, что в течение года процент обзора небесной сферы составляет около 90% на витке. Возможным для наблюдения считался источник с длительностью не меньше 1 часа на витке. Результаты представлены на рисунке 6. Невозможность наблюдения $\sim 10\%$ небесной сферы связана с ограничением по Солнцу. Остальные ограничения сказываются на уменьшении длительности наблюдения источника на витке.

В течение года за счет изменения положения Солнца появляется возможность проводить научные наблюдения на всей небесной сфере.

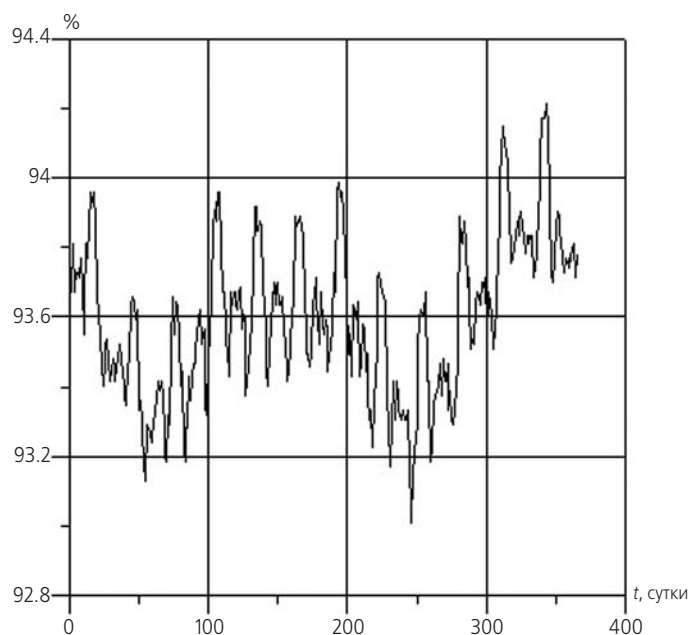


рисунок 6. Процент обзора небесной сферы по виткам в течение года. По оси абсцисс — время в сутках, по оси ординат — процент обзора

заключение

В статье приведены предварительные баллистические характеристики рабочей орбиты КА «СПЕКТР-УФ», рассмотрена схема выведения на рабочую орбиту КА заданной массы с помощью РКН «ПРОТОН-М» и РБ «БЛОК ДМ».

Показана необходимость проведения коррекций рабочей орбиты КА для исправления ошибок выведения и парирования действия других возмущающих факторов. Суммарный запас топлива, необходимый для коррекции параметров рабочей орбиты в течение пяти лет, соответствует приращению характеристической скорости порядка 21 м/с.

90% областей небесной сферы доступны для проведения научных исследований на витке с длительностью не менее 1 часа.

Энергетические возможности РКН «ПРОТОН-М» и РБ «БЛОК ДМ» позволяют уменьшить номинальное наклонение рабочей орбиты. Это позволит увеличить зоны видимости КА из НИП'в. Предварительные расчеты показали, что при уменьшении наклонения рабочей орбиты до 18° видимость КА из НИП'в «Медвежьих озер» и «Маспаломас» становится круглосуточной и, следовательно, отпадает необходимость привлекать дополнительные НИП'ы.

список литературы

Шустов Б.М., Сачков М.Е. Научные задачи проекта «СПЕКТР-УФ» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 8-15.

Статья поступила в редакцию 17.09.2014 г.

ОРГАНИЗАЦИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БОРТОВЫХ СИСТЕМ КА «СПЕКТР-УФ»

И.П. Губанов¹,
igor53@laspace.ru;
I.P. Gubanov

М.И. Артюхов¹,
artyukh@laspace.ru;
M.I. Artyukhov

В.А. Молодцов¹,
molodtsov@laspace.ru;
V.A. Molodtsov

Статья посвящена описанию схемы взаимодействия бортовых систем КА «СПЕКТР-УФ» и принципов управления бортовыми системами во взаимодействии и в обеспечение функционирования комплекса научной аппаратуры телескопа T-170M.

Ключевые слова: космический аппарат; бортовые системы; командно-программная информация (КПИ); телеметрическая информация (ТМИ); полетное задание (ПЗ); программа полета; комплекс научной аппаратуры (КНА).

1. Состав и функции бортовых систем КА «СПЕКТР-УФ»

Космический аппарат «СПЕКТР-УФ» содержит в своем составе следующие модули:

- базовый служебный модуль «НАВИГАТОР»;
- комплекс научной аппаратуры.

В составе базового модуля «НАВИГАТОР» функционируют следующие бортовые системы:

- бортовой радиокомплекс (БРК);
- телеметрическая система (ТМС);
- бортовой комплекс управления (БКУ);
- двигательная установка (ДУ);
- система ориентации солнечных батарей (СОСБ);
- средства обеспечения теплового режима (СОТР);
- антенно-фидерная система (АФС);
- система электроснабжения;
- система контроля электризации.

Апробация базового модуля «НАВИГАТОР» успешно осуществлена в проектах «ЭЛЕКТРО-Л» и «СПЕКТР-Р».

С учётом задействования иностранных станций слежения в управлении КА «СПЕКТР-УФ» предполагается работа в международном X-диапазоне частот, с применением структуры КПИ и ТМИ в соответствии с рекомендацией международного консультативного комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS).

MANAGEMENT OF «SPEKTR-UF» SC ONBOARD SYSTEMS' OPERATING

The article deals with description of «SPEKTR-UF» SC onboard systems interaction arrangement and philosophy of the onboard systems control at interaction and support of T-170M telescope scientific instrumentation complex operating.

Key words: spacecraft; onboard systems; command-programming data (CPD); telemetry data (TMD); mission assignment (MA); flight program; scientific instrumentation complex (SIC).

Новым по сравнению с БРК (БАКИС) КА «СПЕКТР-Р» и «ЭЛЕКТРО-Л» является использование единого радиоканала в БРК для передачи на Землю служебной телеметрической и научной информации.

Радиолиния связи Земля – КА работает в X-диапазоне (7.190–7.235 ГГц) для передачи на борт командно-программной информации и запросных дальномерных сигналов.

Радиолиния связи КА – Земля работает также в X-диапазоне (8.450–8.500 ГГц) для передачи телеметрической и научной информации, а также ответных дальномерных сигналов.

Логика функционирования космического аппарата «СПЕКТР-УФ» строится по принципу максимальной автономности с преимущественно программным управлением, т.е. формирование программы управления бортовыми системами КА и ее реализация осуществляются бортовым комплексом управления, а также по радиокомандам с наземной станцией управления (Микрин Е.А., 2003).

Вычислительная машина БКУ – БВУ должна бесперебойно работать при отказе любого одного из каналов БВУ, обеспечивая работу бортовых систем по штатным алгоритмам. Сосредоточение всех потоков информации в бортовом вычислительном комплексе

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

КА позволяет строить управление бортовыми системами как на основании командно-программной информации, переданной с Земли и заложенной в память БВУ, так и на основании контрольной информации, получаемой от других систем, по алгоритмам бортового процессора.

Радиосвязь КА с Землей по приему обеспечивается постоянно в сфере через малонаправленные антенны (МНА), каждая на свой приемник. Передача на Землю обеспечивается через две МНА с диаграммой направленности в виде полусферы и две направленные (рупорные) антенны на приводах. Подключение МНА или рупорных антенн производится по командам БКУ или командам с Земли в зависимости от необходимой скорости ТМИ (1–32 Кбод для служебных целей или 1–4 Мбод для научной информации) и задействованной наземной антенны (ТНА-57 или ТНА-1500).

Выбор требуемой передающей МНА и наведение рупорных антенн осуществляется по результатам автоматического расчета в БВУ БКУ направления на заданный наземный пункт для текущего участка орбиты.

Передача научной информации на Землю производится с использованием рупорных антенн, точное наведение которых на Землю осуществляется с помощью привода в сеансе связи при трехосной ориентации КА. Научная информация передается или в режиме непосредственной передачи (НП) в ходе научного наблюдения, проводимого под контролем Земли, или путем воспроизведения информации (режим ВП), записанной в сеансе наблюдения, проведенного в автономном режиме.

Контроль передачи разовых команд и командно-программной информации НКУ осуществляется по ТМ-информации, принимаемой на Земле.

Предназначенные к передаче КПИ делятся на части, именуемые «кадрами пользователя», с объемом 56 байт.

На передающей стороне информационные блоки преобразуются в кодовые блоки путем кодирования модифицированным кодом БЧХ, способным исправлять одну и обнаруживать две ошибки на блок. В процессе кодирования каждый информационный блок дополняется семью проверочными битами кода БЧХ и одним проверочным битом синхронизации блока, содержащим всегда символ «0» (плюс 1 байт).

В состав БРК входят:

- два приемопередающих устройства (ППУ № 1 и ППУ № 2);
- дублированный блок командно-телеметрический – прибор БКТ;
- дублированное командно-распределительное устройство – КРУ;
- дублированное программно-временное устройство – ПВУ.

Входящий в состав БРК блок командно-телеметрический (БКТ) предназначен для приема и обработки «кадров пользователя», поступающих в составе КПИ с Земли, для направления их по назначению (в БРК или БКУ), организации обмена с БКУ в части передачи в БВУ массивов КПИ, обработки и регенерации запросного сигнала дальнометрии, приема потоков информации из ТМС и КНА, формирования единого информационного потока, его кодирования и передачи на передающее устройство.

Командно-распределительное устройство БРК предназначено для приема из БКТ кадров КПИ с признаком БРК, их декодирования и выдачи в виде импульсных сигналов для включения/выключения приборов БРК, а также во внешние системы.

Программно-временное устройство представляет собой сторожевой таймер, обеспечивающий по истечении 1–2 суток без связи с НКУ изменения конфигурации приборов БРК.

К радиокомандам, т.е. к командам, исполняемым непосредственно в БРК, относятся управляющие кодовые слова (УКС) и функциональные команды (ФК). По УКС БКТ задает режимы работы БРК и отдельных приборов БРК. ФК после дешифрации в КРУ преобразуются в позиционные импульсные исполнительные сигналы, которые поступают для включения/выключения приборов БРК или в смежные системы на исполнение.

Всего БРК принимает и выдает 112 ФК и УКС, в том числе 40 ФК в смежные системы.

На начальном участке полета работа БКУ и выдача из БКУ управляющих команд определяются циклограммой сеанса № 1. В дальнейшем, в сеансах связи КА с наземной станцией управления, в БВУ БКУ передается командно-программная информация (КПИ) двух видов:

- кодовые команды;
- КПИ с массивами данных для БКУ.

КПИ с массивами данных для БКУ – это полетное задание (ПЗ) для системы управления движением, управления приводами антенн, управления телеметрией, научным комплексом, массивы изменения программ и формулярные данные.

Кодовыми командами в БКУ передается информация трех видов:

- коды релейных команд управления смежными системами (РКУ);
- кодовая информация для смежных систем (КИ СС);
- кодовая информация для БКУ (КИ БКУ).

РКУ, КИ СС и КИ БКУ могут формироваться БВУ БКУ автономно:

- по бортовым алгоритмам диагностики параметров оперативного контроля и отработки выхода из нештатной ситуации;

- по результатам выполнения отдельных операций в системе стабилизации и ориентации;
- в результате отработки информации полетного задания;
- по результатам обработки информации рабочей программы, определяющей работу комплекса научной аппаратуры;
- по результатам вычислений, проведенных бортовой вычислительной системой БВУ БКУ в соответствии с заданными алгоритмами.

Управление непосредственно по радиокомандам (ФК и УКС) и кодовым командам (КК) ведется штатно только в сеансах связи или дежурном режиме непосредственно перед сеансом связи. В нештатной ситуации при возникновении острой необходимости команды могут быть выданы в любое время при наличии зоны радиовидимости КА с наземной станции управления. Автономное управление по командам БКУ осуществляется в течение всего времени полета в соответствии с бортовыми алгоритмами и заложенными программами.

БКУ через пять блоков управления (БУ) обеспечивает взаимодействие со следующими системами:

- бортовым радиокомплексом (БРК);
- телеметрической системой (ТМС);
- антенно-фидерной системой БРК (АФС);
- системой электроснабжения (СЭС);
- системой обеспечения теплового режима (СОТР);
- пиротехникой для расчеховки элементов конструкции КА;
- комплексом научной аппаратуры;
- двигательной установкой.

По командам БКУ осуществляется:

- управление приводами солнечных батарей (СОСБ);
- управление приводами направленных антенн в процессе наведения рупорных антенн на наземную станцию слежения, при сохранении наведения на нее во время реализации программы наблюдений, при выполнении технологических операций;
- управление пиротехническими средствами расчеховки и раскрытия всех элементов конструкции;
- управление нагревательными элементами системы СОТР;
- управление приборами системы стабилизации и ориентации, входящей в БКУ.

БРК передает в БКУ принятую с Земли командно-программную информацию по мультиплексному каналу (МПИ ГОСТ 62070-2003). Для этого в составе БРК имеется адаптер мультиплексного канала (устройство обмена). По этому же каналу от БКУ в

БРК поступают команды управления, сформированные по результатам ТМ-измерений параметров БРК.

Аппаратура БРК работает в дежурном и в сеансном режимах.

В дежурном режиме постоянно работают два приемных устройства, каждое в своей полусфере.

В сеансном режиме в дополнение к постоянно работающим двум приемным устройствам по команде включается передающее устройство.

Для подключения к антеннам каждое ППУ имеет один вход приемного канала, который подключен постоянно к одной из двух приёмных антенн. Передающий канал БРК подключается к одной передающей антенне с помощью антенного переключателя. Вход приемного канала подключается внутри ППУ к тому приемному каналу, на который подано питание.

Использование двух ППУ определяет и наличие двух выходов БРК для матриц разовых команд и для цифровой КПИ, причем одновременно могут использоваться сразу два выхода.

Для приема информации на КА «СПЕКТР-УФ» устанавливаются две малонаправленные антенны с шириной диаграммы 180 градусов каждая, охватывающие всю сферу.

Передача информации на наземную станцию осуществляется в зависимости от скорости передачи информации либо через одну из двух МНА, либо через одну из двух направленных антенн.

От ТМС на БРК поступает последовательный код ТМИ, который в БКТ преобразуется в сверточный код или турбокод и подается на модулятор передающего устройства. При работе в режиме измерения дальности в последовательный код ТМИ, на определенных заранее местах, врезаются посылки ответного дальномерного сигнала

От комплекса научной аппаратуры в БРК поступает последовательный код научной информации (НИ) в сопровождении частоты (2 Гц). Передача НИ совмещается с передачей служебной ТМ-информации.

Служебная ТМИ может передаваться со скоростью 32, 8, 1 Кбод.

Бортовой радиокомплекс допускает совмещение следующих режимов работы:

- прием КПИ и передача ТМИ и (или) НИ;
- прием КПИ, передача ТМИ и (или) НИ и измерения радиальной скорости;
- измерения дальности и радиальной скорости.

На КА «СПЕКТР-УФ» дополнительно к основному режиму ориентации КА – ИНО вводится режим ИНО-2: стабилизация КА в неподвижной относительно инерциального пространства системе координат с использованием сигнала с датчиков Гида из состава научной аппаратуры.

2. Комплекс научной аппаратуры

Комплекс научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» предназначен для исследования астрономических объектов в УФ-диапазоне спектра $\lambda=0.11\text{--}0.35$ мкм с борта КА «СПЕКТР-УФ».

КНА «СПЕКТР-УФ» включает в свой состав:

- телескоп Т-170М;
- научную аппаратуру сбора, регистрации и анализа УФ-излучения;
- служебный комплекс обеспечения автоматики, пиротехники, температурного режима и точного гидирования.

В состав служебного комплекса телескопа Т-170М входят следующие системы:

- модуль вторичного зеркала (МВЗ);
- модуль главного зеркала (МГЗ);
- система обеспечения температурного режима (СОТР);
- система датчиков гидов фокальной плоскости;
- блок управления приводами бленды наружной и светозащитной крышки телескопа Т-170М;
- пиротехнические устройства;
- датчики положения;
- система обеспечения чистоты внутренней полости телескопа Т-170М.

Каждая служебная система телескопа связана с блоком управления служебным комплексом (БУСК), который обеспечивает управление приборами служебного комплекса (СК) телескопа Т-170М, сбор, обработку, хранение и передачу ТМ-информации.

БУСК обеспечивает:

- получение цифровых команд, кода бортового времени (КБВ) и РКУ от БКУ КА;
- управление пиротехническими устройствами Т-170М;
- управление режимами работы приборов служебного комплекса Т-170М по заданной циклограмме или в режиме трансляции команд;
- выдачу информации о параметрах СДГФП в БКУ;
- получение от приборов СК Т-170М информации об их работе (значение температур системы СОТР, о юстировке, о форме главного зеркала и т.д.); ее хранение, формирование информационного кадра и передачу по МКО в БКУ и затем в ТМС;
- получение от приборов СК Т-170М технологической информации об их состоянии; ее хранение, формирование технологического информационного кадра КИМ, 2Гтакт и передачу в БРК.

Управление режимами работы служебного комплекса осуществляется путем выдачи команд, согласно циклограмме, которая загружается заранее по

МКО от БКУ и хранится в ОЗУ и ПЗУ БУСК. БУСК может получать релейные команды управления от БКУ с Земли или по программам БКУ.

Каждый научный прибор связан с БУНД, который обеспечивает управление приборами научной аппаратуры, сбор, обработку, хранение и передачу ТМ-информации.

БУНД обеспечивает:

- получение цифровых команд, кода бортового времени (КБВ) и РКУ от БВК БКУ;
- управление режимами работы приборов НА по заданной циклограмме, заложенной в ОЗУ БНК заранее по МКО от БКУ или в режиме трансляции команд с Земли;
- получение от приборов НА служебной телеметрической информации об их работоспособности, ее хранение, формирование информационного кадра и выдачу его по МКО в БВК для последующей передачи в ТМС;
- получение от приборов НА научной информации, ее хранение, формирование информационного кадра в виде массива цифровой информации (МЦИ) и непосредственную передачу данных (КИМ+2Гтакт) на подмодулятор БРК (Боярчук А.А. и др., 2012).

БУНД и БУСК связаны с бортовым комплексом управления (БКУ) КА с помощью блока управления (БУ9), являющегося абонентом на шине MIL-STD-1553. Контроллером на этой шине выступает бортовое вычислительное устройство (БВУ БКУ).

БУНД и БУСК в части управления НА и служебными системами научного комплекса могут реализовывать дублирующие друг друга функции, что повышает надежность управления комплексом научной аппаратуры КА «СПЕКТР-УФ».

Научная информация в режиме НП или ВП передается на Землю со скоростью 1–4 Мбит/с.

3. Взаимодействие бортовых систем КА «СПЕКТР-УФ»

БКУ выполняет централизованное управление смежными системами (СС), обеспечивающее функционирование КА в автономном режиме и в сеансах связи с наземным комплексом управления (НКУ). Помимо штатного управления СС от БКУ, предусматривается возможность использования радиокоманд непосредственного исполнения.

В части взаимодействия с СС и управления их работой БКУ должен обеспечивать:

- выдачу РКУ и ЦКУ на основе обработки КПИ, принимаемой от НКУ, а также в соответствии с алгоритмами управления СС;

- выдачу в ТМС массивов цифровой информации («Отчет КА»), содержащих:
 - ТМИ БКУ,
 - ТМИ, получаемую БКУ от ТМС по соответствующему запросу,
 - ТМИ СС, формируемую БКУ;
- контроль и диагностику отдельных смежных систем по сигналам оперативного контроля.

Управление СС на основе цифрового обмена БКУ с БРК, ТМС, СДГ, БУНД, БУСК осуществляется с использованием МПИ по ГОСТ Р52070-2003.

В части диагностики СС БКУ обеспечивает:

- поддержание необходимого температурного режима;
- переключение на резервные приборы или комплекты;
- выполнение специальных программ по изменению конфигурации и режимов работы при достижении критических параметров;
- определение ряда нештатных ситуаций и запуск аварийных программ для выхода из них, в том числе в части КНА.

Информационно-логическая схема КА «СПЕКТР-УФ» приведена на рисунке.

4. Типовые участки функционирования КА «СПЕКТР-УФ»

Программа работы КА «СПЕКТР-УФ» представляет собой последовательность типовых участков полета, а именно:

- участок управления;
- дежурный участок;
- технологический участок;
- участок наблюдения.

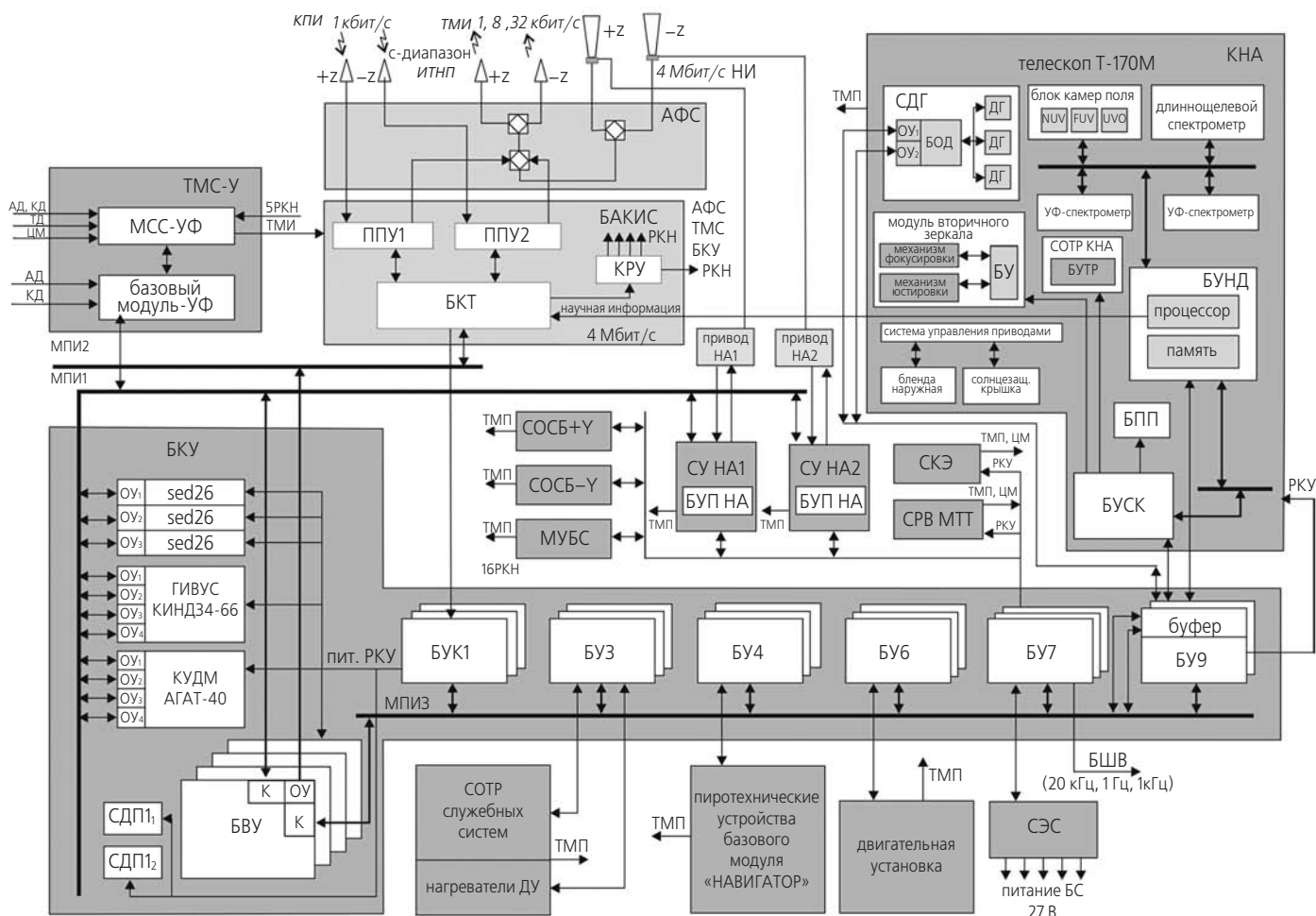
На данных участках могут выполняться следующие основные задачи.

Участок управления:

- НП ТМ, контроль функционирования БС;
- ввод КПИ (ПЗ и иная КПИ);
- измерение текущих навигационных параметров (ИТНП);
- ВП служебного ЗУ;
- ВП ЗУ КНА;
- разгрузка двигателей маховиков (ДМ).

Дежурный участок:

- поддержание текущего состояния КА (состояния, достигнутого на момент окончания действия очередного полетного задания).



рисунк. Информационно-логическая схема КА «СПЕКТР-УФ»

Технологический участок:

- переориентация КА;
- установка режима КНА;
- установка режима БС КА.

Участок наблюдения:

- непрерывное наблюдение источника с передачей научной информации на Землю или записью на ЗУ;
- настройка (смена) режима работы КНА;
- подправка ориентации КА.

Задачи участка управления и участка наблюдения выполняются путем проведения типовых сеансов связи. В соответствии с программой работы на всех этапах полета можно выделить следующие типовые сеансы:

- сеанс включения бортовых систем КА после выведения на орбиту;
- сеанс радиосвязи с Землей;
- сеанс коррекции орбиты;
- наблюдательный сеанс.

Программы сеансов запускаются по команде прямого или отложенного действия либо при отработке полетного задания. Программы первого сеанса и сеанса радиосвязи предполагают связь с Землей.

Сеанс коррекции и наблюдательный сеанс могут проводиться в автономном режиме функционирования КА.

Задачи технологического участка на начальном этапе полета будут осуществляться под контролем Земли, и поэтому будут требовать проведения сеанса радиосвязи. На последующих этапах полета задачи технологического участка будут отрабатываться в автономном режиме полета КА в ходе отработки полетного задания.

5. Организация командно-программного обеспечения управления КА «СПЕКТР-УФ»

5.1. Организация работы бортового программного обеспечения

Основой выполнения целевой задачи космическим аппаратом является смена режима ориентации и управление смежными системами по типовым программам. Функции диспетчера управления верхнего уровня поэтому выполняет система управления движением – СУД.

СУД функционирует во взаимодействии со следующими основными системами БКУ:

- система стабилизации и ориентации КА (ССО);
- система информационного обеспечения (СИО);
- система управления бортовыми системами (СУБС);

- система обеспечения вычислительного процесса (СОВП).

СУД может функционировать в одном из следующих режимов работы.

Управление на начальном участке. Режим предназначен для реализации циклограммы первого (по срабатыванию контактов отделения (КО)) или повторного включения борта (по нештатной ситуации (НШС) или по кодовой команде (КК)) с последовательным выполнением динамических операций (демпфирование угловых скоростей, построение солнечной ориентации) и операций управления смежными системами.

Выполнение динамических операций реализуется путем последовательного выполнения СУД соответствующих режимов управления движением во взаимодействии с ССО и СИО.

Управление бортовыми системами осуществляется путем отработки СУД циклограммы первого включения с последовательным запуском алгоритмов управления БС, реализуемыми СУБС.

Автономное управление. Режим включается по завершении режима управления на начальном участке, по завершении отработки полетного задания, по прекращении отработки полетного задания, по кодовой команде.

Режим предназначен для поддержания инерциальной ориентации КА с АКР.

На фоне автономного режима функционирования СУД осуществляется управление бортовыми системами от СУБС по прошитой логике, возможна отработка ПЗ ТМС, ПЗ КНА (СУБС) и рабочей программы (РП) управления КНА, заложенной в КНА (БУНД и БУСК).

Управление по ПЗ СУД. Режим включается по времени, заданном в ПЗ, и может быть зациклен.

Данный режим работы СУД предназначен для выполнения основных полетных операций КА в режимах управления движением – инерциальная ориентация (ИНО) и выдача корректирующего импульса (ВКИ) и обеспечивает:

- проведение типовых сеансов, требующих смены (настройки) режима управления движением (сеанс наблюдения, коррекции орбиты);
- проведение динамических операций (переориентация, разгрузка ДМ, астрокоррекции и т.д.).

В соответствии с ПЗ СУД во взаимодействии с ССО выполняет заданную последовательность режимов управления движением, задействуя для их реализации требуемые динамические типовые полетные операции (стабилизация текущей ориентации, торможение, одноосное нацеливание, ориентация в различных модификациях и т.д.).

На фоне данного режима функционирования СУД также осуществляется управление бортовыми системами от СУБС по прошитой логике, отрабатывается ПЗ ТМС (модулями СУБС) и рабочая программа (РП) управления КНА, заложенная в КНА.

Управление в НШС. Режим включается по признаку НШС, формируемому системами БКУ в нештатной ситуации, непарируемой алгоритмами данной системы и требующей прекращения отработки всех ПЗ, и перевода КА в режим сохранения.

В случае возникновения нештатной ситуации СУД, как диспетчер верхнего уровня, прерывает отработку ПЗ. Парирование нештатной ситуации и приведение систем в безопасный режим осуществляется ПО управления соответствующих систем (СУБС) в соответствии с признаком, формируемым диспетчером, или признаком из системы, в которой произошла нештатная ситуация.

Таким образом, реализация программы полета на определенных интервалах времени осуществляется с помощью полетных заданий, которые определяют время, порядок и режимы задействования соответствующих бортовых систем: ПЗ СУД, ПЗ ТМС, ПЗ ЦА, РП.

СУД, как диспетчер высшего уровня, в ходе работы выставляет признаки, используемые СУБС – (отработка ПЗ ТМС, ПЗ КНА и работа алгоритмов управления БС) и КНА (БУНД, БУСК) – (отработка РП) для синхронизации управляющих процессов.

Типовые сеансы связи реализуются как типовые последовательности режимов управления движением и режимов работы СС и КНА, задаваемые через ПЗ и РП соответственно. (Дополнительным средством управления в сеансах связи с Землей является задание режимов работы по командам с Земли).

Задействование или запрет работы алгоритмов управления СС осуществляется по командам с Земли.

Изменение параметров, используемых алгоритмами, производится с помощью массива поправок настраиваемых параметров.

В полете возможна корректировка бортового программного обеспечения (ПО). Закладка и контроль достоверности ввода новой версии ПО осуществляются без прерывания функционирования текущей версии ПО.

В ходе комплексных испытаний КА «СПЕКТР-УФ» в НПО им. С.А. Лавочкина проверяется функционирование штатного ПО БКУ по программам испытательных сеансов. Для обеспечения отработки режимов, требующих имитации условий функционирования аппаратуры в полете, соответствующее сопровождение режимов с получением необходимых параметров, имитирующих изменение условий внешней среды, обеспечивается технологическими программами, являющимися частью штатного про-

граммного обеспечения. Их задействование на Земле осуществляется заданием по КПИ специальных признаков-ключей. При штатном функционировании КА в полете работа технологических программ заблокирована, однако обеспечивается возможность их задействования по КПИ для парирования нештатных ситуаций и решения отдельных технологических задач.

Управление БКУ при КИ должно обеспечиваться штатными средствами.

5.2. Структура КПИ и радиокоманд

Любая информация с Земли на борт КА передается в кадре пользователя. По составу кадры пользователя подразделяются на следующие виды:

- «холостой» кадр;
- кадр, содержащий разовые команды, обрабатываемые бортовым радиокomплексом (БРК);
- кадр, содержащий КПИ для БКУ.

Кадры передаются на борт без какой-либо паузы между ними.

Радиокomанды. Радиокomанды передаются на борт в составе кадров КПИ с признаком БРК.

Команды, обрабатываемые БРК, делятся на функциональные команды (ФК) и управляющие кодовые слова (УКС). ФК и УКС имеют сквозную нумерацию. Общее количество ФК и УКС – 112.

По УКС БКТ задает режимы работы БРК и отдельных приборов БРК. ФК после дешифрации в КРУ преобразуются в позиционные импульсные исполнительные сигналы, которые поступают для включения/выключения приборов БРК или в смежные системы на исполнение.

Вся остальная командно-программная информация (кроме ФК и УКС) с признаком БКУ передается из БКТ БРК в БВУ БКУ по мультиплексному каналу обмена (МКО) в виде стандартного сообщения, включающего командные слова и слова данных (не более 24).

Состав командно-программной информации для БЦВС БКУ. КПИ для БВУ БКУ, передаваемая из БРК по МКО, включает в себя следующие виды информации:

- кодовые команды;
- полетное задание;
- массив изменения программ;
- рабочая программа.

Вид информации задается в командном слове, которое формируется в БРК и сопровождает любую передачу КПИ в БВУ БКУ.

Кодовые команды. Кодовые команды являются программными командами и предназначены для воздействия на функционирование БКУ и СС из НКУ.

С помощью кодовых команд можно обеспечить выполнение следующих операций:

- задание рода работы БКУ;
- задание выдачи релейных команд управления (РКУ) с соответствующего БУ;
- задание включения/выключения нагревателей через БУ-3 (аналог РКУ);
- задание выдачи цифровых команд управления (ЦКУ) по МКО в смежные системы;
- запрет или разрешение работы бортовых алгоритмов, в том числе диагностики;
- установка программных признаков в БВУ и задание параметров работы бортовых алгоритмов (настраиваемые параметры);
- задание времени выполнения определенной операции, в том числе выдачи команды;
- задание информации о сдвиге (коррекции) бортовой шкалы времени.

Все кодовые команды можно подразделить на две группы:

- кодовые команды без параметров;
- кодовые команды с параметрами.

В свою очередь, команды и первой и второй группы могут быть:

- непосредственного действия (тип 1);
- отложенного действия, т.е. с заданным временем исполнения (тип 2).

Для команд отложенного действия можно задавать несколько времен однократного исполнения, а также циклическую выдачу команды.

В составе одной фразы КПИ может быть одновременно передано несколько кодовых команд. Количество кодовых слов в каждой фразе КПИ ограничено только длиной самой фразы.

Кодовые команды могут выдаваться в любом режиме работы борта.

Полетное задание. Полетное задание определяет программу работы БКУ по управлению системой управления движением, телеметрической системой и, возможно, целевой аппаратурой (комплексом научной аппаратуры). В соответствии с назначением различаются: ПЗ СУД, ПЗ ТМС и ПЗ ЦА (КНА).

Вводу любого ПЗ предшествует выдача кодовой команды с заданием рода работы «Получение ПЗ» с указанием вида ПЗ и количества принимаемых фраз.

ПЗ СУД представлено в виде последовательности выполнения типовых полетных операций (ТПО).

Полетное задание состоит из специального раздела – заголовка ПЗ и параметров для каждой ТПО.

Специальный раздел содержит: контрольную сумму ПЗ, длину ПЗ в словах, абсолютное время начала программы полета, общее количество ТПО, а также их начальные адреса в памяти БЦВС.

Каждая типовая полетная операция задается жестко определенным набором слов, в число которых обязательно входят два служебных слова и длительность ТПО.

Служебные слова определяют код ТПО, точность стабилизации по углу и угловой скорости (грубая, точная, прецизионная и коррекция орбиты), способ разгрузки ДМ, разрешение/запрет разворота солнечных батарей, разрешение/запрет проведения астрокоррекции и выбор конкретных астродатчиков и т.п.

Количество параметров для задания ТПО определяется типом ТПО. Так, например, для ТПО-3, задающего инерциальную ориентацию аппарата (с разворотом или без него), требуется 10 слов. Таким образом, для каждого наблюдательного сеанса необходимо задание двух-трех ТПО-3, которые будут отличаться друг от друга разной точностью стабилизации, необходимостью проведения разгрузки ДМ и астрокоррекции.

С помощью ПЗ ТМС задается смена режимов работы телеметрии в заданное время вне сеансов управления.

Структура ПЗ КНА обеспечивает формирование циклограмм управления КНА с переменным составом команд и числовых данных.

Каждая фраза КПИ с полетным заданием, передаваемая с Земли, содержит порядковый номер. После приема и подсчета контрольной суммы БВУ выдает в телеметрию результаты приема фразы КПИ. В случае пропуска (непрохождения) фразы сообщение об этом также передается в телеметрию. В случае несовпадения контрольной суммы фразы в телеметрию передается не только результат, но и вся принятая фраза.

После приема всех фраз КПИ с полетным заданием и совпадения контрольной суммы по каждой фразе и всему полетному заданию разрешается его исполнение в заданный в ПЗ момент времени.

Ввод ПЗ может осуществляться на фоне исполнения предыдущего ПЗ.

Кодовая команда «Окончание ввода ПЗ» выдается только при штатном завершении или прерывании операции по вводу полетного задания.

Массивы изменения программ. Массивы изменения программ (МИП) предназначены для коррекции бортового программного обеспечения, которое проводится по специальному решению.

Вводу МИП предшествует выдача кодовой команды с заданием рода работы «Загрузка программы» и количества принимаемых фраз. Структура и технология ввода МИП полностью соответствуют структуре и технологии ввода МПНП.

В составе массива передаются: номер страницы репрограммируемого постоянного запоминающего устройства (РПЗУ) БВУ, начальный адрес фрагмен-

та или отдельной ячейки памяти и собственно сама информация.

Каждая фраза КПИ с МИП, передаваемая с Земли, содержит порядковый номер. После приема и подсчета контрольной суммы БВУ выдает в телеметрию результаты приема фразы КПИ. В случае пропуска (непрохождения) фразы сообщение об этом также передается в телеметрию.

После приема всех фраз КПИ с МИП и совпадения контрольной суммы по каждой фразе и всему массиву он переписывается из буфера в РПЗУ БВУ.

Ввод массивов изменения программ производится только в дежурном режиме БКУ после окончания отработки полетного задания.

Завершает выдачу МИП кодовая команда «Окончание загрузки программы».

Рабочая программа. Рабочая программа предназначена для управления полезной нагрузкой (КНА Т-170М) на участках наблюдения и технологических участках.

Рабочая программа подготовки и проведения наблюдательного сеанса представляет собой временную последовательность из 150–200 команд, реализуемых в автономном режиме без вмешательства с Земли.

Отработка рабочей программы, реализуемая КНА из БУНД и БУСК, сопровождается обработкой ПЗ КНА из БКУ, а также, при необходимости, временными командами из БКУ. Телеметрическое сопровождение обеспечивается обработкой ПЗ ТМС.

6. Организация телеметрического обеспечения на борту КА «СПЕКТР-УФ»

Организация телеметрического обеспечения на борту КА имеет своей целью получение достаточного объема информации для выполнения следующих основных функций:

- Обеспечение работы бортовых алгоритмов управления и диагностики функционирования бортовых систем, с использованием сигналов оперативного контроля, получаемых непосредственно БКУ от БС и параметров оперативного контроля, получаемых БКУ от ТМС путем запроса, а также с использованием ТМ-параметров о работе бортовых систем, формируемых непосредственно БКУ в обеспечение следующих задач:
 - выполнение функциональных задач участков полета КА;
 - контроль работоспособности бортовых систем КА с парированием предусмотренных нештатных ситуаций (НШС) и формированием признаков НШС.
- Обеспечение возможности наземного контроля штатности функционирования бортовых систем в полете как в сеансах связи (оперативный анализ текущей информации), так и на автономных участках работы КА, предшествующих сеансам сброса информации (анализ запомненной информации).
- Обеспечение контроля работоспособности бортовых систем КА в ходе комплексных испытаний КА в НПО им. С.А. Лавочкина.

Сбор служебной ТМ-информации на борту обеспечивает ТМС и БКУ.

На вход ТМС поступают датчиковая ТМИ и массивы цифровой информации от БКУ, БРК и КНА.

ТМИ выдается ТМС в виде последовательного 8-разрядного кода и имеет структуру циклического чередования ТМ-кадров. Размер кадра 4421 бит. Кадр состоит из служебной (325 бит) и информационной (512 байт) частей.

Совокупность кадров в рамках одного цикла составляет программу выходной информации или программу формирования кадров (ПФК), которая может содержать от 1 до 32 кадров.

таблица – Разрешенные сочетания режимов ТМС

	НП	ЗАП ЛСЗУ	ЗАП КСЗУ	ЗАП УРС	ВП ЛСЗУ	ВП КСЗУ	ВП УРС
НП		+	+	+	+	+	+
ЗАП ЛСЗУ	+		+	+	–	+	+
ЗАП КСЗУ	+	+		+	+	–	+
ЗАП УРС	+	+	+		+	+	–
ВП ЛСЗУ	+	–	+	+		+	+
ВП КСЗУ	+	+	–	+	+		+
ВП УРС	+	+	+	–	+	+	
ВД	+	+	+	+	+	+	+

Для КА «СПЕКТР-УФ» предполагается следующий состав ПФК:

- ПФК контроля функционирования БС;
- ПФК служебной информации функционирования КНА;
- ПФК воспроизведения информации системы контроля электризации (СКЭ);
- ПФК контроля функционирования БС и воспроизведения информации СКЭ;
- ПФК контроля функционирования БС и служебной информации функционирования КНА;
- ПФК воспроизведения кольцевого статического ЗУ (КСЗУ);
- ПФК воспроизведения линейного статического ЗУ (ЛСЗУ);
- ПФК воспроизведения устройства регистрации событий (УРС);
- ПФК специальные или технологические для конкретных операций.

Хранение информации на борту осуществляется в ЛСЗУ (128 Мбит) и КСЗУ (4 Мбит).

ТМС функционирует в следующих режимах:

- НП – режим непосредственной передачи с информативностью 1, 8 и 32 Кбод;
- ЗАП ЛСЗУ – режим записи на линейное СЗУ со скоростями 1, 8 и 32 Кбод;
- ЗАП КСЗУ – режим записи на кольцевое СЗУ со скоростями 1, 8 и 32 Кбод;
- ЗАП УРС – режим допускового контроля датчиков событий;
- ВП ЛСЗУ – режим воспроизведения информации, записанной на ЛСЗУ, со скоростями 1, 8 и 32 Кбод;
- ВП КСЗУ – режим воспроизведения информации, записанной на КСЗУ, со скоростями 1, 8 и 32 Кбод;
- ВП УРС – режим воспроизведения информации допускового контроля со скоростями 1, 8 и 32 Кбод;
- ВД – режим выдачи данных по МПИ.

Совмещение режимов представлено в таблице.

Режим записи на ЛСЗУ включается:

- по меткам типовых циклограмм управления;
- по ЦКУ из БКУ, формируемым алгоритмами БКУ при выполнении ПЗ или по признакам НШС;
- по КК.

Режим записи на КСЗУ включается в приземном сеансе и продолжается непрерывно до появления НШС. Режим возобновляется по КК.

Для ПФК, содержащих параметры контроля функционирования БС, половина кадра ТМС (256 слов) отводится для передачи цифровой информации от БКУ.

Другие ПФК (контроль КНА, специальные и др.) могут не содержать МЦИ БКУ. В этом случае при организации работы с ТМС необходимо предусматривать возможность контроля БС и БКУ с определённым интервалом времени.

Цифровые массивы БКУ (32 слова по 16-разрядов) содержат:

- признаковые параметры, фиксируемые по изменению параметра и передаваемые в виде признаковых массивов, содержащих № признакового массива, значение и время изменения параметра;
- параметры разовых срезов – формируемые алгоритмами БКУ по соответствующим признакам на фиксируемый момент времени и передаваемые в виде массивов разовых срезов (по 32 слова), в том числе разовых срезов в исследовательских режимах, которые задаются по КК от НКУ.

Цифровые массивы БКУ передаются в ТМС по заполнению буферов БКУ. Уровень заполнения, при котором начинается сброс информации, устанавливается по КК. Режимы и скорости выдачи МЦИ могут устанавливаться как алгоритмами управления ТМС, так и по КК от НКУ. Сброс информации в ТМС для передачи в режиме НП, регистрации на ЛСЗУ и КСЗУ осуществляется независимо.

заключение

Представленные принципы управления бортовыми системами КА «СПЕКТР-УФ» обеспечивают требуемые параметры функционирования научного комплекса телескопа Т-170М и КА «СПЕКТР-УФ» в целом. Использование в составе КА «СПЕКТР-УФ» модернизированного базового модуля «НАВИГАТОР» вместе с этим обеспечивает преемственность принципов организации управления бортовыми системами, успешно апробированных в проектах «ЭЛЕКТРО-Л» и «СПЕКТР-Р».

список литературы

Боярчук А.А., Шустов Б.М., Мошечев А.А., Сачков М.Е. Проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 4. С. 64-73.

Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космическими аппаратами и проектирование их программного обеспечения. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 333 с.

Статья поступила в редакцию 02.10.2014 г.

КОМПЛЕКС НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ ОБСЕРВАТОРИИ «СПЕКТР-УФ»

М.Е. Сачков¹,
доктор физико-
математических наук,
msachkov@inasan.ru;
M.E. Sachkov

С.С. Волков¹,
кандидат технических
наук, *svolkov@inasan.ru;*
S.S. Volkov

А.С. Шугаров¹,
shugorov@inasan.ru;
A.S. Shugarov

Б.М. Шустов¹,
доктор физико-
математических наук,
член-корреспондент РАН,
bshustov@inasan.ru;
B.M. Shustov

Е.Н. Канев¹,
kanev@inasan.ru;
E.N. Kanev

Е.В. Скрипун²,
skrip@laspase.ru;
E.V. Skripunov

SCIENTIFIC INSTRUMENTATION COMPLEX OF THE «SPEKTR-UF» OBSERVATORY

А.А. Моисеев²,
кандидат
технических наук,
moisheev@laspase.ru;
A.A. Moisheev

И.С. Саванов¹,
доктор физико-
математических наук,
isavanov@inasan.ru;
I.S. Savanov

Д.Н. Ероменок²,
eromenok@laspase.ru;
D.N. Eromenok

О.В. Власенко¹,
vlasenko@inasan.ru;
O.V. Vlasenko

С.Г. Сичевский¹,
s.sichevsiy@gmail.com;
S.G. Sichevskiy

А.В. Мендеров²,
menderov@laspase.ru;
A.V. Menderov

Проект «СПЕКТР-УФ» (международное название «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет») обеспечит астрофизикам возможность изучать различные объекты Вселенной в недоступном для наблюдений с земной поверхности ультрафиолетовом (УФ) участке спектра 115–310 нм. В статье кратко описывается комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ»: телескоп Т-170М с диаметром главного зеркала 1.7 м, спектрографы высокого и низкого разрешения, камеры для построения высококачественных изображений в УФ-диапазоне, бортовая система (блок) управления научными данными, а также прибор для регистрации космического гамма-излучения «KONUS-УФ».

Ключевые слова: ультрафиолетовая астрономия; космические проекты; космическое приборостроение.

ВВЕДЕНИЕ

Основное отличие астрономии от многих других наук состоит в том, что информация об объектах и процессах во Вселенной получается только путем наблюдения, т.е. регистрации и анализа электромагнитного излучения, гравитационных волн или космических частиц от объекта. Как и для любой обсерватории, предназначенной для наблюдений электромагнитного излучения, первая задача состоит в увеличении потока (т.е. концентрации) излучения от объекта. Именно для этого служат все телескопы. В принципе, чем больше

The project «SPEKTR-UF» (international name «World Space Observatory – Ultraviolet») will provide astrophysicists with an opportunity to study various objects of the universe in ultraviolet (UV) spectral range, 115–310 nm that is unreachable by ground-based instruments. The article briefly describes the Scientific Instrumentation Complex of the «SPEKTR-UF» observatory: telescope T-170M with a main mirror diameter of 1.7 m, high- and low-resolution spectrographs, camera for high quality images in the UV range, scientific data management unit and «KONUS-UF» instrument for registration of gamma- radiation from space objects.

Key words: ultraviolet astronomy; space missions; space instrumentation engineering.

собирающая (излучение) поверхность телескопа, тем лучше, но на практике это всегда компромисс с различными технологическими ограничениями и (немалой) стоимостью космического телескопа. Например, в проекте «СПЕКТР-УФ» такой компромисс привел к выбору телескопа с диаметром апертуры 170 см.

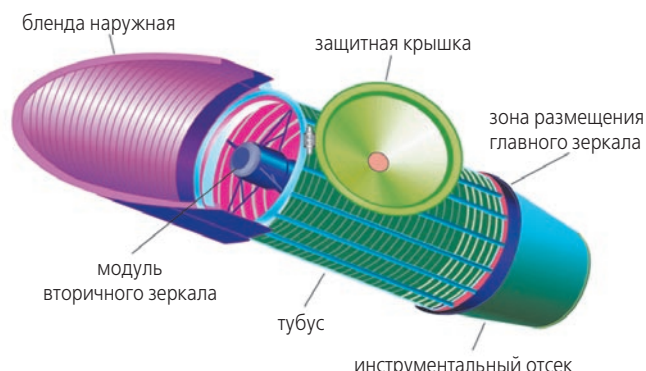
Собранный (сконцентрированный) телескопом поток излучения несет информацию, которую нужно зарегистрировать (записать) и проанализировать, с тем, чтобы решить научную задачу. Существуют

¹ ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow.

² ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.
Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia,
Moscow region, Khimki

различные методы (способы) регистрации и анализа. Основные способы решения научных задач с помощью обсерватории «СПЕКТР-УФ» заключаются в спектроскопии слабых источников и построении изображений в УФ-участке спектра. При этом должны достигаться высокое спектральное разрешение, максимальное пространственное разрешение, а для изучения слабых источников – высокая проникающая способность. Для решения поставленных задач в проекте «СПЕКТР-УФ» создаются уникальные научные приборы, предназначенные для:

- проведения спектральных наблюдений точечных объектов в диапазоне 110–320 нм с высоким разрешением (разрешающая сила $R > 50000$). Такая разрешающая сила позволяет проводить детальный анализ физических и химических свойств звезд и других точечных источников. Спектроскопия высокого разрешения – наиболее мощный способ исследования отдельных объектов при условии их достаточной яркости (блеска – этот термин более принят в астрономии). Эти функции в проекте «СПЕКТР-УФ» выполняют спектрографы высокого разрешения ВУФЭС и УФЭС (вакуумный ультрафиолетовый эшелюный спектрограф и ультрафиолетовый эшелюный спектрограф соответственно);
- проведения спектральных наблюдений низкого разрешения ($R=1000$) с высокой (длинной) щелью в том же диапазоне 110–320 нм. Выполнение этих требований необходимо для наблюдения протяженных, а также самых далеких (тусклых) объектов Вселенной. Для выполнения этих функций в проекте «СПЕКТР-УФ» предназначен СДЩ – спектрограф с длинной щелью);
- построения прямых изображений с высоким пространственным разрешением (до 0.03 угл. с, такое пространственное разрешение близко к дифракционному пределу для оптики 170-см телескопа) в УФ-диапазоне с возможно большим полем зрения. Этот вид наблюдений весьма эффективен для получения знаний о структуре космического объекта, а также для проведения многоцветной (при использовании фильтров) фотометрии как протяженных, так и точечных источников. В проекте «СПЕКТР-УФ» эти функции выполняет блок камер поля (БКП).



рисунки 1. Структура телескопа Т-170М

В целом проект «СПЕКТР-УФ» (международное название «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет») обеспечит астрофизикам возможность изучать различные объекты Вселенной в недоступном для наблюдений с земной поверхности ультрафиолетовом участке спектра 115–310 нм, удовлетворяя при этом самым высоким (предельные на данном уровне развития космической техники в мире) требованиям к характеристикам средств наблюдений.

Проект имеет уже солидную историю см. статьи, отражающие этапы разработки проекта: (*Sachkov M.*, 2007; *Shustov B. et al.*, 2009; 2011; 2014; *Boyarchuk A.A. et al.*, 2013). Здесь мы описываем современный облик комплекса научной аппаратуры (КНА).

В состав КНА «СПЕКТР-УФ» входят:

- телескоп Т-170М;
- комплекс основных научных приборов (КОНП) в составе:
 - блок спектрографов – БС, включающий ВУФЭС, УФЭС и СДЩ,
 - блок камер поля (БКП),
 - блок управления научными данными (БУНД),
 - бортовой маршрутизатор (БМ4) (входит по схеме деления, хотя по существу этот элемент можно рассматривать как служебный);
- научная аппаратура «КОНУС-УФ» (НА «КОНУС-УФ»).

В разделе 1 данной статьи кратко описывается телескоп Т-170М, в разделе 2 – КОНП (без БУНД) и прибор «КОНУС-УФ», в разделе 3 – БУНД и управление работой КНА в целом, в разделе 4 кратко представлен текущий статус проекта.

1. Телескоп Т-170М

Телескоп Т-170М создается в НПО им. С.А. Лавочкина в кооперации с Институтом астрономии РАН, ИКИ РАН, ОАО «ЛЗСО», ОАО «Воткинский завод», ФГУП «НИИ НПО «Луч».

Т-170М представляет собой прецизионный крупногабаритный телескоп, построенный на отражательной оптике с фокусным расстоянием 17 м с главным зеркалом диаметром 1.7 м (рисунок 1).

Показанная на рисунке 1 структура телескопа, конечно, схематична и дает понятия лишь об основных конструктивных составляющих.

Согласно технической документации телескоп Т-170М включает в свой состав:

- конструктивный модуль (КМ) (разработчик НПО им. С.А. Лавочкина);
- оптическую систему (ОС) (разработчик ИНАСАН);
- служебный комплекс (СК) (разработчик НПО им. С.А. Лавочкина).

КМ включает в свой состав:

- узел главного зеркала (УГЗ);
- модуль вторичного зеркала (МВЗ);
- тубус;
- скамью оптическую;
- инструментальный отсек (ИО);

- светозащитную крышку (СЗК) с механизмом раскрытия многократного срабатывания, оснащенным двумя электроприводами и узлом фиксации ее в транспортном положении с пирочеками;
- бленду наружную (БН), оснащенную двумя электроприводами для перевода ее из транспортного положения в рабочее и узлом фиксации БН в транспортном положении с пирочеками;
- приборные панели внешнего расположения (ППВР) в количестве 2 шт.;
- экранно-вакуумную теплоизоляцию.

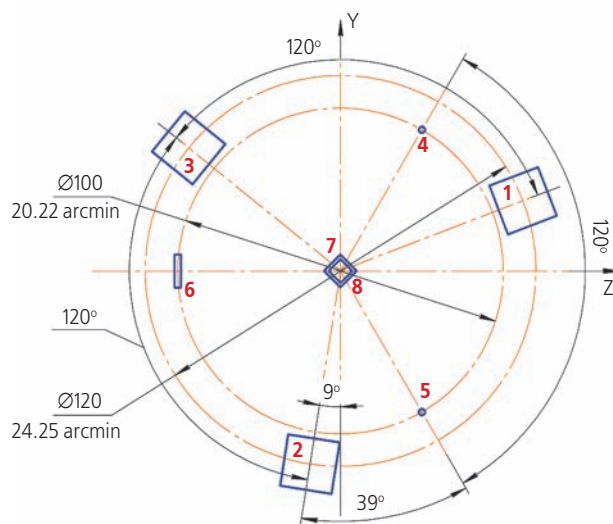
Подробнее см. (Мошнеев А.А. и др., 2014).

Телескоп Т-170М построен по классической схеме Ричи – Кретьена. Оптическая система телескопа (Яскович А.Л. и др., 2014) формирует изображения астрономических объектов в фокальной поверхности с полем зрения 30 угл. мин. Излучение от (космического) объекта, попадающее на апертуру телескопа, после отражения от главного и вторичного зеркал проходит через отверстие в главном зеркале и попадает в зону инструментального отсека телескопа. В инструментальном отсеке расположены основные научные приборы: блок спектрографов (БС) и блок камер поля (БКП), а также служебная система датчиков гида (СДГ), предназначенная для решения задач управления и контроля, т.е. наведения и стабилизации телескопа на выбранный объект. СДГ может быть также использована и для решения некоторых научных задач, хотя эти возможности довольно ограничены (Sachkov M. et al. Instrumentation..., 2014; Sachkov M. et al. WSO-UV project..., 2014).

На рисунке 2 показано расположение на фокальной поверхности полей зрения инструментов.

Рациональная компоновка научных и служебных (СДГ) инструментов – не простая задача. Это не набор отдельных приборов, помещенных в общий корпус, а взаимосвязанная система, увязанная в общей системе координат телескопа по весьма жестким требованиям (пространственного размещения, теплового режима, электромагнитной совместимости и т.д.).

Привязка научных приборов фокального узла к положению астрономического объекта в поле зрения телескопа решается с помощью СДГ. Датчики гида представляют собой три идентичные камеры поля, работающие в видимом участке спектра. Детекторами для этих камер служат ПЗС-матрицы. Поскольку наиболее жесткие требования по точности наведения предъявляются при наблюдениях с помощью блока спектрометров (требования по наведению – 0.1 угл. с), конструкция датчиков гида разрабатывается с учетом минимизации углового расстояния в поле зрения телескопа между полями зрения датчиков гида и входными щелями блоков спектрометров, расположенными на окружности диаметром 20 угл. мин в поле зрения телескопа (см. рисунок 2). Обеспечение минимальных расстояний между щелями спектрометров и детекторами датчиков гида



- 1–3 – камеры СДГ, 3.24×3.24 угл. мин;
 4 – УВЭС, 1 угл. мин; 5 – ВУВЭС, 1 угл. мин;
 6 – СДЦ, 72×1 угл. мин;
 7 – БКП-УФ БКФ-ВУФ камеры, 1.26 угл. мин;
 8 – БКП-УФ БКФ-ВУФ спектрометры, 1.02 и 1.08 угл. мин.

рисунк 2. Поля зрения инструментов на фокальной поверхности

позволяет гарантировать необходимую точность наведения выбранного объекта на щели спектрометров и стабильность их взаимного расположения в процессе эксплуатации телескопа на орбите.

2. Комплекс основных научных приборов

В состав комплекса основных научных приборов входят БС, БКП, БУНД, БМ4. Также по формальным признакам в схему деления сюда отнесена бортовая кабельная сеть (БКС), которая в данной статье не описывается.

На рисунке 3 показаны структурные элементы инструментального отсека телескопа Т-170М. Выделена рама узла главного зеркала (УГЗ) – основной несущий элемент телескопа, предназначенный для установки оптических элементов, прецизионных узлов и научной приёмной аппаратуры. К раме УГЗ крепится оптическая скамья, задающая опорную плоскость для всех научных бортовых приборов. Оптическая скамья прецизионно устанавливается с обеспечением необходимой геометрической стабильности по отношению к узлу главного зеркала с помощью трех опор. Блок камер поля устанавливается на верхнее основание оптической скамьи, в пространство между узлом главного зеркала и самой оптической скамьей, в то же время блок спектрографов закрепляется на обратной стороне оптической скамьи. Система датчиков гида состоит из трех детекторов излучения, чувствительные поверхности которых расположены непосредственно в фокальной плоскости вблизи входных щелей спектрографов.

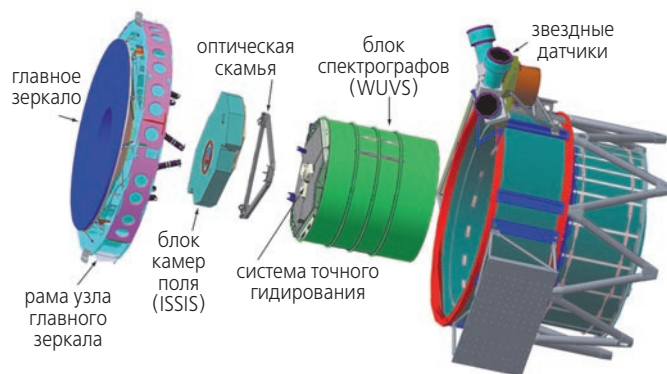


рисунок 3. Инструментальный отсек телескопа T-170M

2.1. Блок спектрографов

Блок спектрографов (WUVS, WSO-UV Spectrographs) проекта «СПЕКТР-УФ» представляет собой фактически три независимых спектрографа (канала), находящихся в одном корпусе: два эшелюных спектрографа – вакуумный ультрафиолетовый эшелюный спектрограф (ВУФЭС, VUVES) для работы в спектральном диапазоне 115–176 нм и ультрафиолетовый эшелюный спектрограф (УФЭС, UVES) для работы в спектральном диапазоне 174–310 нм, а также спектрограф с длинной щелью (СДЩ, LSS) для получения спектров низкого разрешения (1000) точечных и протяженных объектов в диапазоне длин волн 115–305 нм (Panchuk V. et al., 2014). Эти три спектрографа не используются одновременно, каждый из них имеет свою собственную входную щель, находящуюся в фокальной плоскости телескопа T-170M на круге диаметром 100 мм (см. рисунок 2). На этом же круге расположена и щель спектрографа СДЩ. Подробно характеристики БС см. в (Саванов И.С. и др., 2014).

Основные характеристики каналов УФЭС и ВУФЭС представлены в таблице 1, а канала СДЩ – в таблице 2.

таблица 1 – Основные характеристики каналов УФЭС и ВУФЭС

параметр	значение
спектральный диапазон УФЭС	174–310 нм
ВУФЭС	110–176 нм
разрешающая сила	>50000

таблица 2 – Основные характеристики спектрографа СДЩ

параметр	значение
спектральный диапазон	110–320 нм
ширина щели	1 угл. с=82 мкм
длина щели СДЩ	75 угл. с=6.24 мм
разрешающая сила	1000–2500
пространственное разрешение	0.5–1 угл. с

2.2. Блок камер поля

Важным инструментом обсерватории ВКО-УФ является блок камер поля, предназначенный для получения прямых изображений участков неба в УФ-

диапазоне. Блок камер поля проектируется, изготавливается и поставляется испанской стороной (Gómez de Castro A.I. et al., 2014) при участии ИНАСАН. Разработка блока камер поля ведется в соответствии с подписанными соглашениями: «Соглашение между Федеральным космическим агентством и Центром развития промышленных технологий Испании о сотрудничестве в области астрофизических исследований в ультрафиолетовом диапазоне по проекту «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет» (подписано 19.03.2007) и «Соглашением между Секретариатом по Промышленности (Испания) и Федеральным космическим агентством (Россия) о разработке Блока камер поля для проекта «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет» (подписано 23.12.2009). Базовая конфигурация БКП включает в себя два основных канала: канал дальнего УФ (FUV) и канал ближнего УФ (NUV), способных работать как в режиме получения изображений, так и в режиме бесщелевой спектроскопии. Основные характеристики БКП приведены в таблице 3, более подробно см. (Gómez de Castro A.I. et al., 2014).

таблица 3 – Основные характеристики БКП

канал	диапазон, нм	разрешение, угл. с	поле зрения, угл. с
FUV	115–175	0.1	70×75
NUV	185–320	0.1	70×75

Головной организацией по созданию комплекса научной аппаратуры проекта «СПЕКТР-УФ» является Институт астрономии РАН. Формирование требований к параметрам научных приборов, определение приоритетных научных заданий проекта ИНАСАН реализует в рамках Международного научного комитета.

2.3. Научная аппаратура «КОНУС-УФ»

Научная аппаратура «КОНУС-УФ» (НА «КОНУС-УФ») предназначена для исследования космических гамма-всплесков и активности мягких гамма-репитеров в энергетическом диапазоне от 10 кэВ до 10 МэВ. Управление работой НА «КОНУС-УФ» и трансляция в бортовой радиокomплекс научной информации обеспечивает БУСК. Разработчик НА «КОНУС-УФ» – ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Прибор аналогичен тем, которые уже работали и работают в составе других космических миссий, например (Aptekar R.L. et al., 2009).

3. Управление работой КНА

Каждый из научных приборов имеет свой блок питания и блок обработки данных в служебном отсеке, расположенном на внешней стороне инструментального отсека. Управление работой всей системы

научных приборов и обработкой научных данных на борту осуществляется бортовым компьютером – блоком управления научными данными (БУНД). Управление служебными системами осуществляется блоком управления служебным комплексом (БУСК). Предусмотрена возможность управления научными приборами также с помощью БУСК. Схема информационных связей КНА приведена на рисунке 4.

БУНД решает следующие задачи:

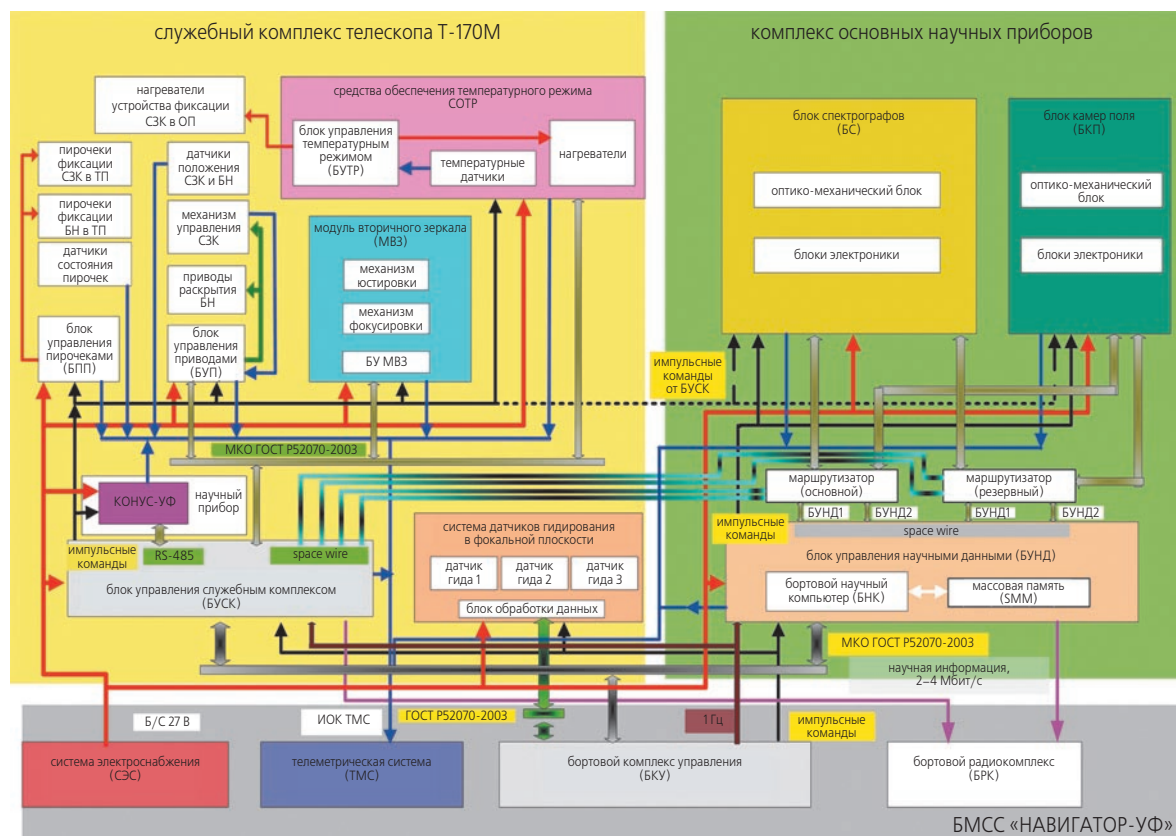
- получение управляющих кодовых слов и функциональных импульсных команд для КНА от БКУ служебного модуля КА;
- управление режимами работы научных приборов по заложенной циклограмме или в режиме ретрансляции команд;
- формирование функциональных импульсных команд для управления научными приборами;
- получение от научных приборов наблюдательных данных и передача их либо в память научных данных (ПНД) для хранения, либо в БРК (бортовой радиокомплекс) служебного модуля КА, либо в оба адреса одновременно;
- получение от научных приборов телеметрической (ТМ) информации об их параметрах и текущем состоянии и передача ее либо в память научных данных (ПНД) для хранения, либо в БРК служебного модуля КА, либо в оба адреса одновременно;
- извлечение из ПНД накопленных ТМ-пакетов и передача их в БРК служебного модуля КА во время сеансов связи с Землей;

- формирование и выдача информации оперативного контроля (ИОК) в виде сигналов контактных датчиков состояния БУНД в телеметрическую систему (ТМС) служебного модуля КА.

Основное назначение БУСК – управление, сбор, обработка и временное хранение информации от служебных систем телескопа Т-170М и КНА и передача ее в бортовой радиокомплекс КА «СПЕКТР-УФ». С целью повышения надежности по управлению научными приборами (включение/отключение прибора), информационного обмена (передачи в прибор управляющих кодовых слов, приема из прибора научной и технологической информации), а также по хранению научной и технологической информации с последующей передачей ее в БРК КА дополнительно эти задачи возлагаются на БУСК.

БУНД и БУСК связаны с бортовым комплексом управления (БКУ) КА интерфейсом типа MIL-STD-1553В, с помощью которого осуществляется информационный обмен между БКУ КА и БУНД, БУСК. В качестве контроллера на этом интерфейсе выступает БКУ КА, а БУНД, БУСК являются абонентами. Управление режимами работы приборов, систем и агрегатов КНА осуществляется путем выдачи команд, согласно циклограмме, которая загружается заранее от БКУ КА и хранится в оперативном (ОЗУ) и постоянном (ПЗУ) запоминающих устройствах БУСК или БУНД.

В научных приборах может осуществляться предварительная обработка научной информации. В зависимости от информативности (например – плотности



рисунк 4. Схема информационных связей КНА

изображения звездного неба в кадре) степень сжатия может достигать 150. Поступающая в БУНД или БУСК информация преобразуется, после чего поступает в ПНД БУНД. Во время сеансов связи с Землей научная и телеметрическая информация КНА, хранящаяся в БУНД или БУСК, передается в БРК КА. Разработчиком системы управления КНА является ИКИ РАН.

Бортовой маршрутизатор БМ4 обеспечивает коммутацию потоков командно-программной информации, предназначенных для управления научных приборов КОНП от БУНД или от БУСК и коммутацию потоков научной и служебной телеметрической информации от научных приборов КОНП в БУНД или в БУСК.

4. Состояние работ по созданию КНА «СПЕКТР-УФ»

Работа по созданию комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» ведется по утвержденному плану, который предполагает поставку штатного образца в НПО им. С.А. Лавочкина для стыковки с КА «СПЕКТР-УФ» в 2018 году.

На момент написания статьи (сентябрь 2014) ведется сборка технологического образца КОНП, а также подготовка натурного габаритно-массового теплового эквивалента (НГМТЭ) КНА к вибровакuumным испытаниям. НГМТЭ блока камер поля поставлен из Испании, НГМТЭ блока спектрографов изготовлен кооперацией под руководством Института астрономии РАН.

Текущая информация по проекту публикуется на официальном web-сайте по адресу: <http://wso-uv.org>.

список литературы

Gomes de Castro A.I., Переа Абарка Б., Шугаров А.С., Саванов И.С. и др. Блок камер поля // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 81-85.

Мошнеев А.А., Ильясов М.Ф., Зверев А.В., Рыков Е.В. и др. Особенности конструкции телескопа Т-170М // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 53-60.

Саванов И.С., Шустов Б.М., Сачков М.Е. и др. Блок спектрографов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 74-80.

Шустов Б.М., Боярчук А.А., Сачков М.Е., Мошнеев А.А. и др. Космические перспективы изучения ультрафиолетовой Вселенной: проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 4-15.

Якович А.Л., Власенко О.В., Макаров В.П. Оптическая схема телескопа Т-170М комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 61-66.

Aptekar R.L., Cline T.L., Frederiks D.D., Golenetskii S.V. et al. Konus-Wind Observations of the

New Soft Gamma-Ray Repeater SGR 0501+4516 // The Astrophysical Journal Letters. 2009. Vol. 698, Issue 2. P. L82-L85.

Boyarchuk A.A., Shustov B.M., Moishev A.A., Sachkov M.E. Spektr-UF project // Solar System Research. 2013. 47. P. 499-507.

Gómez de Castro A.I., Pagano I., Sachkov M., Lecavelier des Etangs A. et al. Science with the World Space Observatory – Ultraviolet 2009, in New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations, Proceedings of the International Conference held in Puerto Vallarta, Mexico, April 16-20, 2007 / Eds. M. Chavez, E. Bertone, D. Rosa-Gonzalez and L.H. Rodriguez-Merino. Springer. P. 319-327.

Gómez de Castro A.I., Sestito P., Sánchez N. World Space Observatory-Ultraviolet: ISSIS, the imaging instrument // Advances in Space Research. 2014. 53. P. 996-1002.

Malkov O., Sachkov M., Shustov B., Kaigorodov P. et al. Scientific program construction principles and time allocation scheme for the World Space Observatory-Ultraviolet mission // Astrophysics and Space Science. 2011. 335. P. 323-327.

Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T., Sachkov M. Optical layouts of the WSO-UV spectrographs // Astrophysics and Space Science. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-2087-4.

Sachkov M., Shustov B., Savanov I., Gómez de Castro A.I. WSO-UV project for high-resolution spectroscopy and imaging // Astronomische Nachrichten. 2014. 335. P. 46-50.

Sachkov M. World Space Observatory-Ultraviolet: International Mission for UV Spectroscopy and Imaging // AIP Conference Proceedings. 2007. Vol. 938. P. 148-155.

Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I. Instrumentation of the WSO-UV project // Proc. of the SPIE. 2014. 9144, paper N 91441. P. 1-6.

Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A.I., Huang M. et al. WSO-UV – ultraviolet mission for the next decade // Astrophysics and Space Science. 2009. 320. P. 187-190.

Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A.I., Werner K. et al. World space observatory – ultraviolet among UV missions of the coming years // Astrophysics and Space Science. 2011. 335. P. 273-282.

Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al. WSO-UV progress and expectations // Astrophysics and Space Science, 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-2119-0.

Статья поступила в редакцию 26.09.2014 г.

НАЗЕМНЫЙ СЕГМЕНТ КОСМИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ «СПЕКТР-УФ»

GROUND SEGMENT OF «SPEKTR-UF» SPACE OBSERVATORY

Ю.В. Казакевич¹,
st96@laspace.ru;
Yu.V. Kazakevich

Б.М. Шустов²,
*доктор физико-
математических
наук, член-
корреспондент РАН,*
bshustov@inasan.ru;
B.M. Shustov

М.Е. Сачков²,
*доктор физико-
математических
наук,*
msachkov@inasan.ru;
M.E. Sachkov

О.Ю. Малков²,
*доктор физико-
математических
наук,*
omalkov@inasan.ru;
O.Yu. Malkov

**А.И. Гомес
де Кастро³,**
профессор,
*ana_i_gomez@
mat.ucm.es;*
A.I. Gomez de Castro

О.А. Басаргина¹,
torg@laspace.ru;
O.A. Basargina

И.Н. Наволоцкая¹,
nin@laspace.ru;
I.N. Navolotskaya

П.В. Кайгородов²,
*кандидат физико-
математических
наук,*
pasha@inasan.ru;
P.V. Kaigorodov

Е.Н. Канев²,
kanev@inasan.ru;
E.N. Kanev

Е.Ю. Кильпио²,
*кандидат физико-
математических
наук,*
lena@inasan.ru;
E.Yu. Kilpio

Е.П. Курбатов²,
*кандидат физико-
математических
наук,*
kurbatov@inasan.ru;
E.P. Kurbatov

А.Э. Пискунов²,
*доктор физико-
математических
наук,*
piskunov@inasan.ru;
A.E. Piskunov

И.С. Саванов²,
*доктор физико-
математических
наук,*
isavanov@inasan.ru;
I.S. Savanov

С.Г. Сичевский²,
*s.sichevskij@
gmail.com;*
S.G. Sichevskij

Н.В. Чупина²,
*кандидат физико-
математических
наук,*
chupina@inasan.ru;
N.V. Chupina

Х.М. Лозано⁴,
jmlozano@gmv.com;
J.M. Lozano

Ф.Х. Яньес³,
*профессор, javier_
yanez@mat.ucm.es;*
F.J. Yanez

Дано краткое описание основных составляющих наземного сегмента космической обсерватории «СПЕКТР-УФ» (известной также под международным названием «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет»). Основные составляющие НС – наземный комплекс управления и наземный научный комплекс – создаются в рамках международной (российско-испанской) кооперации.

Ключевые слова:
наземный сегмент;
наземный комплекс управления;
наземный научный комплекс;
Центр управления полетами;
программное обеспечение.

The major constituents of the Ground Segment of «SPEKTR-UF» space observatory (known by its international name – World Space Observatory – Ultraviolet) are briefly described. The major constituents of the GS: Mission Control Center and Science Operation Centre are being constructed in frame of Russian-Spanish international cooperation.

Key words:
ground segment;
ground control complex;
science operation centre;
mission control centre;
software.

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

² ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

³ Мадридский Университет Комплутенсе, Испания, г. Мадрид.

Universidad Complutense de Madrid, Spain, Madrid.

⁴ Компания GMV, Испания, г. Мадрид.

GMV, Spain, Madrid.

Введение

Проект «СПЕКТР-УФ» (международное название «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет», ВКО-УФ) обеспечит астрофизикам возможность изучать различные объекты Вселенной в недоступном для наблюдений с земной поверхности ультрафиолетовом (УФ) участке спектра 115–310 нм. Основные составляющие проекта в их современном состоянии описаны в ряде работ (*Шустов Б.М. и др.*, 2014; *Sachkov M., Shustov B., Savanov I. et al.*, 2014; *Shustov B. et al.*, 2014; *Malkov O. et al.*, 2014; *Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I.*, 2014; *Vallejo J.C. et al.*, 2009). Обсерватория будет работать на круговой геосинхронной орбите высотой около 40 тыс. км, с наклоном 51° и периодом обращения 24 часа. Согласно Федеральной космической программе на период 2016–2020 гг. обсерватория «СПЕКТР-УФ» планируется к запуску в 2020 году.

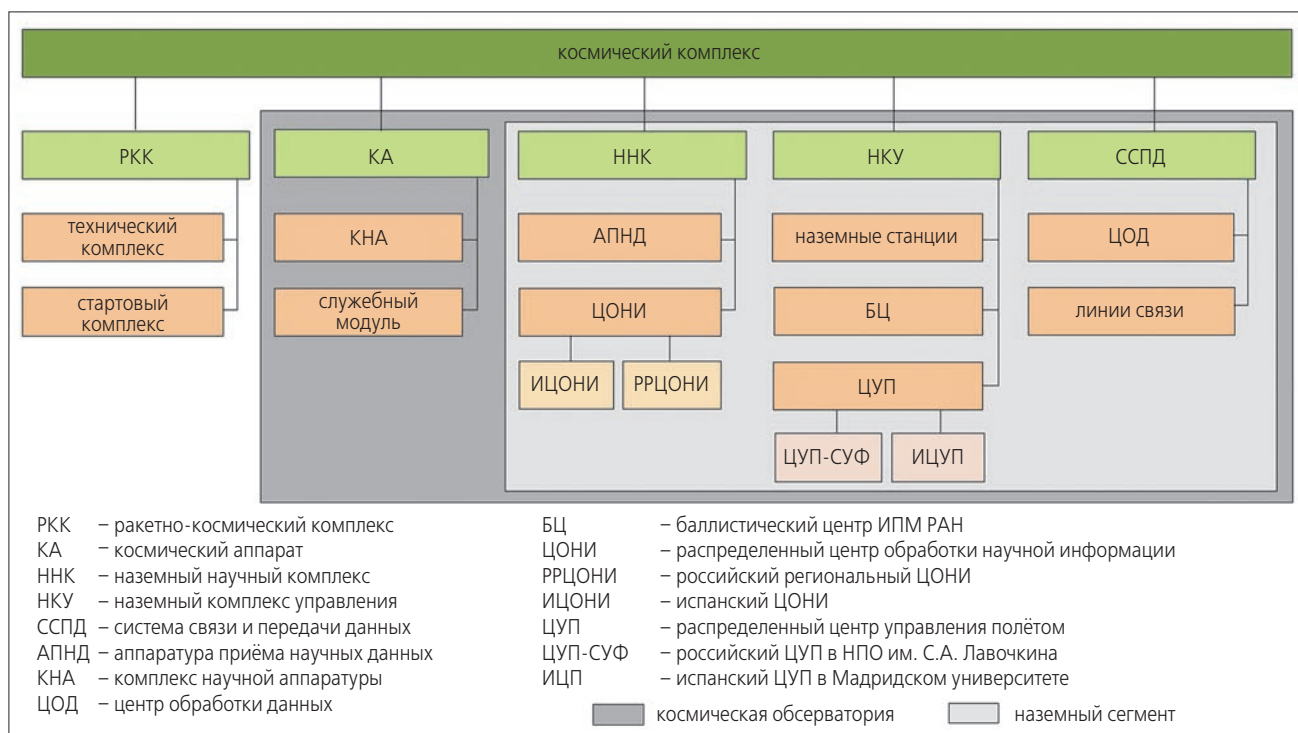
Структурная схема космического комплекса (КК) и место наземного сегмента показаны на рисунке 1.

Работа по созданию наземного сегмента ведется совместно российскими и испанскими специалистами в рамках соглашения между Федеральным космическим агентством (Роскосмос) и Центром развития промышленных технологий Испании (CDTI) о сотрудничестве в области астрофизических исследований в ультрафиолетовом диапазоне по проекту «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет» от 19.03.2007 г. (далее – Соглашение) и базируется на межправительственном соглашении между Россией и Испанией о сотрудничестве в области исследования и использования космического пространства в мирных целях.

Особенностью такой совместной работы над наземным сегментом является то, что система реализуется в виде двух совместимых решений, российского и испанского. Российская сторона в ходе выполнения опытно-конструкторской работы (ОКР) не разрабатывает наземный сегмент как отдельную систему, а использует традиционное деление на наземный комплекс управления (НКУ) и наземный научный комплекс (ННК). При этом допускается использование термина «наземный сегмент» в обеспечение работ испанской кооперации.

В основе разработки наземного сегмента проекта «СПЕКТР-УФ» лежат следующие принципы:

- создание среды для проведения научных исследований с помощью космической обсерватории с соблюдением имеющихся приоритетов и интересов участвующих сторон;
- разработка технической структуры, использующей наработки и технологии сторон и в то же время обладающей внутренней информационной целостностью;
- внедрение перспективных технологий и комплексов информационного обеспечения, систем обработки информации и радиотехнических средств;
- разработка, модернизация и переоснащение технических средств станций слежения на новый для предприятий РФ международный частотный диапазон радиолиний КА;
- создание равнодоступной для участников проекта среды распространения полученной информации;



рисунк 1. Схема космического комплекса «СПЕКТР-УФ»

- развитие российских средств ЦУП-Л и ССПД, отработка технологии взаимодействия с зарубежной кооперацией на этапах испытаний и эксплуатации комплексов ЦУП;
- широкое использование международных стандартов и рекомендаций Консультативного комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS) и Европейской кооперации по стандартам в области космоса (ECSS) – в частности (*Рекомендации ECSS*, 2000);
- использование передовых технологий в области телекоммуникаций и связи, в частности широкополосных каналов связи и современных технологий абстрактного разделения и совместного использования вычислительных ресурсов.

В статье впервые системно описываются основные составляющие наземного сегмента обсерватории «СПЕКТР-УФ». В разделе 1 анализируется межагентское Соглашение, в соответствии с которым ведутся работы, в разделе 2 описана структура и функции наземного сегмента управления, в разделе 3 – подсистемы наземного научного комплекса, в разделе 4 – описана система связи и передачи данных.

1. Анализ требований базового межагентского Соглашения

Упомянутое межагентское Соглашение является базовым документом как при разработке технических заданий на составные части (НКУ, ННК, ССПД), так и при определении логики управления космическим комплексом. В документе используется нестандартная терминология и наименования систем, ранее не использовавшихся в отечественных ОКР и, на настоящий момент, в данной конфигурации не используемых в работе ЕКА. Это несколько усложняет анализ выполнения требований базового документа. Однако суть взаимоотношений сторон просматривается в документе достаточно четко, что делает возможной его техническую правку в будущем при сохранении основных взаимных обязательств.

Среди таких обязательств выделяются следующие:

- российская сторона является головным исполнителем ОКР, в компетенции которой находятся выбор технических решений по конструкции КА и наземного сегмента. Для работ, выполняемых европейской кооперацией, такая констатация означает, что российская сторона проводит экспертный анализ решений, предлагаемых европейской стороной;
- российская сторона, признавая опыт и компетенцию европейской стороны, поручает испанской кооперации работы по созданию всех элементов наземного сегмента в расчете на то, что предложенные решения будут соответствовать ожи-

даниям российской стороны и соответствовать системным требованиям;

- российская сторона выполняет работы по испытанию космического комплекса, включая наземный сегмент; самостоятельно определяет объемы собственных работ в обеспечении отработки наземных средств; привлекает собственные наземные станции и вспомогательные средства;
- эксплуатация КК производится сторонами совместно. При этом основным центром управления для штатных операций назначается испанский ЦУП.

Другими словами, российская сторона создает технологический образец АСУ КК в полном объеме – привлекает наземные станции, средства БНО, разрабатывает необходимое ПО управления полетом и ПО научного планирования и анализа. Используя российские решения, аттестуются и, при необходимости, дорабатываются европейские средства. Под руководством российской стороны проводятся комплексные испытания средств наземного сегмента и полученное единое изделие проходит летные испытания. При этом европейская кооперация, в свою очередь, полагает, что следование обеих сторон стандартам CCSDS, и прежде всего – SCOS в области программного обеспечения наземного сегмента, сведет объем необходимых доработок к минимуму.

Распределение работ на этапах полета в целом соответствует согласованному в 2014 году в российской космической отрасли подходу к определению круга задач эксплуатирующих организаций для научных программ.

Соглашение содержит ряд статей с перечислением тех или иных систем наземного сегмента. Данный состав, по действующим правилам рабочего проектирования обеих сторон (PK-11, ECSS, CCSDS), может быть переформатирован в ходе ОКР и закреплён по факту дополнительным соглашением по мере продвижения к летным этапам.

Таким образом, анализ базового документа показывает, что даже при наличии совместных работ по подсистемам наземного сегмента в основе программы лежат собственные автономные работы российской стороны по формированию его технического облика, количества и состава наземных средств, а также логики их взаимодействия.

2. Наземный комплекс управления

НКУ «СПЕКТР-УФ» – сложная техническая система, позволяющая в режиме реального времени осуществлять управление космическим комплексом – как самим КА, так и наземными средствами. Для достижения этой цели НКУ решает задачи контроля состояния и положения КА, анализа поступающей

телеметрической информации, контроля информационных потоков от смежных систем, задачи принятия управленческих решений и обширный ряд узкотехнологических задач.

При формировании ТЗ на НКУ возникал вопрос определения формата участия испанской стороны при условии, что Соглашением выдача технических заданий на СЧ ОКР иностранной кооперации не предусмотрена. При этом общий анализ возможностей российской стороны при имеющейся конфигурации КНА показывал, что для ряда баллистических схем российская сторона ни при каких условиях не могла выполнить требования по полноте передачи целевой информации без привлечения зарубежных средств. Другими словами, формируемый автономно состав НКУ не был достаточным для достижения целей проекта.

Наземный комплекс управления «СПЕКТР-УФ», в итоге, определен в следующем составе:

- Центр управления полетом – ЦУП-СУФ, который располагается на базе сектора ДКА ЦУП-Л (г. Химки) и разрабатывается НПО им. С.А. Лавочкина. Объектами разработки являются: ЦУП как комплекс аппаратных систем и средств связи, комплекс программного обеспечения для выполнения всех видов штатных операций с КА, необходимых технологических операций, а также взаимодействия между элементами наземного сегмента в полном объеме;
- испанский ЦУП (ИЦУП), который располагается на территории Мадридского университета. Выполняет функции эксплуатирующей организации. Разрабатывается исходя из задач взаимодействия со всеми используемыми элементами наземного сегмента, включая российские станции. Однако в задачи ИЦУП не включены работы на этапах отработки систем, выполнения технологических операций, парирование НШС;



рисунок 2. Общий вид 15-метровой антенны наземной станции «Маспаломас»



рисунок 3. Общий вид антенны наземной станции «СПЕКТР-Х» в Медвежьих Озёрах

- баллистический центр (БЦ), который расположен в ИПМ им. М.В. Келдыша РАН (г. Москва), разрабатывается ИПМ РАН по техническому заданию НПО им. С.А. Лавочкина;
- сеть наземных станций. Расположение и состав будут зависеть от принятой баллистической схемы полёта. В настоящее время для управления КА «СПЕКТР-УФ» определены станции в Маспаломас (Испания) и Медвежьих Озёрах (Россия) (рисунки 2 и 3).

В состав НС входит также ССПД – система связи и передачи данных (см. раздел 4).

3. Центры управления полетом КА «СПЕКТР-УФ»

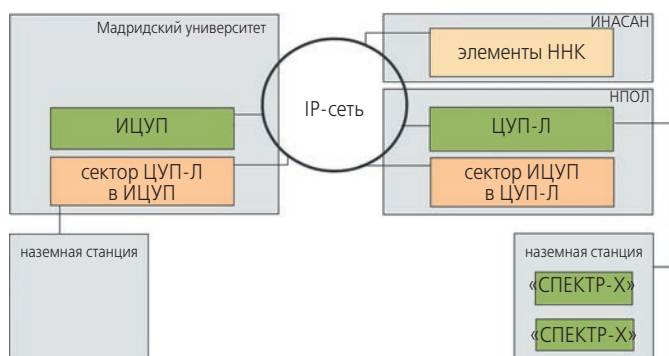
3.1. Общий подход

Как уже отмечалось, при управлении КА в проекте «СПЕКТР-УФ» предполагается, что функционируют два ЦУП: ЦУП российской стороны, расположенный в НПО им. С.А. Лавочкина, и зарубежный ЦУП, расположенный в университете Мадрида, Испания. Фактически речь идет о распределенном российско-испанском ЦУП (рисунок 4). Авторство отдельных компонентов отражено на рисунке соответствующими цветами. Выбор конкретного применения тех или иных компонентов какого-либо ЦУП зависит от

конфигурации наземного сегмента, этапа полета и вида производимой операции. Доступ к используемым в проекте наземным станциям, несовместимых (на данный момент) друг с другом с точки зрения наземных протоколов обмена, осуществляется с помощью вынесенных комплексов реализации сеансов связи. Таким образом, комплектация российского ЦУП будет включать в себя средства, разработанные испанской стороной и, наоборот, мадридский ЦУП комплектуется терминалами с возможностью использования российской технологии. Набор функций вынесенных средств не ограничивается работой со станциями и подлежит уточнению в ходе рабочего проектирования и зависит от реально достигнутого в ходе ОКР уровня унификации.

ЦУП-Л при проведении испытаний бортовых систем и штатной эксплуатации космического комплекса должен обеспечивать работу типовых для российских проектов групп персонала – групп реализации, анализа, моделирования, перспективного и оперативного планирования.

На этапе ЛКИ КА происходит отработка космического комплекса, которую проводит персонал НПОЛ, тогда как персонал ИЦУП готовится принять управление КК. На данном этапе в полном объеме используется программное обеспечение ЦУП-Л.



рисунки 4. Распределённый ЦУП проекта «СПЕКТР-УФ»

На этапе ЛКИ совместно с ЦУП-Л работают как вынесенный сектор (обозначен на рисунке 4 оранжевым цветом в составе средств НПОЛ), так и основные средства ИЦУП в режиме наполнения и синхронизации баз данных, понимания и отработки технологии управления в ходе специальных сеансов.

После начала выполнения научной программы работ часть времени основной должна считаться группа управления в Мадридском университете, а часть – группа в ЦУП-Л. Оперативная передача управления КА становится возможной с помощью использования специальной технологии, основные принципы которой:

- информационная симметричность, в том числе информационная равноудаленность от средств ННК;

- синхронное архивирование;
- единые исходные данные на обработку;
- единое представление обработанной ТМИ;
- резервирование на уровне ССПД.

Результатом такой схемы будет максимально оперативная, автоматическая и прозрачная для персонала передача управления из одного сектора в другой. При этом сопровождение комплекса, проведение летных испытаний и работу в нештатных ситуациях осуществляет только группа (ГОГУ) в НПОЛ. Дополнительное описание принципов работы ГОГУ приведено в отдельном материале в рамках настоящего выпуска.

Группа в ЦУП-Л также будет использовать дополнительное программное обеспечение, прежде всего – информационно-логический стенд (ИЛС) БКУ разработки МОКБ «МАРС». Такой стенд позволяет проводить аттестацию формируемой командно-программной информации с помощью оперативного моделирования.

Стандарты ЕКА, по которым работает испанская сторона, также требуют наличия имитаторов составных частей космического комплекса (SCSIM, MOCSIM). Планируется, что для выполнения современных требований по принципу «имитатор как сетевой сервис» ИЛС БКУ должен быть доработан силами изготовителя или НПОЛ.

Баллистическая полетная и справочная информация, необходимая для проведения сеансов связи, рассчитывается российской баллистической группой, а также операторами испанской группы управления с использованием типового ПО. Итоговое решение, в случае расхождения данных, принимает группа БНО российской стороны.

Готовые сеансы реализуются текущей группой управления через наземные станции. Как было указано, стороны создают или привлекают к проекту независимо друг от друга как минимум по одной наземной станции. С точки зрения совместного использования, наземные станции – это типовой разделяемый ресурс, и технология использования станции изначально предусматривает подключение различных точек получения информации и выдачи исходных данных. Стороны должны лишь проконтролировать, чтобы станция выполняла рекомендации Международного Консультативного Комитета по космическим системам передачи данных (CCSDS) в этой области и имела отлаженное абонентское окончание.

3.2. Программное обеспечение ЦУП

Разрабатываемый испанской стороной комплекс ПО (НКУ и ННК) формируется на базе готовой платформы ПО ЕКА стандарта SCOS 2000–2008. Российская сторона принимает и аттестует ПО на предмет допуска к работе с КА в ходе наземных и летных испытаний. Российская сторона не имеет

соответствующего отраслевого стандарта, но опыт НПО им. С.А. Лавочкина в области создания систем управления КА собственной разработки, участие специалистов ЦУП-Л в работе подкомитетов CCSDS, опыт международного сотрудничества и критический подход к создаваемой продукции привели к тому, что основные технические решения, предлагаемые НПОЛ в соответствии со стандартом предприятия СТО 301-16-2012, не противоречат и во многом совпадают с предлагаемыми кооперацией ЕКА. Среди основных решений:

- промышленность общего программного обеспечения;
- сквозная система авторизации;
- виртуализация и непрерывное развертывание как требование;
- концентрация приложений;
- сервисная ориентированность (SOA);
- отделение стендовых задач;
- иерархичность и изолированная многоуровневость;
- высокая степень интеграции со средствами ННК.

На данный момент стороны провели детальные презентации продуктов и подошли к вопросам определения объема доработок. Российская сторона провела показ текущих решений на примере проекта «РАДИОАСТРОН». Испанская сторона до 2013 года сумела найти средства для существенных инвестиций в отдельную сборку всего комплекса ПО и провести предварительное тестирование силами специалистов НПОЛ и ИНАСАН. Выданное по результатам тестирования заключение позволяет говорить об опережении графика испанской стороной (по сравнению с российской) в области подготовки ПО наземного сегмента. Однако специфика финансирования проекта испанской стороной не позволяет надеяться на сохранение темпов проектирования ПО и российская сторона имеет все шансы выровнять готовность.

Наиболее существенные текущие отличия, мешающие унификации комплексов, – это способ обработки и хранения телеметрической информации и существенная зависимость от оригинальных внутренних систем авторизации.

Текущие решения предполагают, что потоки ТМИ с космического аппарата принимаются и архивируются сторонами независимо друг от друга. Более детальная обработка производится по единым массивам исходных данных, которые готовятся до пуска российской стороной. Обработанная информация просматривается группами управления с использованием одинаковых, унифицированных формуляров отображения, а все изменения, которые осуществляются в бортовом программном обеспечении, фиксируются российской стороной в указанных исходных данных и требуют пересборки имеющихся архивов

обработанной информации обеими группами управления. Готовые для закладки на борт полетные задания формируются группами управления с использованием различных интерфейсов, однако, в отличие от принципа обработки ТМИ, максимально используется модель хранения данных, предложенная испанской стороной.

В проекте предусмотрена процедура создания долгосрочной (полугодовой) и краткосрочной (недельной) программ, составляемых Международным комитетом по распределению времени (англ. TAC – Time Allocation Committee) на основе банка заявок. Вместе с краткосрочной программой работы КА создается и так называемый поток рабочих программ. Более подробно описание технологии научного планирования изложено в разделе 4.

С точки зрения систем хранения наземного сегмента, эти данные формируются в центральной базе проекта, которая может быть автономно реплицирована российской и испанской стороной. Загрузка и предварительная обработка результатов происходит с использованием интерфейса единого веб-сервера проекта, и деление ряда комплексов на принадлежность НКУ или ННК здесь достаточно условна.

Ряд программных систем, связанных с долгосрочным хранением данных, может быть установлен на площадках центра обработки данных (ЦОД) ССПД (ведомственных или публичных), которые обеспечивают более высокую надежность и доступность для данных. Порядок заказа и работы с услугами сторонних ЦОД сторонами на данный момент не определен.

3.3. Аппаратное обеспечение

Аппаратное обеспечение, используемое в ЦУП, в высокой степени унифицировано по причине совпадения общей технологии, используемой сторонами. Расхождение в спецификации не будет иметь принципиальных последствий, поскольку обслуживание технических средств стороны проводят самостоятельно, а требования к ОПО практически идентичны. Испанская сторона планирует реализовать комплексное клиент-серверное решение, предлагаемое фирмой Sun (подразделение Oracle). В качестве рабочих мест планируется использовать бездисковые терминалы Sun Ray по аналогии с рядом секторов управления, развернутых в ESOC. Однако ввиду отрицательной динамики развития компании Sun Microsystems, технологического отставания и жесткой политики США в области экспорта такого оборудования, такие планы, скорее всего, будут пересмотрены. Вероятными альтернативами представляются комплексные решения от HP или IBM. Российская сторона планирует использовать смешанное решение, в котором серверные компоненты будут реализованы на актуальном

поколении серверов HP Blade, а «тонкие» клиентские станции будут специально разработаны с учетом эргономических требований ЦУП. При штатной работе в бездисковом режиме небольшие локальные диски (SSD) позволят выполнять нештатную загрузку терминалов для запуска удаленных сессий к серверам приложений.

В качестве базового средства виртуализации испанской стороной предложен Xen server. Однако по вопросам совместимости хеп-конфигураций для смешанной установки ПО под управлением единого гипервизора стороны пока не пришли к единому мнению.

Таким образом, речь идет прежде всего о независимых установках серверных решений. Испанская сторона в конце 2012 года представила Хеп-реализацию сборки ПО для стендовых испытаний.

НПОЛ планирует в 2015 году организовать поставку в Мадридский университет стендового образца ЦУП согласно разработанному ТЗ на создание учебно-тренировочных средств НКУ и согласованной с испанской стороной спецификации.

На поздних этапах создания ЦУП «СПЕКТР-УФ» будет оснащен средствами коллективного отображения, ip-системами голосовой связи и видеоконференцсвязи. Применительно к российской стороне, значительная часть этого оборудования будет привлекаться функционально из состава базового ЦУП-Л.

4. Наземный научный комплекс

Наземный научный комплекс (ННК), наряду с наземным комплексом управления, входит в состав наземного сегмента ультрафиолетовой космической обсерватории «СПЕКТР-УФ» (ВКО-УФ, WSO-UV). Принципы научной эксплуатации WSO-UV описаны в (*Vallejo J.C. et al.*, 2009). ННК предназначен для формирования программы наблюдений, приема наблюдательной информации с космического аппарата, ее обработки и хранения.

Как показано на рисунке 1, ННК «СПЕКТР-УФ» определен в следующем составе:

- центр обработки научной информации (ЦОНИ);
- аппаратура приема научных данных (АПНД).

4.1. Центр обработки научной информации

ЦОНИ проекта «СПЕКТР-УФ», как и любой центр обработки научных данных, предназначен для сбора, обработки, хранения научной и вспомогательной информации и обеспечения конечных пользователей этой информацией.

В проекте «СПЕКТР-УФ» реализуются два дублирующих друг друга центра – российский (РРЦОНИ) и испанский (ИЦОНИ). РРЦОНИ создается совместно Институтом астрономии РАН (ИНАСАН) и НПО им. С.А. Лавочкина, ИЦОНИ – Университетом Комплутенсе (Мадрид, Испания).

На предыдущих этапах ОКР предполагалось, что участников проекта будет не два, а более пяти. Была принята иерархическая схема, согласно которой в каждой стране создается региональный центр, один из них выполняет функции основного ЦОНИ или просто ЦОНИ. Поэтому слово «региональный» в составе аббревиатуры РРЦОНИ сейчас не несет смысловой нагрузки, однако термин по-прежнему используется в ходе ОКР.

ЦОНИ «СПЕКТР-УФ» осуществляет оперативное управление бортовым комплексом научной аппаратуры (КНА), предварительный анализ научной информации, поступающей с КНА КА «СПЕКТР-УФ», формирование научного архива информации, хранение и передачу данных конечным пользователям. Также в задачи ЦОНИ входит анализ и поддержание функционирования КНА, формирование банка заявок и формирование и утверждение перспективной программы работы целевой аппаратуры и средств обработки, предоставление результатов наблюдений.

На этапе проведения научных наблюдений ЦОНИ принимает с КА научную и телеметрическую информацию, преобразует ее к стандартному научному формату, проводит контроль качества данных, выполняет стандартные калибровки наблюдений, помещает их в оперативные архивы сырых и калиброванных данных, а также ведет журнал наблюдений.

Кроме того, ЦОНИ предоставляет пользователям справочную информацию по научным приборам, их текущему состоянию, программе наблюдений и выполненным наблюдениям.

Для выполнения этих задач в составе ЦОНИ «СПЕКТР-УФ» создаются:

- система подготовки программы наблюдений (СППН);
- система, обеспечивающая управление КНА в процессе выполнения программы наблюдений, – центр управления КНА (ЦУ КНА);
- система обработки научных данных (СОНД).

Эти системы реализуются с использованием ряда вспомогательных систем и сервисов, таких, как административная и справочная программные системы и др. Кроме того, в состав программного обеспечения РРЦОНИ входят ряд служебных программ и утилит: калькулятор экспозиций, калькулятор зоны засветки, мастер-каталог. Более подробно данные системы будут описаны ниже.

Центр обработки научной информации должен удовлетворять следующим требованиям:

- режим работы ЦОНИ – круглосуточный;
- срок эксплуатации ЦОНИ – не менее активного срока существования космической обсерватории с учетом трех дополнительных лет для выполнения ряда задач хранения и распределения информации и поддержки пользователей этой информации.

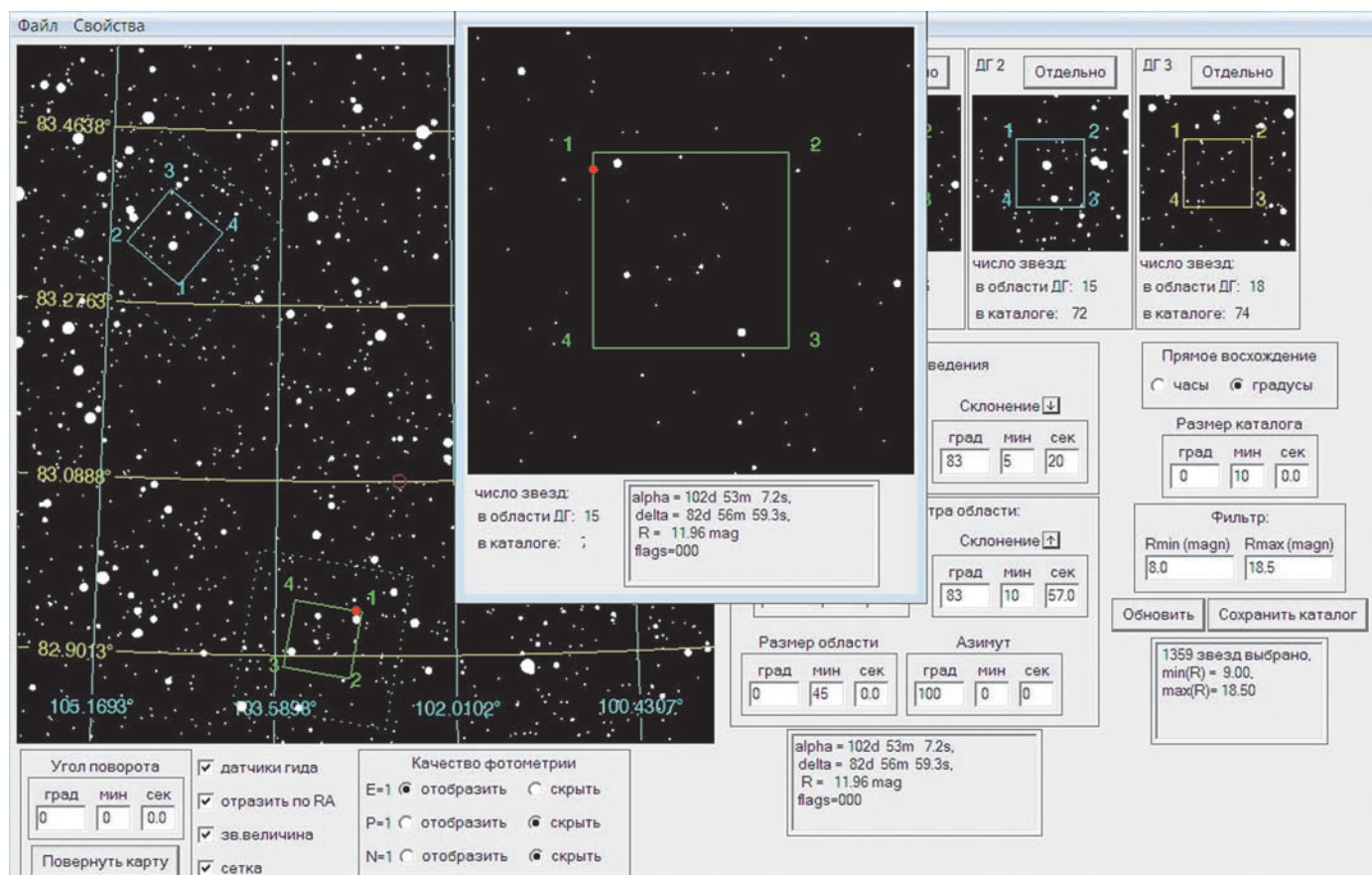


рисунок 5. Пример использования МК при разработке СДГ

Таким образом, ЦОНИ должен представлять собой отказоустойчивую систему, способную работать длительное время без перерыва. Эта задача решается созданием дублированных систем в специально подготовленном помещении. Задачи доставки крупных массивов информации на большие расстояния и работы в режиме «онлайн» решаются использованием высокоскоростных каналов связи с резервированием и соответствующего сетевого оборудования.

Как уже говорилось, представляется рациональным организация единого центра данных проекта (в том числе на базе ЦОД), который будет объединять элементы ЦУП и ЦОНИ с точки зрения хранения информации и предоставления интерфейсов доступа к ней.

Ниже описаны основные составляющие ЦОНИ.

4.1.1. Система подготовки программы наблюдений

Система подготовки программы наблюдений (СППН) обеспечивает сбор и предварительную обработку заявок на наблюдения, подготовку перспективной (полугодовой) программы наблюдений и оперативной (недельной) программы наблюдений. СППН разрабатывается совместно российскими (ИНАСАН и НПО им. С.А. Лавочкина) и испанскими коллективами.

Установлен полугодичный цикл для приема и обработки заявок. Каждая заявка на наблюдения поступает в ЦОНИ, где информация о заявке регистрируется,

проходит научную и первоначальную баллистико-фотометрическую экспертизу и передается в Комитет по распределению времени. После принятия решения о включении заявки в полугодовую программу наблюдений заявка включается в полугодовой перечень заявок, на основании которого позже составляется полугодовая программа наблюдений.

На стадии экспертизы проверяются наличие в заявке всей необходимой информации и корректность предоставляемых параметров. Каждая заявка проходит такое тестирование с помощью служебных программ (см. ниже в этом разделе), что позволяет судить о принципиальной возможности осуществления заявки, а также определить приемлемые варианты проведения наблюдений. После этого заявка помещается в базу данных (как и результаты всех последующих этапов обработки). Здесь же заявки сортируются по категориям (разделам астрономии). Структура базы данных позволяет выбирать информацию о заявленных объектах наблюдений, условиях наблюдений и данных об авторах, а также хранить программу наблюдений и сопроводительные данные. Заявки, прошедшие формальную обработку, реферируются рецензентами. Международный научный комитет по распределению времени на основании рецензий классифицирует заявки, присваивает им приоритеты и дает рекомендации по количеству наблюдаемого времени. После этого формируется программа наблюдений данного цикла.

Принципы подготовки научной программы и схема распределения времени наблюдений на WSO-UV детально описаны в статье (Malkov O. et al., 2014).

4.1.2. Служебные программы СППН

При формировании программы наблюдений необходимо располагать инструментами, позволяющими оценивать возможность и эффективность режима проведения наблюдения того или иного объекта средствами «СПЕКТР-УФ». Для этих целей разрабатываются такие программные продукты, как, например, «Мастер-каталог», «Калькулятор КНА» (калькулятор времени экспозиции) и программа «Зоны засветки» в рамках РРЦОНИ. Кратко опишем каждую из этих систем.

Мастер-каталог. Для отождествления объектов или для наведения на них телескопа заданной точкой фокальной плоскости (например, щелью спектрографа) требуется сеть из звезд с известными на момент наблюдения координатами. В силу небольшого (~3 угловые минуты) размера поля зрения датчика гида (ДГ) эта сеть должна обладать высокой пространственной плотностью. Как показывают оценки, для того чтобы в любой области небесной сферы иметь в поле зрения системы датчиков гида (СДГ), включающей три ДГ, нужное число гидировочных звезд, необходимо иметь список из не менее 250 млн. звезд с максимально точно определенными координатами и распределенными по всему небу.

Такой набор гидировочных звезд обеспечивает «Мастер-Каталог» (МК) «СПЕКТР-УФ». МК обеспечивает достаточное количество звезд в поле зрения ДГ, необходимую точность координат звезд. Координаты объектов МК определены в системе ICRS (International Celestial Reference System), а фотометрическая система максимально приближена к инструментальной системе датчиков гида. МК будет применяться в сегментах наземного научного комплекса «СПЕКТР-УФ» для поиска и выбора гидировочных звезд при наблюдении программных объектов на стадиях подготовки, планирования и проведения наблюдений. МК снабжен специализированным интерфейсом, обеспечивающим удобное взаимодействие пользователя с данными каталогом. ПО предназначено для визуализации, фильтрации, выбора и сохранения объектов небесной сферы, наблюдаемых в поле зрения при заданной ориентации телескопа.

К настоящему времени разработана первая версия МК, которая уже используется для разработки датчиков гида при тестировании этих приборов на реальном небе или на специальном стенде. На рисунке 5 показан пример использования МК для разработки системы ДГ. В графическом окне ПО МК можно видеть карту неба, построенную по заданным параметрам выборки (центр и размер области, глубина, отображение звезд с некачественной фотометрией)

с нужными деталями визуализации – отображение сетки, контуров ДГ, точки наведения, способ изображения звезд, направление оси прямого восхождения, поворот карты. Области зрения каждого ДГ показаны также в отдельных окошках, которые можно представить в увеличенном масштабе, что продемонстрировано на примере ДГ1. В ПО заложены функции сохранения данных и получения информации о выделенной звезде.

Зоны засветки. Для составления оптимальной программы наблюдений на «СПЕКТР-УФ» необходимо, в частности, знать, какие области небесной сферы доступны для наблюдения в любой данный момент времени. Существует ряд факторов, ограничивающих доступность участков небесной сферы для наблюдения. Есть ряд ограничений, определенных технологическими особенностями КА. Есть также факторы природного характера. Самым важным таким фактором, ограничивающим возможные зоны наблюдения слабых объектов, т.е. подавляющего большинства источников на небесной сфере, является рассеянный свет в телескопе от Солнца, Земли и Луны. Чтобы учесть ограничения, накладываемые рассеянным светом от этих источников, создано ПО «Зоны засветки» или «Калькулятор зоны засветки» (ЗЗ).

Входными параметрами в ПО ЗЗ являются:

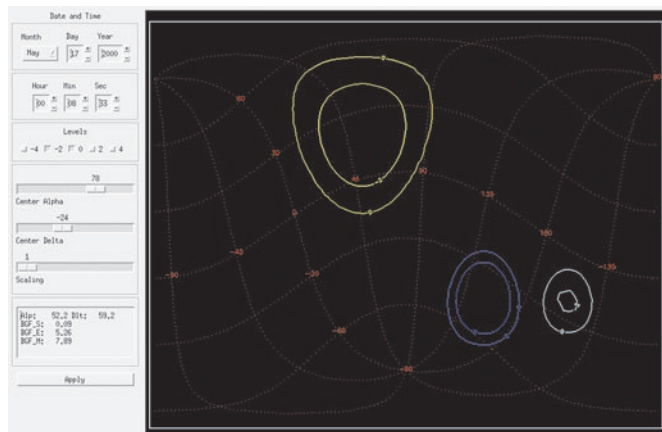
- координаты объекта;
- желаемая дата наблюдений.

Результат – простой сигнал возможности (или невозможности) провести наблюдение в данную дату.

Программа разрабатывается в первую очередь для использования в рамках СППН, но ее также планируется использовать как отдельный программный продукт, позволяющий пользователям, желающим подать заявку на наблюдения, самим провести предварительную оценку возможности проведения наблюдений на обсерватории «СПЕКТР-УФ».

Современная версия программы реализована на языке IDL (Interactive Data Language) с использованием объектно-ориентированного подхода. ООП существенно повышает уровень унификации разработки и пригодности для повторного использования. Процедура оценки вклада Солнца, Земли и Луны в рассеянный свет в фокальной плоскости телескопа Т-170М проводится для заданного момента времени на основании вычисленных потоков от указанных светил и модели рассеяния света в телескопе. Для определения потока излучения от источника засветки в фокальной плоскости телескопа рассчитывается поток, приходящий на входное отверстие телескопа, с использованием сведений об угловом положении источника относительно направления оси телескопа, расстоянии от космического аппарата до источника засветки, фазы источника засветки и его блеска. Сигнал, создаваемый потоком рассеянного света на при-

емнике излучения, не должен превышать предельные значения, зависящие от чувствительности данного приемника. Исходя из этого критерия находят критический или предельно допустимый (в смысле наименьший) угол между главной оптической осью и направлением на засвечивающий источник. Внутри области небесной сферы, определяемой критическим углом, проводить наблюдения нецелесообразно. Интерфейс программы представлен на рисунке 6.



Желтым цветом на небесной сфере показана область засветки, создаваемая Солнцем (при значениях предельно допустимых потоков рассеянного света), синим – Земли и белым – Луны.

рисунк 6. Интерфейс программы вычисления зон засветки

Калькулятор КНА. ПО «Калькулятор КНА» имитирует наблюдения с использованием комплекса научной аппаратуры. Основная задача разработки данного ПО – предоставить астроному программный инструмент, позволяющий рассчитать основные характеристики, необходимые для выполнения заявки (или понять, что заявка не выполнима). Заявки на наблюдения на данном научном приборе должны включать значения двух из следующих параметров:

- звездная величина объекта (также указывается, в какой фотометрической полосе определена звездная величина, или – для звезды – указывается спектральный класс);
- время экспозиции;
- отношение сигнал/шум (С/Ш).

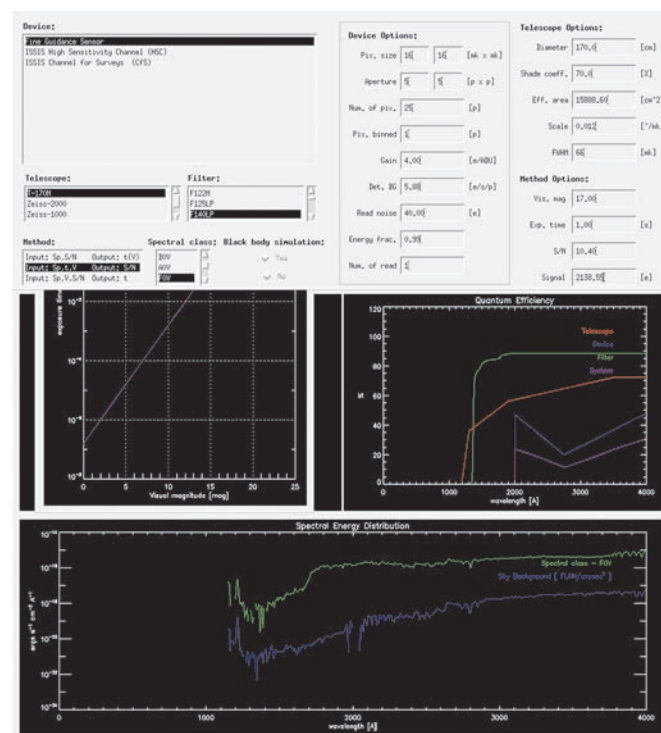
ПО позволяет рассчитать любой из этих параметров, если заданы два других. В случае если определяемым параметром является звездная величина, результатом будет максимальное значение звездной величины (т.е. минимальный блеск) объекта, которое достижимо при заданном времени экспозиции и при отношении С/Ш не хуже заданного.

Еще один важный входной параметр – желаемая дата наблюдения. В ряде задач значение этого параметра нельзя изменить (например, наблюдается событие, происходящее только в определенное время).

Данное ПО разумно использовать только после того, как получен положительный результат на выходе программы «Зоны засветки». Обе программы являются ядром комплекса программ баллистико-фотометрической экспертизы (БФЭ), в который также входят блоки, отслеживающие все технологические и другие ограничения. БФЭ является важным инструментом как для тех, кто направляет заявку в Программный комитет проекта, так и для экспертов, работающих в проекте и создающих оптимальные оперативные программы наблюдений.

Важные параметры – характеристики научных приборов (каналов), которые не задаются наблюдателем, а заранее определяются в наземных тестах и в полетных калибровках. Для любого научного прибора, на котором проводится наблюдение, помимо него самого, в расчете учитывается и оптический тракт телескопа. Создание и поддержание таких (математических) моделей научных приборов – важная задача на все время эксплуатации обсерватории.

ПО «Калькулятор КНА» разрабатывалось для использования в рамках системы подготовки программы наблюдений (СППН), а также как самостоятельный программный продукт, который предполагается сделать доступным для широкой общественности. Это позволит пользователям, желающим подать заявку на наблюдения, самим провести предварительную оценку возможности получения требуемых данных при помощи научного оборудования «СПЕКТР-УФ». Текущая версия программы реализована на языке IDL (Interactive Data Language) с использованием объектно-ориентированного подхода. На рисунке 7 показан интерфейс программы.



рисунк 7. Интерфейс программы «Калькулятор КНА»

4.1.3. ЦУ КНА

Система ЦОНИ, обеспечивающая управление КНА в процессе выполнения программы наблюдений, реализована в виде вынесенного в ЦУП программно-аппаратного комплекса. Такая система имеет наименование «Центр управления КНА». Данная конфигурация зеркально отражает аналогичное решение, реализованное испанской стороной в рамках концепции единого наземного сегмента, где ЦОНИ и ИЦУП целиком реализованы в едином организационно-технологическом ключе. Основными преимуществами тесной интеграции ННК с НКУ в данной точке являются:

- возможность сквозного учета технологических ограничений при формировании массивов КПИ на работу КНА;
- отсутствие необходимости передачи форм обмена;
- использование единого реляционного хранилища;
- работа с исходными данными единого формата;
- единая технология внесения и наземной регистрации изменений в бортовое ПО как служебных, так и целевых систем;
- единая организационная система формирования всего массива КПИ.

Исходя из того, что рабочая программа, как было показано выше, проходит значительный объем целевой валидации, дальнейший процесс ее «превращения» в МКПИ несет детерминированный характер и зависит только от технологии работы БКУ с КНА и успешно сопровождается специалистами, работающими в ЦУП. Основой аппаратной реализации ЦУ КНА являются типовые клиент-серверные решения ЦУП. В основу программного обеспечения ЦУ КНА ложится имеющаяся в составе программной платформы ЦУП-Л комплекс текстово-ориентированного описания программы работы бортовой аппаратуры «MOON». В ходе ОКР будет сделана его специальная редакция, разработаны аппаратно-зависимые модули.

Конструкция этого ПО является универсальной и, как следствие, достаточно сложной и включает в себя конвейерную цепочку из следующих элементов:

- среда подготовки данных сеансов связи;
- разборщик данных (парсер);
- валидатор данных;
- препроцессор и компилятор-упаковщик;
- различные модули импорта и экспорта как реляционных, так и бинарных данных.

Использование разных вариантов тех или иных элементов конвейера может различаться для разных потребителей – представителей научного сообщества, персонала ЦОНИ, планировщика ЦУП. Возможность замены какого-либо элемента обеспечивается современными механизмами обмена данными внутри ПО с использованием структурированных описаний Protocol Buffers или XML.

На рисунке 8 показан внешний вид среды подготовки данных сеанса связи на примере одного из имеющихся КА на платформе «НАВИГАТОР».

4.1.4. Система обработки научных данных

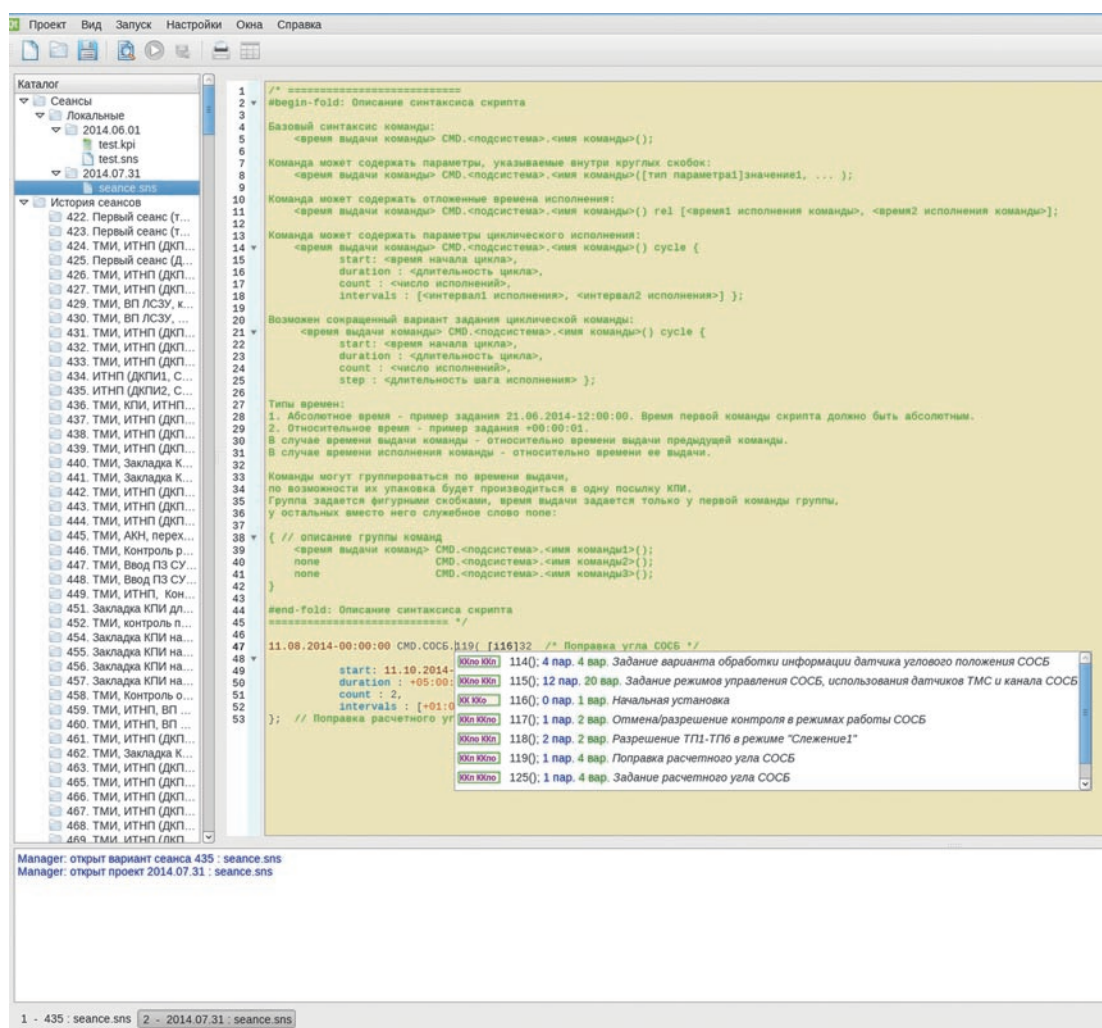
Система обработки научных данных (СОНД) предназначена для сбора, обработки, анализа, архивирования и распространения полученной научной информации. Это важная система разрабатывается при участии изготовителей основных инструментов обсерватории: БКП и БС. Для каждого из научных приборов (каналов) создается автоматизированная система обработки данных (конвейер). Такие системы обработки данных для каждого прибора составляют ядро программного ПО СОНД. ПО ориентировано на потоковую обработку данных по мере их получения с КА, не требующую вмешательства пользователя.

Помимо случайных ошибок, влияющих на статистику отсчетов на изображении спектра или прямом изображении участка неба, приемники излучения (ПИ) имеют ряд инструментальных эффектов, значимо снижающих точность измерений. К ним относятся: неоднородность чувствительности ПИ и неоднородность тока смещения, темновой ток, нелинейность приемника, позиционная нестабильность приемника, чувствительность ПИ к высокоэнергетичным космическим частицам. Все это должно быть учтено при создании ПО. Астроном, чья заявка реализована на обсерватории ВКО-УФ, получает данные (спектры или прямые изображения участков неба), обработанные с помощью такого ПО. Кроме того, всем заявителям, чья заявка исполнена, будут доступны необработанные и калибровочные данные для самостоятельной обработки наблюдений, если по каким-либо причинам результаты стандартной обработки покажутся заявителю неудовлетворительными. Это обычная практика работы наземных обсерваторий. Как правило, 95% астрономов используют в работе автоматизированные системы обработки, созданные разработчиками инструментов.

4.2. Технические средства ННК

К техническим средствам ННК относятся:

- аппаратура приёма научных данных (АПНД);
- аппаратура ЦОНИ:
 - дисковые массивы для системы хранения научных данных, серверы хранения, обработки и доступа к данным, в их числе – серверы СППН, СОНД,
 - стационарные и мобильные рабочие станции персонала ННК, включая периферийное оборудование рабочих станций,
 - источники бесперебойного электропитания для активного сетевого оборудования, дисковых массивов, серверов и стационарных рабочих станций,



рисунк 8. Среда подготовки командных массивов из состава ЦУ КНА

- системы голосовой и видеоконференцсвязи,
- внутренние линии связи и аппаратура выхода в систему связи и передачи данных (ССПД).

Аппаратура приёма научных данных (АПНД) обеспечивает автоматизированный постоянный прием, передачу и воспроизведение телеметрической информации, её привязку по времени, регистрацию и временное хранение.

Приём телеметрии происходит с КА «СПЕКТР-УФ», находящегося на 24-часовой геосинхронной орбите (Шейхет А.И. и др., 2014), осуществляется с помощью наземных станций. Это могут быть как станции НКУ (при наличии временного ресурса), так и отдельно привлекаемые станции АПНД, не участвующие в работе по реализации сеансов связи с КА. Применительно к российским средствам в качестве АПНД могут быть задействованы станции, находящиеся на ПЭ «Медвежьей Озера» и ПЭ «Калязин» с антенными системами ТНА-57 или ТНА-1500. Однако использование их в данном качестве зависит от общей загруженности и может быть экономически невыгодным.

Испанская сторона планирует использовать специально выделенный комплект АПНД. Время, необходимое для передачи содержимого бортового ЗУ, составляет не менее 20 часов в сутки, что делает использование выделенных средств АПНД обязательным. В зависимости от баллистической схемы проекта, число таких обязательных выделенных станций может быть более одной.

Как показывают оценки, для уверенного и качественного приема научной информации с КА «СПЕКТР-УФ» диаметр приемной антенны может быть вполне умеренным (не более 10 м), т.е. можно использовать серийные изделия.

В процессе работы АПНД будет обеспечивать приём с КА телеметрической информации со скоростями 1, 8, 32, 512, 1024, 2048 кбит/с в X-диапазоне и её передачу в наземный сегмент в темпе приёма, а также хранение и воспроизведение (по запросу) принятой информации не менее одного месяца, привязку ко времени с точностью не хуже 0.001 с. Для станций АПНД стандартным протоколом наземного информационного взаимодействия является SLE, отложенная реализация которого входит в технический задан НПО им. С.А. Лавочкина.

5. Система связи и передачи данных

ССПД объединяет составные части наземного сегмента проекта «СПЕКТР-УФ» в единое целое. В нее включены:

- последняя миля (термин, применяемый для названия канала от оператора связи до конечного оборудования) ЦУП-Л, основной канал, 2 Мбит/с; туннельные интерфейсы с ЦУП-М, ИНАСАН, станциями, ЦОД; выделенный канал с БЦ ИПМ;
- последняя миля сети для БЦ ИПМ, 512 кбит/с;
- последняя миля ЦУП-Л, резервный канал, 2 Мбит/с; канал VPN до ИЦУП, ЦОД;
- последняя миля Мадридского ЦУП; туннельные интерфейсы с ЦОД, ЦУП-Л;
- последняя миля для ЦОНИ, 2 Мбит/с;
- линия связи: ЦУП-Л – станции типа «СПЕКТР-Х». Могут быть использованы имеющиеся тракты передачи данных из состава ГОС НАКУ;
- средства ССПД ЦОД – в случае привлечения;
- активное и пассивное сетевое оборудование, не входящее в состав объектов наземного сегмента.

ССПД также будет являться средой для передачи голосового трафика. Все голосовые данные (циркуляр) будут записываться с привязкой по времени и метаданным полета для будущего использования и воспроизведения. Записанные данные архивируются.

Применяемые технические средства (оборудование линий связи) включают в себя пассивное и активное оборудование для структурированных кабельных сетей – кабели связи, кабельные каналы, сетевые коммутаторы и сетевые маршрутизаторы. С целью выполнения требований надежности и масштабируемости технические решения для линий связи, системы хранения данных и серверов выполняются с необходимым уровнем резервирования и обеспечивают быстрое развертывание сервисов на основном и резервном оборудовании. С целью выполнения требований информационной безопасности в технических решениях для линий связи используются защищенные виртуальные сети и защищенные протоколы связи.

заключение

Для эффективного выполнения научной программы проекта ВКО-УФ («СПЕКТР-УФ») НПО им. С.А. Лавочкина и ИНАСАН совместно с испанскими коллегами из университета Комплутенсе Мадрида и компании GMV ведут масштабную работу по созданию распределенного российско-испанского наземного сегмента проекта в рамках соглашения между Федеральным космическим агентством (Роскосмос) и Центром развития промышленных технологий Испании (CDTI). Такой подход к работе над наземным сегментом является для обеих сторон новым. Он

позволяет российским специалистам хорошо ознакомиться с системой международных стандартов и рекомендаций CCSDS и ECSS, а также провести критический анализ их применимости в условиях реального совместного проекта. Европейские специалисты имеют возможность обогатить свой опыт межагентского взаимодействия как на техническом, так и на организационном уровне.

Имеющаяся практика такого взаимодействия при управлении, например, проектом IUE (19 лет на орбите) показала возможность экономии затрат на эксплуатацию за счет регулярной передачи управления между НАСА и ЕКА, что позволяло обходиться минимальным составом квалифицированных специалистов дежурных смен. Создание интегрированных систем наземного сегмента с максимальной прозрачностью и совместимостью позволит рассмотреть такой подход и к управлению КК «СПЕКТР-УФ».

список литературы

Рекомендации ECSS: Наземные системы и управление. Часть 1: Основные принципы и требования. ECSS-E-70 Part1A. 25.04.2000. 173 с.

Шейхет А.И., Корноухов В.С., Мошнеев А.А., Погодин А.В. Выбор начальных параметров рабочей орбиты космического аппарата «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 20-23.

Шустов Б.М., Боярчук А.А., Сачков М.Е., Мошнеев А.А. и др. Космические перспективы изучения ультрафиолетовой Вселенной: проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 4-15.

Malkov O., Sachkov M., Shustov B. et al. Scientific program construction principles and time allocation scheme for the World Space Observatory – Ultraviolet mission // Astrophysics and Space Science. 2014. 335. P. 323-327.

Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I. WSO-UV project // Advances in Space Research. 2014. 53. P. 990-995.

Sachkov M., Shustov B., Savanov I., Gromez de Castro A.I. WSO-UV project for high-resolution spectroscopy and imaging // Astronomische Nachrichten. 2014. 335. P. 46-50.

Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al. WSO-UV progress and expectations // Astrophysics and Space Science. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-2119-0.

Vallejo J.C., Lozano J.M., Vazquez R. et al. Planning and Scheduling Systems Within the WSO-UV Observatory // ASTRONOMICAL DATA ANALYSIS SOFTWARE AND SYSTEMS XVIII Book Series: Astronomical Society of the Pacific Conference Series. 2009. 411. P. 523-526.

Статья поступила в редакцию 02.10.2014 г.

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ТЕЛЕСКОПА T-170M

SPECIAL FEATURES OF T-170M TELESCOPE'S STRUCTURE

А.А. Моисеев¹,
кандидат
технических наук,
moisheev@laspace.ru;
A.A. Moisheev

М.Ф. Ильясов¹,
mansur@laspace.ru;
M.F. Ilyasov

А.В. Зверев¹,
zverev@laspace.ru;
A.V. Zverev

Е.В. Рыков¹,
boomer8@yandex.ru;
E.V. Rykov

С.В. Алексеев¹,
кандидат
технических наук,
nio27@laspace.ru;
S.V. Alekseev

Кратко описана реализация основных конструктивных элементов телескопа T-170M проекта «СПЕКТР-УФ», рассмотрены основные схемы решения задач по обеспечению стабильности конструкции и сохранности качества телескопа при наземной эксплуатации.

Ключевые слова:
космический телескоп;
оптические и механические элементы телескопа;
размерная стабильность конструкции.

ВВЕДЕНИЕ

Телескоп T-170M (рисунок 1) является основным научным прибором космического аппарата «СПЕКТР-УФ» (WSO-UV). Он устанавливается на базовом модуле «НАВИГАТОР» через ферменный 16-стержневой адаптер.

В процессе лётной эксплуатации телескоп может иметь ориентацию по отношению к Солнцу:

- вокруг оси X – $\pm 15^\circ$;
- вокруг оси Y – $+60^\circ \dots -90^\circ$.

Основное назначение конструкции телескопа T-170M:

- фиксация заданного положения элементов оптической системы и целевой аппаратуры от этапа наземной юстировки до этапа лётной эксплуатации включительно;
- обеспечение заданных светотехнических характеристик оптического тракта телескопа на этапе лётной эксплуатации (Боярчук А.А., Моисеев А.А., 2013);
- обеспечение заданного температурного режима элементов оптического тракта, целевой и служебной аппаратуры и конструкции телескопа на этапе лётной эксплуатации;
- защита элементов оптической системы, научной и служебной аппаратуры от молекулярного и пылевого загрязнений на всех этапах эксплуатации.

A brief description of «SPEKTR-UF» T-170M telescope main structural elements' implementation is presented. Also principal engineering solutions on the structural stability are described as well as the telescope quality preservation during ground operations.

Key words:
space telescope;
the telescope optical and mechanical elements;
structure's dimensional consistency.

1. О мерах, обеспечивающих размерную стабильность элементов телескопа T-170M

Задача фиксации заданного положения элементов оптической системы телескопа и целевой аппаратуры от этапа наземной юстировки до этапа лётной эксплуатации включительно решается путем использования в силовой схеме телескопа статически определимых схем механических интерфейсов для сборки прецизионных элементов. Исключением из этого правила является установка модуля вторичного зеркала, но данный блок имеет собственный механизм юстировки.

Основным несущим элементом телескопа, предназначенным для установки оптических элементов, прецизионных узлов и научной приёмной аппаратуры, служит рама узла главного зеркала (рисунок 2).

Рама цельнолитая, выполнена из литейного сплава АЛ-19 и механически обработана. Дополнительным фактором, усложняющим проектирование конструкции в части закрепления рамы на шпангоуте узла главного зеркала, является температурный фактор. Имеется ввиду, что, по условиям эксплуатации, для обеспечения размерной стабильности конструкции, температура рамы узла главного зеркала на этапе лётной эксплуатации должна иметь то же значение, что и при наземной эксплуатации на этапе юстировки.

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.



рисунок 1. Общий вид телескопа

оптической системы телескопа. Это позволяет максимально сохранить положение прецизионных узлов и элементов, установленных на раме, относительно положения, полученного при юстировке телескопа. В то же время температура шпангоута узла главного зеркала после выведения на орбиту может опуститься до значений минус 70°C , что приводит к «усадке» шпангоута по диаметру до 6 мм.

Если не предпринимать никаких специальных мер, то, во-первых, мощный шпангоут, «усаживаясь», будет обжимать раму узла главного зеркала. Это приведёт к возникновению в теле рамы «паразитных» напряжений, что недопустимо для прецизионных

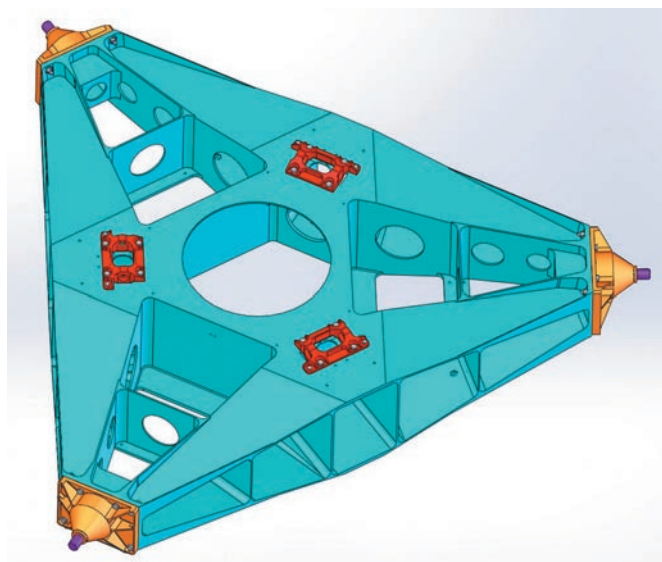


рисунок 2. Рама узла главного зеркала

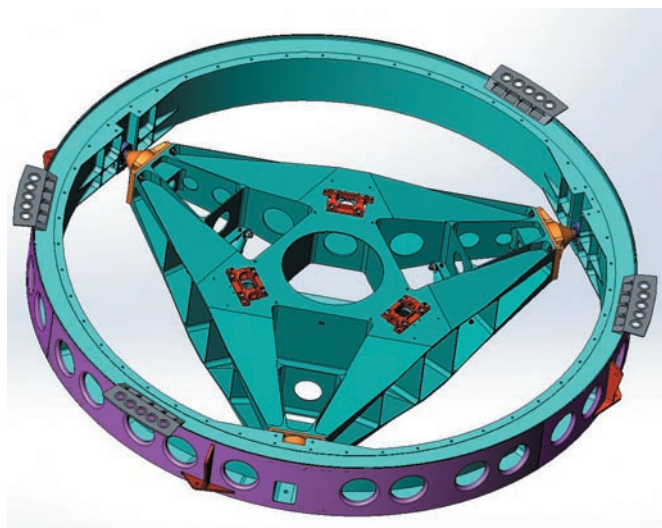


рисунок 3. Установка рамы узла главного зеркала на шпангоут

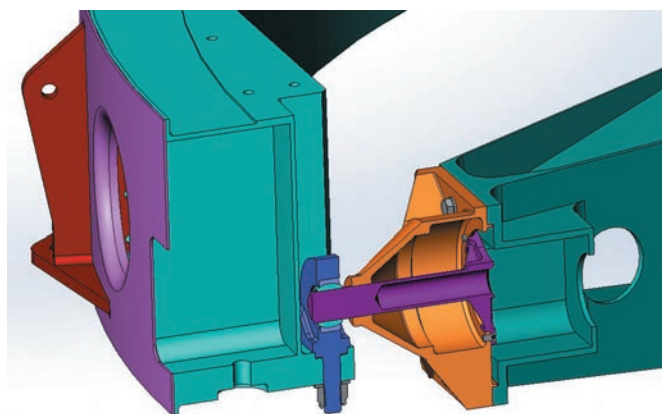


рисунок 4. Узел подвески рамы узла главного зеркала

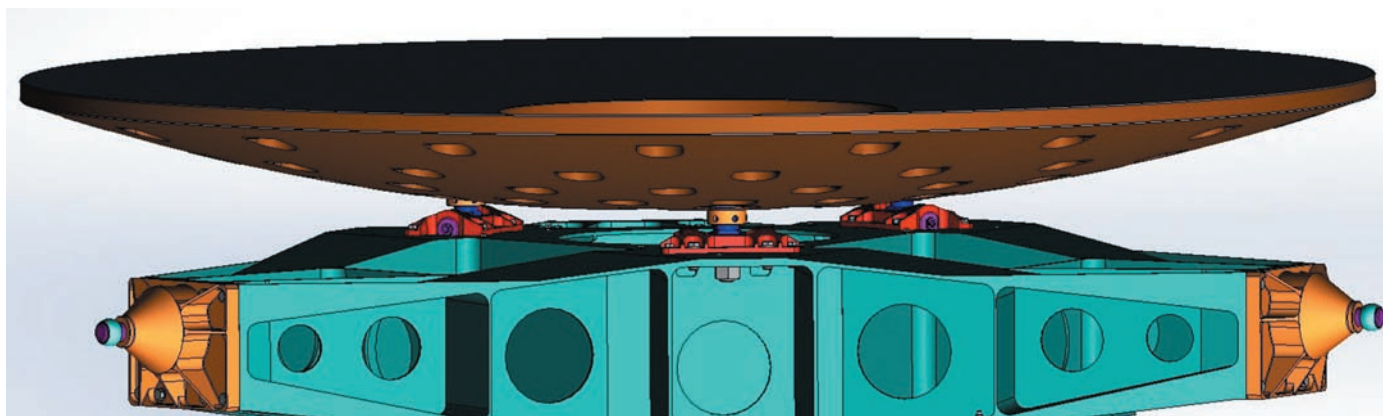


рисунок 5. Установка главного зеркала на раму

конструкций; во-вторых, холод будет «перетекать» с шпангоута на раму и нарушать её температурный режим.

Для исключения подобного воздействия шпангоута на раму её установка (рисунок 3) осуществляется через установленные на торцах рамы интерфейсные элементы (рисунок 4), предназначенные для статически определимого закрепления между шпангоутом и рамой и минимизации перетекания тепловых потоков между ними.

Интерфейсный элемент рамы представляет собой тонкостенный корпус изготовленный из титана, обладающего хорошим термическим сопротивлением, шкворня из легированной стали, хорошо развязанного по температуре с рамой, и плавающего шарнирного узла, установленного в нише шпангоута узла главного зеркала.

На верхней грани рамы узла главного зеркала устанавливается основной элемент оптической системы телескопа – главное зеркало (рисунок 5).

Установка осуществляется при помощи трёх шарнирных узлов, обеспечивающих статическую определимость конструкции и, соответственно, отсутствие внутренних напряжений.

Установка главного зеркала на шарнирных узлах осуществляется с помощью трёх интерфейсных элементов (рисунок 6), вклеенных в массив зеркала с тыльной стороны.

Для исключения воздействия внутренних напряжений, возникающих в массиве зеркала при вклейке интерфейсных элементов, на форму оптической поверхности окончательную доводку оптической поверхности осуществляют после вклейки интерфейсных элементов и окончания процесса полимеризации клеевого слоя.

На нижней грани рамы узла главного зеркала статически определимо установлен фокальный узел (рисунки 7, 8) комплекса научной аппаратуры. Подвеска фокального узла выполнена в виде шестистержневой системы (гексапода). Каждый из стержней име-

ет «тонкую» регулировку длины (0,5 мм на один полный оборот центральной втулки), что позволяет с высокой точностью выставить фокальный узел в оптический тракт телескопа. Диапазон регулировки по оси X составляет ± 20 мм, по осям Y и Z диапазон регулировки составляет ± 7 мм.

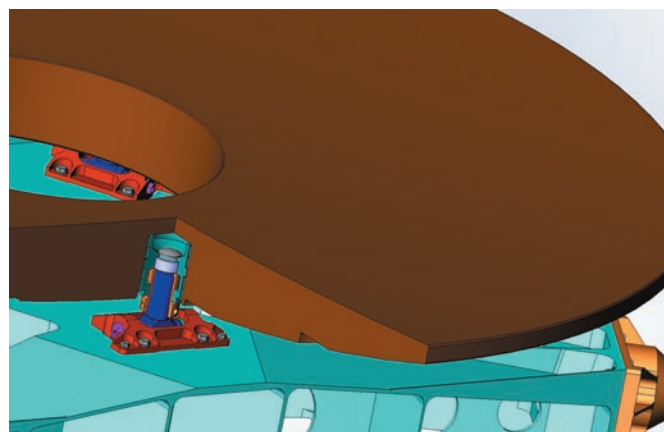


рисунок 6. Интерфейсный элемент главного зеркала

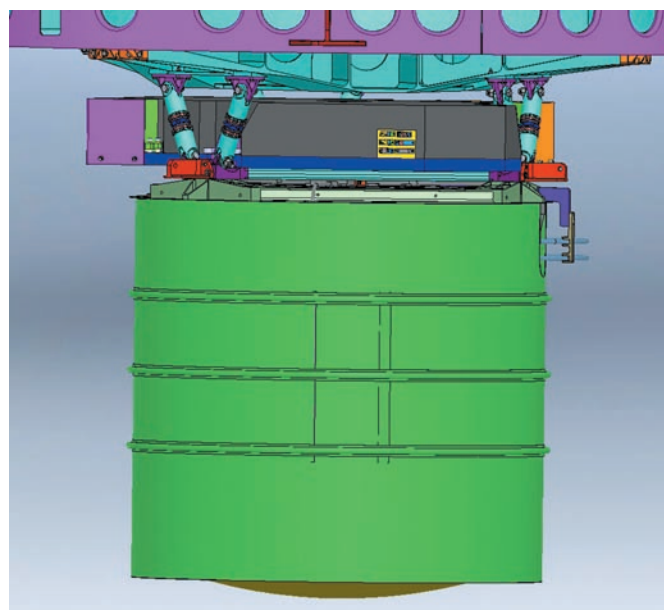


рисунок 7. Подвеска фокального узла

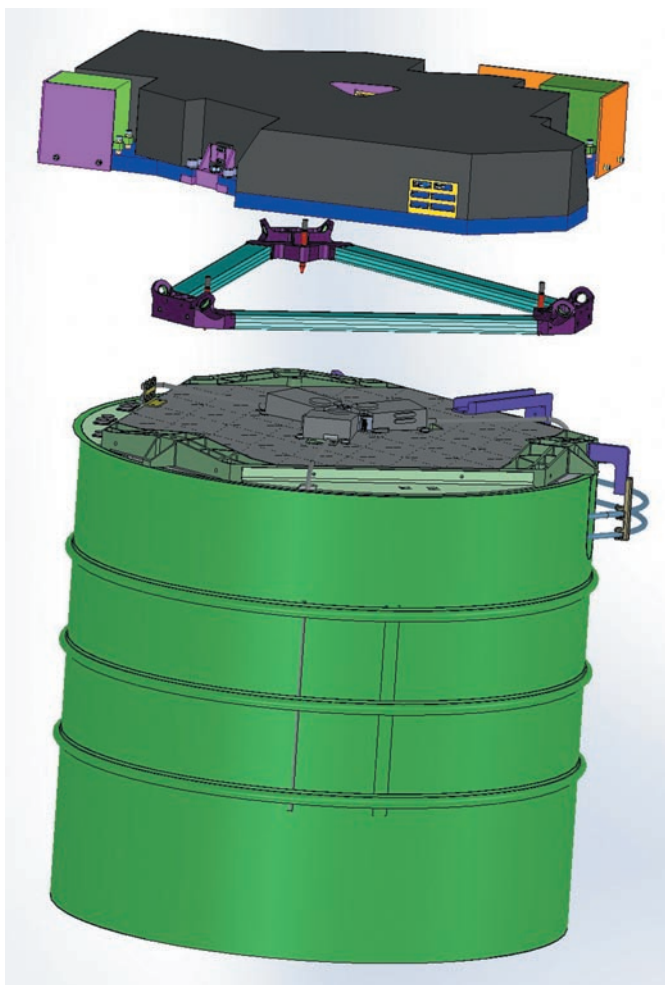


рисунок 8. Фокальный узел. Объект стыковочных испытаний (ISSIS STM макет, ГММ ОМБ БС и оптическая скамья)

Основным несущим элементом фокального узла является оптическая скамья телескопа (рисунок 9). Скамья изготавливается из размеростабильного сплава 32НХД (Инвар).

Сверху на оптической скамье устанавливается блок камер поля ISSIS (Испания). Закрепление блока на трёх шпильках оптической скамьи осуществляется через три втулки (рисунок 10), закреплённые через мембрану на интерфейсных элементах ISSIS.

На нижний интерфейс оптической скамьи устанавливается оптико-механический блок спектрометра.

Оптическим интерфейсом спектрографа являются три входных отверстия (щели). Для того чтобы точно удерживать «звезду на щели», рядом с каждой щелью установлен датчик гида (рисунок 11), ПЗС-матрица которого вплотную прилегает к конструкции щели.

Такое размещение датчика гида позволяет получать чёткие изображения и спектры.

Кроме прецизионных агрегатов, на раму узла главного зеркала устанавливаются бленда главного зеркала, бленда фокального узла и средства обеспечения температурного режима главного зеркала.

Такое конструктивное решение, когда все элементы, требующие прецизионной установки, собираются на одном силовом элементе (рисунок 12), позволяет получить сборку высокой жёсткости и размерной стабильности.

Есть ещё один элемент оптической системы, требующий высокой точности и точности и стабильности положения относительно главного зеркала телескопа и приборов фокального узла – это вторичное зеркало, входящее в состав модуля вторичного зеркала (МВЗ).

Модуль вторичного зеркала (рисунок 13) телескопа Т-170М, обеспечивает его фокусировку и юстировку в составе комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ».

В состав МВЗ телескопа Т-170М входят:

- вторичное зеркало (ВЗ) в оправе;
- механизм фокусировки;
- механизм юстировки;
- бленда;
- спайдер;
- нагреватель;
- теплозащитный кожух.

Оправа вторичного зеркала (рисунок 14) обеспечивает сохранность формы рабочей поверхности зеркала при операции юстировки телескопа и механическую сохранность при воздействии нагрузок на всех этапах наземной отработки, транспортировки и выведения на орбиту.

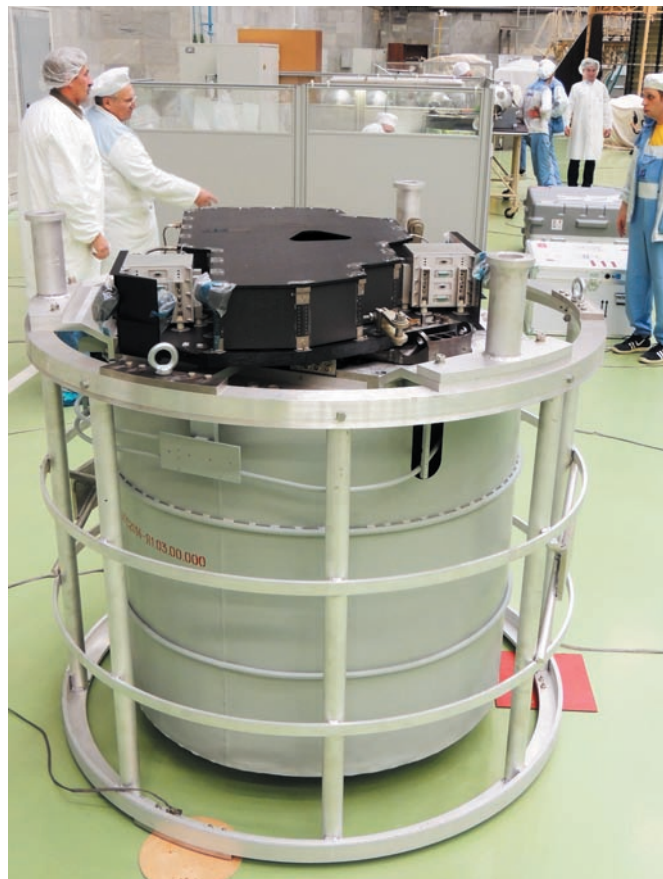


рисунок 9. Разнесённый вид: блок камер поля, оптическая скамья и оптико-механический блок спектрографа

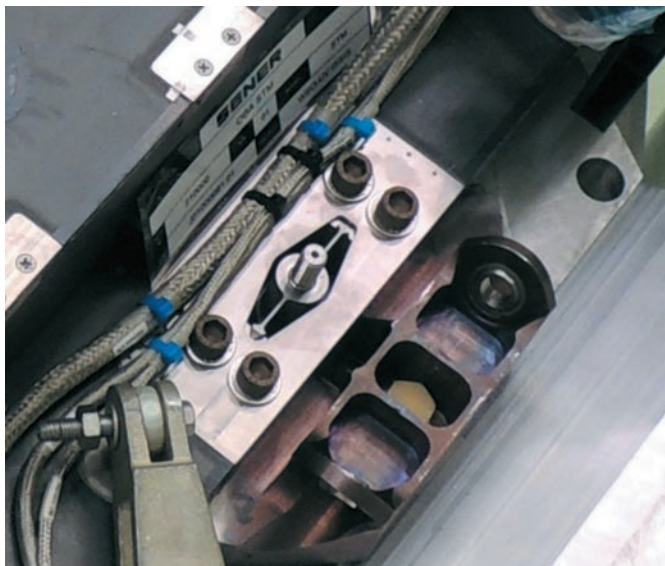


рисунок 10. Механический интерфейс ISIS

Механизм фокусировки MB3 обеспечивает линейные перемещения ВЗ вдоль продольной базовой оси X телескопа Т-170М.

Механизм юстировки MB3 обеспечивает линейные перемещения ВЗ в плоскости, параллельной базовой плоскости телескопа «YOZ», и угловые перемещения ВЗ относительно базовых осей Y и Z телескопа при его юстировке.

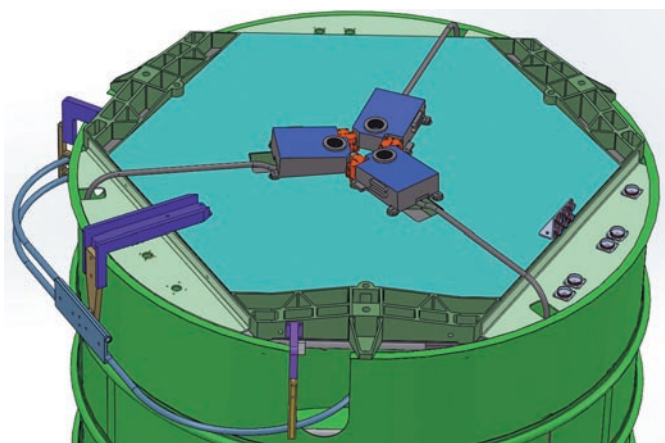


рисунок 11. Установка датчиков гида на спектрограф

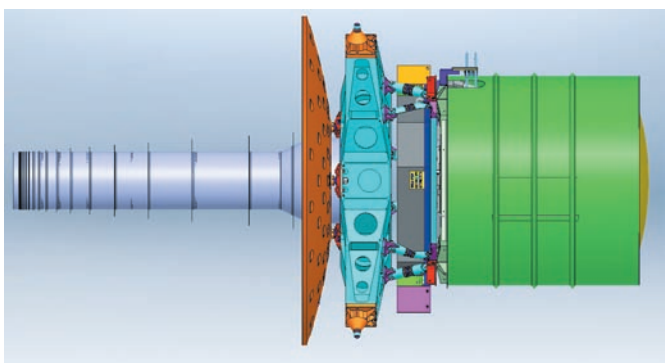


рисунок 12. Прецизионная сборка на раме узла главного зеркала

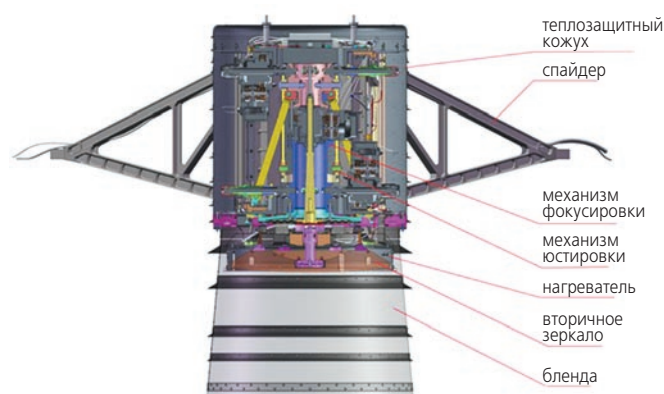


рисунок 13. Модуль вторичного зеркала

Создать многозвенную прецизионную конструкцию длиной около четырёх метров, которая сохраняла бы положение вторичного зеркала (после юстировки телескопа) на этапах наземной эксплуатации (в первую очередь транспортные операции и тяжелые работы), после этапа выведения на рабочую орбиту и на этапе летной эксплуатации очень сложно. В телескопе Т-170М эта задача решается следующим образом:

- для устранения гравитационных деформаций, возникающих при юстировке оптической системы, полученных при транспортно-тяжелых операциях и деформаций, а также на этапе выведения на рабочую орбиту используется механизм юстировки и фокусировки модуля вторичного зеркала;
- для минимизации деформаций, возникающих на этапе летной эксплуатации, используются материалы с низким коэффициентом линейного температурного расширения (в первую очередь такие материалы, как инвар и материалы, композиция свойств которых позволяет получить конструкцию с малым откликом на изменение собственной температуры).

Характерный пример размеростабильной конструкции – тубус телескопа (рисунок 15). Силовым элементом этой сборки являются шестнадцать стрингеров из углепластика. Количество слоёв и схема их армирования рассчитаны таким образом, что коэффициент линейного расширения получился отрицательным, т.е. при охлаждении стрингер удлиняется, в то время как все «нормальные» материалы в этих условиях укорачиваются. Наряду с этим обшивка тубуса, выполненная из сплава АМг-6, имеет положительный коэффициент линейного расширения. В результате, когда температура конструкции тубуса понижается, обшивка старается «съжаться», а стрингеры стараются «растянуть» эту обшивку. Площадь сечения по обшивке гораздо больше, чем у стрингера, поэтому жёсткость обшивки искусственно снижена путем поперечного гофрирования, что позволяет «уравнять»

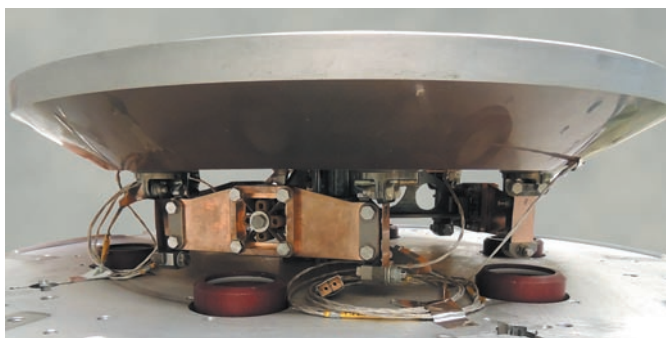


рисунок 14. Вторичное зеркало в оправе



рисунок 15. Тубус

возникающие силы и в результате получить размеростабильную конструкцию, не чувствительную к изменению температуры.

Таким образом, задача обеспечения размерной стабильности конструкции телескопа решается путем установки всех агрегатов, требующих размерной стабильности, на одном базовом элементе, в нашем случае на раме узла главного зеркала, а замыкающий размерную цепочку элемент (МВЗ) имеет возможность «поправить» взаимное положение ГЗ и ВЗ уже на орбите.

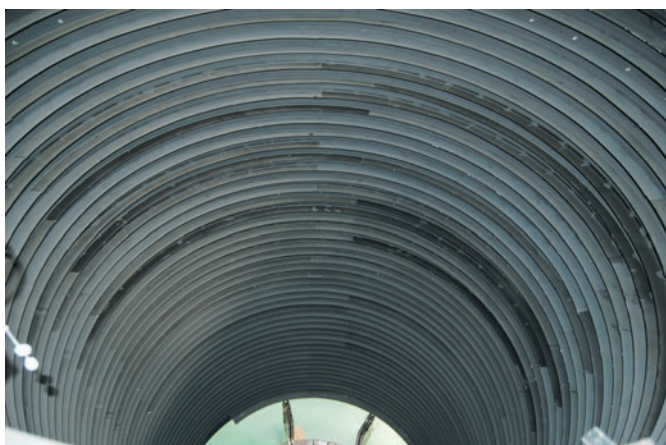


рисунок 16. Диафрагмы тубуса



рисунок 17. Бленда наружная

2. Светотехнические характеристики

Светотехнические характеристики телескопа обеспечиваются установкой на поверхности тубуса (рисунок 16), бленды наружной (рисунок 17), бленды главного зеркала (рисунок 18) и бленды фокального узла диафрагм. В качестве оптического покрытия конструкции используется лакокрасочное покрытие AEROGLAZE Z-307 и гальваническое покрытие «чёрный хром» – внутри комплекса научной аппаратуры.

3. Обеспечение необходимого температурного режима

Необходимый температурный режим обеспечивается пассивными и активными системами терморегулирования, к которым относятся экранно-вакуумная теплоизоляция, нагреватели и теплоизлучающие поверхности.

4. Защита от молекулярного и пылевого загрязнения

Защита от молекулярного и пылевого загрязнения осуществляется за счёт следующих мероприятий:

- использование для конструкций телескопа материалов с низким уровнем газовыделения;
- использование в качестве оптического и защитного покрытия краски с низким газовыделением;
- герметичное исполнение конструкции телескопа.



рисунок 18. Бленда главного зеркала

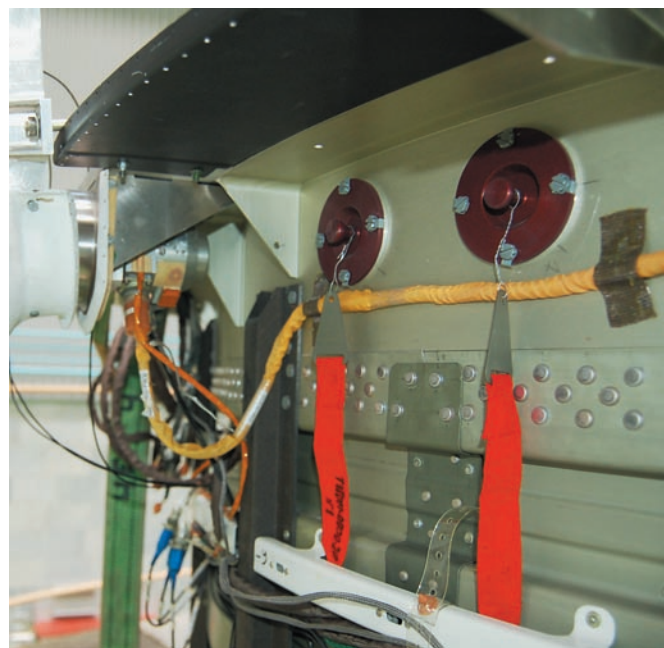


рисунок 19. Установка образцов-свидетелей на телескопе

В качестве основного материала для изготовления телескопа используются алюминиевые сплавы, титан и легированные стали, обладающие низким газовыделением.

Часть конструкции выполнена из композитного материала (углепластик) – это бленда наружная и стрингеры тубуса. Углепластик относится к материалам с низким газовыделением. В конструкции телескопа эти конструкции работают при температуре ниже минус 70°C, что способствует минимизации процесса газовыделения этих материалов и исключает угрозу загрязнения оптических элементов телескопа.

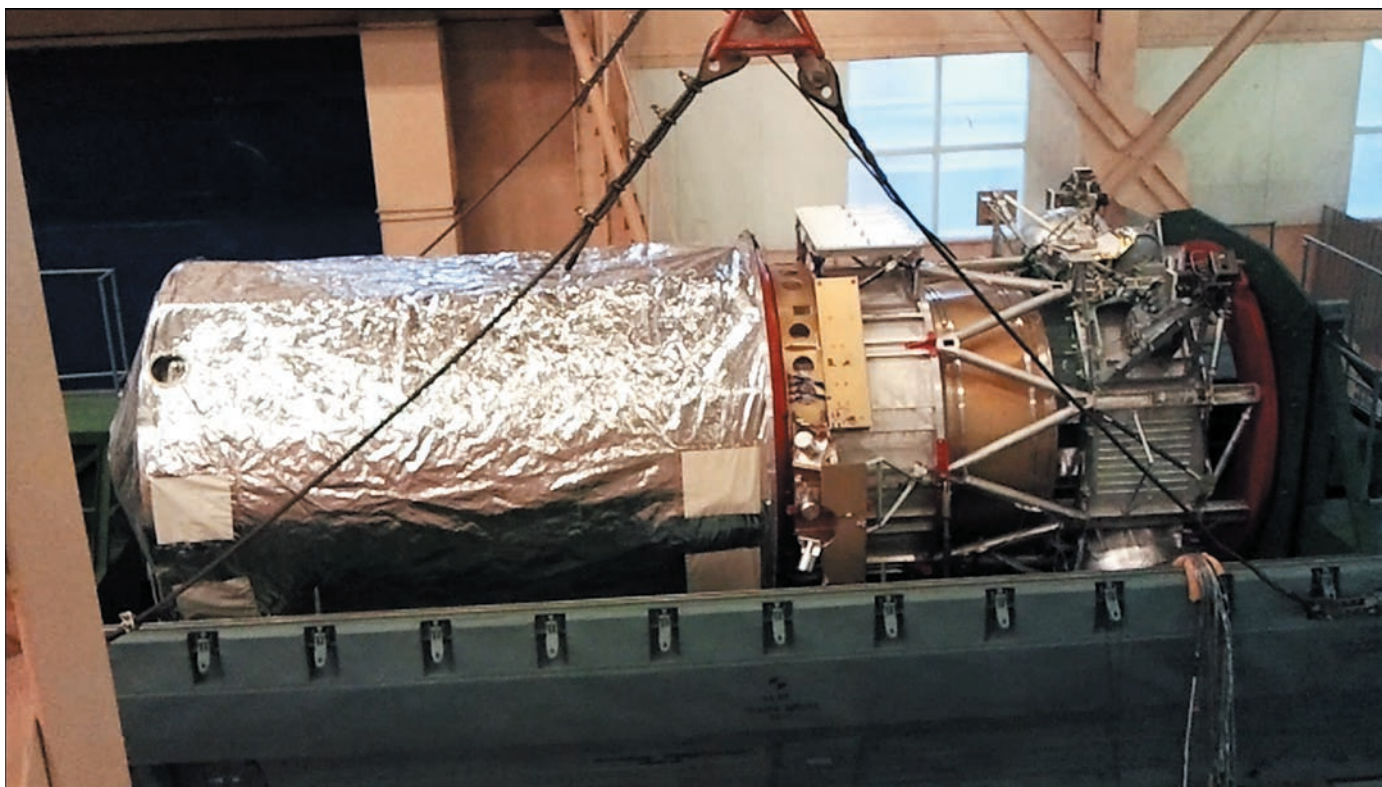
В качестве оптического покрытия используется краска AEROGLAZE Z-307 с низким газовыделением.

Неметаллические материалы выбирались из условия минимального газовыделения и, в сочетании с операцией дегазации деталей и агрегатов, обеспечиваются показатели газовыделения ОПМ < 0,1%, ЛКВ 0,01%. К этим материалам относятся углепластик, полиамиды, фторопласты, клеи различного назначения, пенокомпануды и пр.

При проектировании инструментального отсека телескопа, для уменьшения количества источников газовыделения в зоне расположения приемников излучения, на конструктивных элементах приборов применяется гальваническое покрытие «черный хром».

Все агрегаты и бортовая кабельная сеть перед установкой на телескоп подвергаются процедуре дегазации.

Модульная конструкция дает возможность добиться требуемой чистоты поверхностей телескопа (3000 ppm по частицам и 1×10^{-7} г/см² молекулярно-



рисунк 20. Космический аппарат с телескопом в чехле в транспортном контейнере. Испытания на жесткую авиационную посадку

го загрязнения). Обеспечение чистоты телескопа Т-170М является одной из основных задач длительной и надежной работоспособности КА.

Задача обеспечения чистоты решается следующим комплексом мер, предотвращающих загрязнение оптических элементов конструкции частицами и молекулярными отложениями органических веществ:

- выбор материалов;
- создание условий для сборки телескопа, предотвращающих его загрязнение;
- очистка конструкции по истечении допустимого времени нахождения в чистовом помещении с контролируемым классом чистоты;
- ампулизация телескопа;
- создание при летной эксплуатации такого температурного поля температур, когда температура оптических элементов выше, чем температура окружающей конструкции.

В процессе нанесения покрытия на главное и вторичное зеркало одновременно наносится покрытие на образцы-свидетели, по оптическим характеристикам которых оценивается качество покрытия зеркал (Жупанов В.Г. и др., 2014). При сборке телескопа часть из них (10 штук) устанавливаются во внутреннюю полость телескопа (рисунок 19). Конструкция установки образцов-свидетелей позволяет изымать эти контрольные элементы в процессе наземной эксплуатации без нарушения ампулизации внутренней

полости телескопа и оценивать по ним состояние оптического покрытия зеркал на каждом этапе наземной эксплуатации.

Сборка и юстировка телескопа осуществляется в термостабилизированном помещении 7-го класса чистоты по ГОСТ ИСО14644-1-2002. Для защиты телескопа от возможных загрязнений при последующих работах, а также для предотвращения деградации покрытий оптических элементов на него надевается защитный чехол (рисунок 20), внутри которого создается избыточное давление подачей чистого сухого азота.

Чехол снимается с телескопа непосредственно перед накаткой обтекателя.

список литературы

Боярчук А.А., Мошнеев А.А. 30 лет первой отечественной астрофизической станции «АСТРОН» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 3-7.

Жупанов В.Г., Федосеев В.Н., Гольшико Е.А., Мошнеев А.А. и др. Функциональное покрытие оптических элементов комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 92-96.

Статья поступила в редакцию 18.09.2014 г.

ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕЛЕСКОПА Т-170М КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «СПЕКТР-УФ»

А.Л. Яскович¹,
yasa@iki.rssi.ru;
A.L. Yaskovich

О.В. Власенко¹,
vlasenko@inasan.ru;
O.V. Vlasenko

В работе даны характеристики оптической схемы телескопа Т-170М, входящего в состав комплекса научной аппаратуры космического аппарата «СПЕКТР-УФ».

*Ключевые слова: телескоп;
оптическая система;
ультрафиолетовый участок спектра;
отсекатели света;
ошибки оптической поверхности.*

ВВЕДЕНИЕ

Телескоп Т-170М предназначен для исследования астрономических объектов в ультрафиолетовом диапазоне спектра 115–305 нм с борта космического аппарата «СПЕКТР-УФ». Основные научные задачи «Всемирной космической обсерватории – Ультрафиолет» (спектроскопия слабых источников и построение изображений в УФ-диапазоне спектра) определили выбор параметров телескопа Т-170М: большой диаметр главного зеркала – 170 см, специальные покрытия, улучшающие отражение в УФ-диапазоне и т.д. (Shustov B. et al., 2011; Shustov B. et al., 2014). С точки зрения влияния на качество наблюдений, наиболее важной и сложной в изготовлении частью телескопа являются главное и вторичное зеркала телескопа, к которым предъявляются жесткие требования по качеству поверхности и отражению в области вакуумного ультрафиолета и по отклонению от формы. В связи с этим качественное изготовление зеркал телескопа является сложной и приоритетной задачей.

1. Расчетные параметры телескопа

Оптический расчет телескопа Т-170М базируется на условиях, перечисленных в таблице 1 (Боярчук А.А. и др., 2008). Оптическая схема телескопа представляет собой предфокальную апланатическую систему Ричи – Кретьена с гиперболическими главным и вторичным зеркалами.

OPTICAL ARRANGEMENT OF T-170M TELESCOPE OF «SPEKTR-UF» SCIENTIFIC INSTRUMENTATION COMPLEX

В.П. Макаров²,
кандидат технических наук,
makarov@laspace.ru;
V.P. Makarov

The article covers the properties of the optical arrangement of T-170M telescope which is a part of «SPEKTR-UF» Spacecraft's Scientific Instrumentation Complex.

*Key words: telescope;
optical system;
the spectrum ultraviolet range;
light shutters;
optical surface errors.*

таблица 1 – Исходные данные

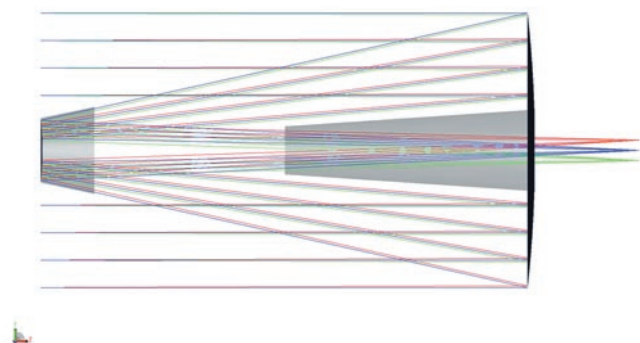
тип оптической системы	апланат Ричи – Кретьена
диаметр апертуры, D	1700 мм
относительное фокусное расстояние телескопа, F/D	10.0
относительное фокусное расстояние главного зеркала, f_1/D	2.30
вынос фокальной поверхности за вершину главного зеркала	650.0 мм
угловой диаметр поля зрения	0.50°
спектральный диапазон	0.115–0.8 мкм
основная длина волны	0.20 мкм

На рисунке 1 показана оптическая схема телескопа с отсекателями (блендами) паразитного света.

В таблице 2 сведены геометрические характеристики первого и второго порядков. Размеры теневых зон на обоих зеркалах определяются системой отсекаателей прямого света (см. ниже, таблица 4). Под длиной оптической системы понимается расстояние от вершины вторичного зеркала до фокальной поверхности. Мнимый выходной зрачок двухзеркальной системы предфокального типа расположен перед вторичным зеркалом (по ходу светового луча от объекта). Сведения о положении и размерах выходного зрачка телескопа необходимы для согласования телескопа с оптикой последующих приборов – спектрографов, камеры поля, фокальных редукторов.

¹ ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow.

² ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.
Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia,
Moscow region, Khimki.



Показан ход осевого пучка света и лучей, наклоненных к оси на ± 15 угл. мин.

рисунок 1. Оптическая схема Т-170М с блендами

таблица 2 – Расчетные параметры телескопа Т-170М

эквивалентное фокусное расстояние телескопа F	17000 мм
радиус кривизны при вершине главного зеркала R_1	-7820.0 мм
квадрат эксцентриситета главного зеркала e_1^2	1.029508
максимальное отклонение поверхности главного зеркала от ближайшей сферы	35.12 мкм
радиус кривизны при вершине вторичного зеркала R_2	-2214.761 мм
квадрат эксцентриситета вторичного зеркала e_2^2	2.848076
максимальное отклонение поверхности вторичного зеркала от ближайшей сферы	12.99 мкм
световой диаметр вторичного зеркала	399.07 мм
линейный коэффициент экранирования вторичным зеркалом	0.235
расстояние между вершинами главного и вторичного зеркал	-3057.317 мм
уменьшение выноса фокальной поверхности при увеличении Δ на 1 мм	19.9 мм
длина оптической системы	3707.317 мм
удаление выходного зрачка телескопа от фокальной поверхности	-4523.52 мм
диаметр выходного зрачка телескопа	452.35 мм

2. Отсекатели паразитного света

Отсекатели паразитного света (бленды) для телескопа Т-170М были рассчитаны таким образом, чтобы достичь наименьшего значения коэффициента центрального экранирования при полном подавлении прямого света, идущего в пределы поля зрения диаметром $30'$. Найденная таким путем система состоит из двух отсекающих в виде усеченных конусов (см. рисунок 1). Система отсекающих не вносит виньетирования в полезные наклонные пучки. Кроме того, отсекающие предотвращают попадание в поле зрения света, отраженного внутренней поверхностью корпуса телескопа. В таблице 3 приведены технические характеристики отсекающих света.

таблица 3 – Отсекатели света

длина переднего отсекающего	313.22 мм
диаметр раструба переднего отсекающего	537.85 мм
длина заднего отсекающего	1551.76 мм
диаметр раструба заднего отсекающего	296.74 мм
расстояние между краями отсекающих	1192.34 мм
линейный коэффициент центрального экранирования с отсекающими	0.316

Передним именуется отсекающий, расположенный около вторичного зеркала, задним – отсекающий около главного зеркала. Длины отсекающих отсчитываются от вершин соответствующих зеркал, диаметры раструбов отвечают краям отсекающих, удаленным от зеркал.

Поток света от изучаемого объекта отчасти экранируется вторичным зеркалом и передним отсекающим. Вследствие этого полезный свет не попадает в области пространства вблизи центров поверхностей обоих зеркал (см. рисунок 1). Теневые зоны на зеркалах имеют, очевидно, круговую форму; их диаметры указаны в таблице 4.

таблица 4 – Теневые зоны на зеркалах

световой диаметр главного зеркала	1700.0 мм
диаметр теневой зоны на главном зеркале	513.94 мм
диаметр светового пучка, проходящего в центральное отверстие главного зеркала, вблизи его поверхности	191.94 мм
световой диаметр вторичного зеркала	399.07 мм
диаметр теневой зоны на вторичном зеркале	85.38 мм

Зона тени перед главным зеркалом ограничена раструбом заднего отсекающего, внешней границей неосвещенной зоны на главном зеркале и диаметром пучка световых лучей, проходящего в центральное отверстие главного зеркала (таблица 4). Зона тени вблизи поверхности вторичного зеркала ограничена круговым конусом, опирающимся на затененную центральную часть этого зеркала диаметром ~ 85.4 мм. Кроме того, перед вторичным зеркалом (по ходу световых лучей от объекта) расположена область, в которой проходят полезные лучи, падающие затем на тыльную сторону вторичного зеркала и передний отсекающий. Эта область ограничена конусом, опирающимся на раструб переднего отсекающего; полный угол при вершине конуса равен углу поля зрения $2\omega = 0.5^\circ$. В пределах трех указанных зон могут располагаться узлы механики телескопа.

Поскольку при скользящем падении света становятся неэффективными даже лучшие покрытия, очень опасен паразитный свет, образующийся при отражении от поверхностей самих отсекающих. Для его подавления на указанных поверхностях расположены кольцевые диафрагмы.

3. Характеристики изображения точечного источника

Главные aberrации системы Ричи – Кретьена – астигматизм и кривизна поля третьего порядка (Wilson R.N., 1996). Астигматическая система обладает двумя фокальными поверхностями – тангенциальной и сагиттальной. На этих поверхностях, вогнутых в ту же сторону, что и поверхность главного зеркала, внеосевые изображения звезд вытянуты во взаимно перпендикулярных направлениях. Между тангенциальной и сагиттальной поверхностями расположена медиальная поверхность, на которой изображения имеют круговую форму. Характеристики медиальной поверхности даны в таблице 5.

таблица 5 – Характеристики медиальной поверхности изображений

радиус сферической медиальной поверхности	–882.53 мм
масштаб изображений на медиальной поверхности	12.133"/мм 82.418 мкм/"
линейный диаметр поля зрения	148.48 мм
стрелка кривизны медиальной поверхности в пределах поля зрения диаметром 0.50°	3.13 мм

Обычно наблюдения проводятся на медиальной поверхности, однако возможна ситуация, когда какой-либо прибор целесообразнее несколько сдвинуть в сторону одной из астигматических фокальных поверхностей. Например, может оказаться так, что гидрирующие устройства лучше приспособлены к сильно вытянутым изображениям звезд.

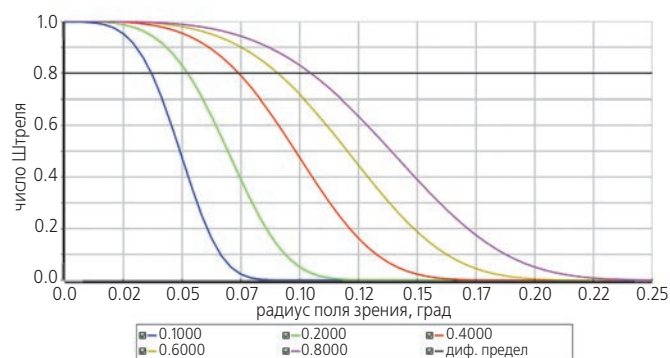
Характеристики изображения точечного источника для оптической схемы телескопа по полному полю зрения приведены на рисунках 2–3.

Поле зрения телескопа Т-170М используется научными и служебными приборами следующим образом:

- центр поля зрения размером 1.3×1.3 угл. мин используется блоком камер поля;
- три щели спектрометров, работающих в диапазоне 0.115–0.305 мкм, расположены равномерно по окружности с радиусом 0.17 град относительно центра поля зрения телескопа;
- три камеры датчиков гида телескопа, имеющих собственные поля зрения 3.2×3.2 угл. мин и работающие в видимом диапазоне спектра, расположены равномерно по окружности с радиусом 0.2 град относительно центра поля зрения телескопа.

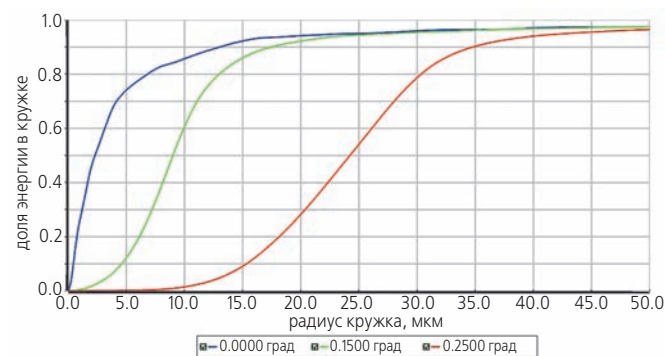
Среднеквадратические отклонения (СКО) радиусов звездных изображений по полю блока камер поля показаны на рисунке 4.

Концентрация энергии в изображении звезды, находящейся на входной щели спектрометров, представлена на рисунке 5.



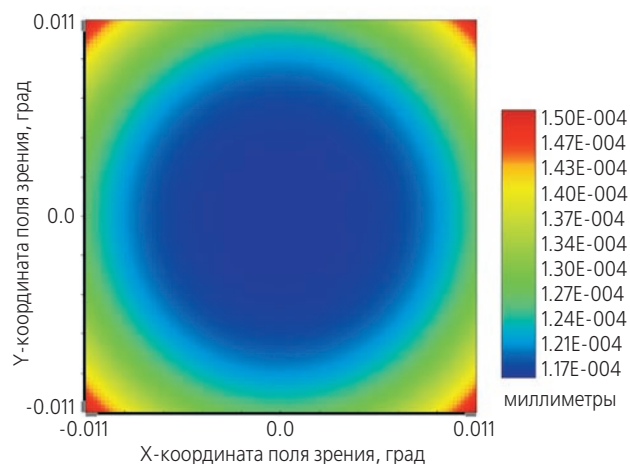
Показан дифракционный предел.

рисунки 2. Число Штреля по полю зрения для разных длин волн



- для центра поля зрения;
- на расстоянии 0.15 град от оси;
- на расстоянии 0.25 град от оси.

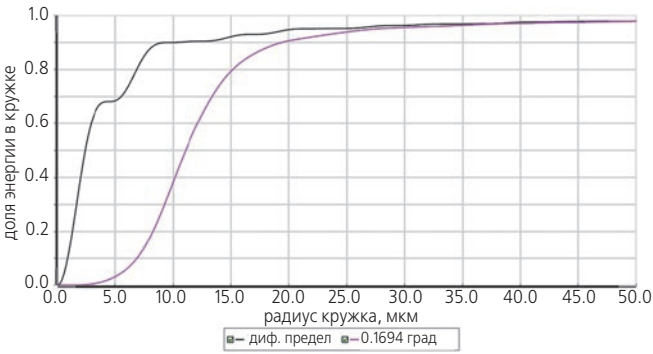
рисунки 3. Доля энергии звезды в диапазоне длин волн 0.1–0.8 мкм в кружке заданного диаметра



рисунки 4. СКО радиусов звездных изображений по полю блока камер поля

Так как диаметр входных щелей спектрометров составляет 80 мкм, то вся энергия звезды с запасом «проваливается» в щели спектрометров.

На рисунке 6 показано изменение среднеквадратического радиуса изображений звезд по полю зрения камер датчиков гида.



Указан дифракционный предел.
рисунок 5. Доля энергии звезды в кружке заданного диаметра в месте расположения щелей спектрометров

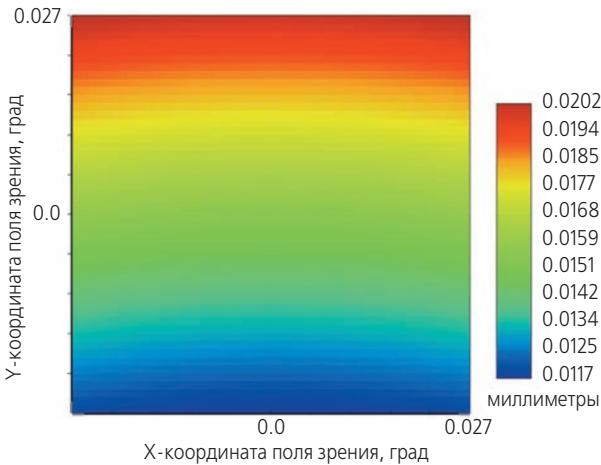


рисунок 6. СКО радиусов звездных изображений по полю датчиков гида
Форма и распределение яркости в изображениях звезд по всему полю датчиков гида позволяют производить гидирования телескопа с необходимой точностью для звезд ярче 16^m.

4. Допуски на основные параметры телескопа

Телескоп Т-170М предназначен для наблюдений в далекой ультрафиолетовой области спектра, что предъявляет повышенные требования к качеству его оптики.
Отступления от расчетных значений параметров, неизбежные при изготовлении крупногабаритной оптики, могут быть в значительной мере компенсированы введением отклонений других параметров, прежде всего тех из них, которые характеризуют пространственное расположение зеркал и детекторов света, т.е. юстировкой телескопа при его сборке. Поэтому допуски при изготовлении телескопа относятся, в основном, к собственным характеристикам зеркал. Напротив, в процессе эксплуатации телескопа на первый план выступают допуски на сохранение пространственной конфигурации оптических элементов.

Очевидно, величина допусков определяется теми требованиями, которые предъявляются к качеству изображения. Поскольку изображение формируется как оптикой, так и детектором света, рассмотрение допусков на параметры всякой оптической системы бессодержательно, если не принимаются во внимание свойства сопряженного с ней приемника. В случае наблюдений с телескопом должны учитываться также и характеристики системы гидирования.

5. Допуски на радиусы кривизны и эксцентриситеты зеркал при их изготовлении

В таблице 6 приведены результаты расчета допусков на радиусы кривизны и квадраты эксцентриситетов зеркал для случая, когда искажения изображения компенсируются параметрами положения вторичного зеркала телескопа (наклоны, расстояние до главного зеркала), а также величиной выноса фокальной поверхности за вершину главного зеркала. Значения допусков отвечают одновременному и независимому случайному варьированию совокупности параметров телескопа около их номинальных значений.

таблица 6 – Допуски на радиусы кривизны и эксцентриситеты зеркал

параметр	номинальное значение	допуск
главное зеркало		
радиус кривизны при вершине R ₁	–7820.0 мм	±10 мм
квадрат эксцентриситета ε ₁ ²	1.029508	±0.0008
вторичное зеркало		
радиус кривизны при вершине R ₂	–2214.761 мм	±8 мм
квадрат эксцентриситета ε ₂ ²	2.848076	±0.005

6. Ошибки фигуризации зеркал и допуски на иррегулярность их поверхности

Рассмотренные выше допуски на радиусы кривизны и эксцентриситеты касались глобальной формы поверхностей зеркал. Переходя к ошибкам меньшего масштаба (более высокой пространственной частоты), обычно разделяют систематические ошибки фигуризации и случайные, иррегулярные ошибки их поверхностей (Schroeder D.J., 1999; Suiter H.R., 2009). К первым относят отклонения с характерным размером от диаметра апертуры D до ~D/5, а ко вторым – менее D/5. Типичными ошибками фигуризации следует считать отклонения поверхностей, порождающие аберрации волнового фронта низших порядков, в частности, сферическую аберрацию и астигматизм 3-го порядка. Иррегулярные ошибки, в свою очередь, разделяют на первичную рябь среднего масштаба с размерами от ~D/5 до ~D/20 и ми-

крорябь более высокой пространственной частоты. Такое подразделение обусловлено не только разными механизмами образования отклонений, но также и различием их характерных проявлений.

Расчеты показали, что для обоих зеркал Т-170М допустимая ошибка фигуризации составляет $\delta z = \lambda/10$ на краю зеркала, еще меньше ошибки в центральной зоне ($\lambda = 0.633$ мкм).

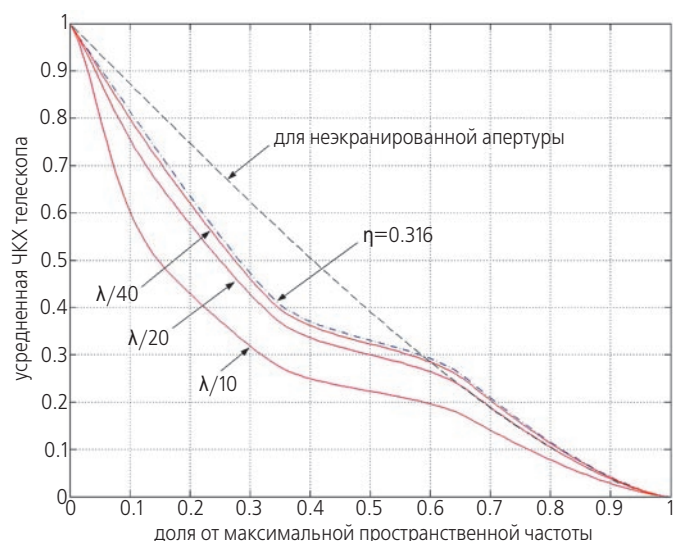
Теоретические исследования и практика наблюдений свидетельствуют о большом значении гладкости поверхностей зеркал, тем более что с Т-170М наблюдения будут проводиться в коротковолновом диапазоне. Многие задачи наблюдений связаны сейчас с изучением областей вблизи ярких звездообразных источников, в частности, ядер активных галактик и оболочек квазаров, околозвездных туманностей и планет. Во всех этих случаях важен уровень рассеянного света в окрестности яркого источника, который определяется прежде всего гладкостью поверхностей зеркальной оптики.

Теоретическая модель гладкости оптической поверхности содержит лишь два параметра: среднеквадратическое отклонение случайного волнового фронта σ_w и характерную длину корреляции волнового фронта L_w (Wetherell W.B., 1982). В системе, состоящей из двух зеркал, σ_w вчетверо больше среднеквадратического отклонения σ_z рельефа каждой поверхности. Что касается характерной длины корреляции, то в первом приближении можно считать, что D/L_w есть среднее количество случайных волн на апертуре диаметром D .

На рисунке 7 представлены частотно-контрастные характеристики (ЧКХ) в основной длине волны $\lambda = 0.2$ мкм для трех значений σ_w ($\lambda/10$, $\lambda/20$, $\lambda/40$) и $L_w = D/6$. Расчеты для других величин показывают слабую зависимость от L_w .

Влияние первичной ряби можно считать несущественным при $\sigma_w < \lambda/20$. Далее рябь быстро размывает изображения, порождая большое количество случайных флуктуаций яркости вблизи основных источников. Для контраста $T = 0.40$ разрешение снижается примерно на 30% уже при $\sigma_w \approx \lambda/10$. Если принять этот (вполне мягкий) допуск на первичную рябь волнового фронта, то стандартное отклонение σ_z случайной ряби поверхности каждого из двух зеркал должно быть не более $\lambda/40$.

Что касается микроряби, то она представляет меньшую опасность. При характерных размерах отдельных участков ~ 1 мм высота рельефа в основном не превосходит 0.001 мкм, достигая максимального значения порядка 0.006 мкм. Вследствие слабой коррелированности наклонов соседних участков поверхности дифрагированный ими свет распределен далеко от источников, порождая слабый равномерный фон. Реализация оптической системы телескопа Т-170М подробно описана в статье (Власенко О.В. и др., 2014).



— усредненная ЧКХ телескопа с экранированием $\eta = 0.316$ при $L_w = D/6$ для разных значений среднеквадратической амплитуды первичной ряби волнового фронта σ_w ;
 - - - - - ЧКХ идеального телескопа при отсутствии экранирования;
 - - - - - ЧКХ идеального телескопа с экранированием $\eta = 0.316$.

рисунк 7. Частотно-контрастные характеристики телескопа

список литературы

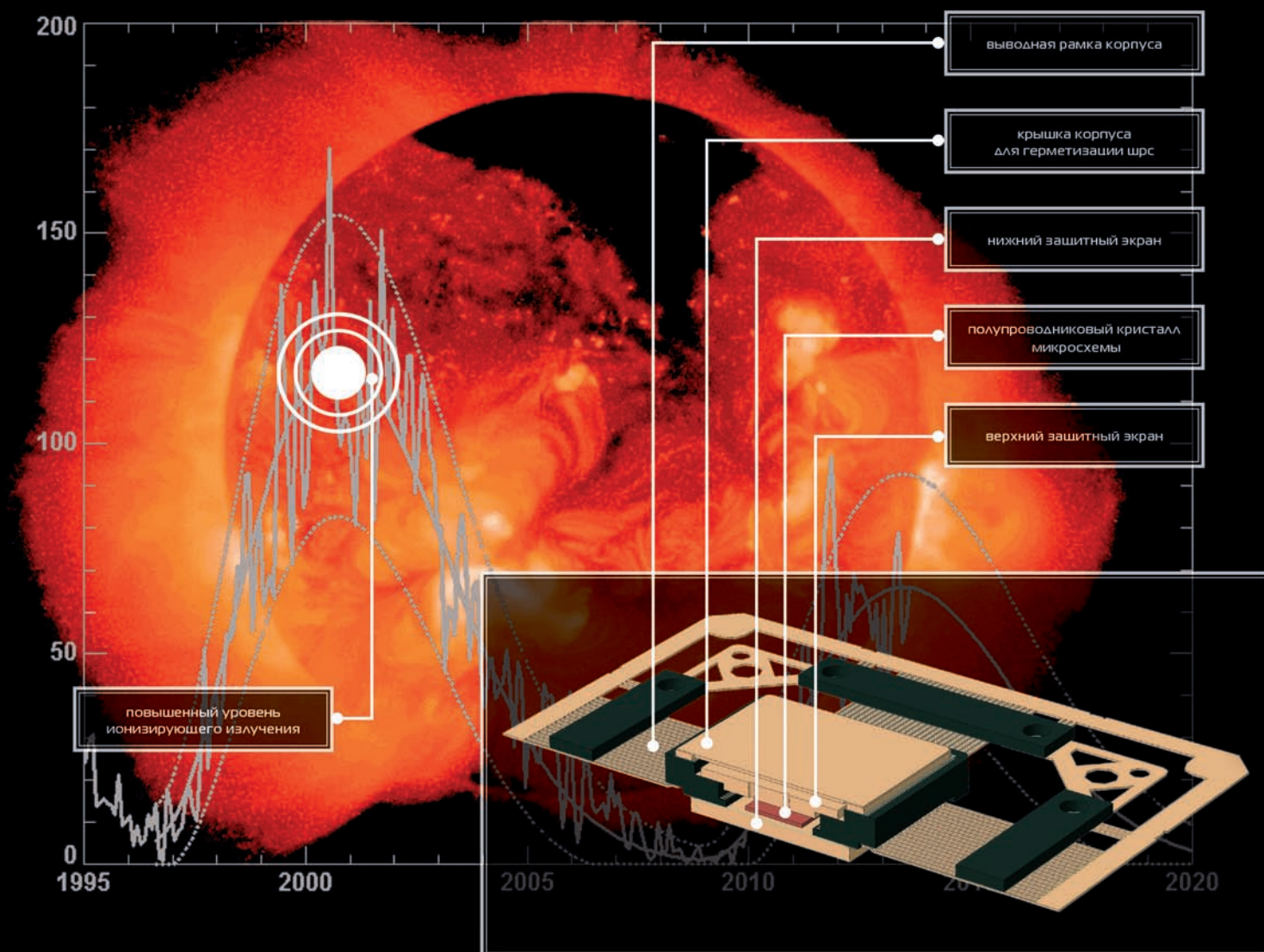
- Боярчук А.А., Стешенко Н.В., Тербиж В.Ю. Оптическая система космического телескопа Т-170М // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2008. № 1. С. 229-239.
- Власенко О.В., Яскович А.Л., Шустов Б.М. и др. Конструктивная реализация оптической системы телескопа Т-170М // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 67-73.
- Schroeder D.J. Astronomical Optics. S.I.: Academic Press, 1999. 478 p.
- Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al. WSO – UV progress and expectations // Astrophysics and Space Science. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-2119-0.
- Shustov B., Sachkov M., Gomez de Castro A.I., Werner K. et al. World space observatory – ultraviolet among UV missions of the coming years // Astrophysics and Space Science. 2011. 335. P. 273-282.
- Suiter H.R. Star Testing Astronomical Telescopes. S.I.: Willmann-Bell, 2009. 428 p.
- Wetherell W.B. Effects of Mirror Surface Ripple on Image Quality // Advanced Technology Optical Telescopes. 1982. Proc. SPIE 332. P. 335-351.
- Wilson R.N. Reflecting Telescope Optics. V. 1. S.I.: Springer, 1996. 556 p.

Статья поступила в редакцию 18.09.2014 г.

Радиационно-защитные корпуса для производства микроэлектроники

ТЕСТПРИБОР

на правах рекламы



Одним из перспективных решений при создании радиационно-стойкой элементной базы является применение корпусов с интегрированными в них радиационно-защитными экранами (РЗЭ).

Применение корпусов с РЗЭ позволяет обеспечить уровень стойкости коммерчески-доступных

кристаллов не ниже 100 крад по отношению к эффектам поглощенной дозы в условиях космического пространства.

Эффективность защиты кристалла от воздействия радиации: орбита GEO – до 600 раз; орбита MEO – до 4 раз.

КОНСТРУКТИВНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТЕЛЕСКОПА Т-170М

О.В. Власенко¹,
vlasenko@inasan.ru;
O.V. Vlasenko

А.Л. Яскович¹,
yasa@iki.rssi.ru;
A.L. Yascovich

Ю.А. Шаров²,
sharov@lzos.ru;
Yu.A. Sharov

А.А. Моисеев³,
кандидат технических наук,
moisheev@laspace.ru;
A.A. Moisheev

Кратко описана реализация основных конструктивных элементов оптической схемы 170-см космического телескопа Т-170М проекта «СПЕКТР-УФ». Рассмотрены основные этапы сборки и юстировки телескопа и применяемое для этого вспомогательное оборудование.

Ключевые слова: космический телескоп; оптические и механические элементы телескопа; сборка и юстировка телескопа.

ВВЕДЕНИЕ

Проект «СПЕКТР-УФ» направлен на создание крупной космической обсерватории для работы в недоступном для наблюдений с земной поверхности ультрафиолетовом (УФ) участке спектра. Проект международный (он имеет второе, более принятое в международной кооперации название «World Space Observatory – UltraViolet, т.е. «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет»). Проектом руководит Россия, которая несет в нем основную нагрузку (Shustov B. et al., 2009; Shustov B. et al., 2011; Боярчук А.А. и др., 2012).

Основной инструмент обсерватории – космический телескоп Т-170М с главным зеркалом диаметром 1.7 м – будет оснащен спектрографами высокого и низкого разрешения и камерами для построения высококачественных изображений в УФ-диапазоне. Оптическая система телескопа Т-170М построена по двухзеркальной оптической схеме Ричи – Кретьена. Назначение оптической системы телескопа – фор-

STRUCTURAL IMPLEMENTATION OF T-170M TELESCOPE OPTICAL SYSTEM

Б.М. Шустов¹,
доктор физико-
математических наук,
член-корреспондент РАН,
bshustov@inasan.ru;
B.M. Shustov

М.А. Абдулкадыров²,
кандидат технических
наук, lastro-am@lzos.ru;
M.A. Abdulkadyrov

А.В. Зверев³,
zverev@laspace.ru;
A.V. Zverev

М.Ф. Ильясов³,
mansur@laspace.ru;
M.F. Ilyasov

There is a brief description of «SPEKTR-UF» T-170M space telescope 170-cm optical layout main structural elements' implementation. Also main phases of the telescope assembly and alignment and used Ground Support Equipment are described.

Key words: space telescope; the telescope optical and mechanical elements; the telescope assembly and alignment.

мирование изображений исследуемых космических объектов (звезды, галактики, планеты и т.п.) в поле зрения $\pm 15'$ непосредственно на фокальной поверхности телескопа, а также на приемниках излучения приборов научной аппаратуры, расположенных в районе фокальной поверхности телескопа Т-170М в спектральном диапазоне 115–600 нм. Исходная схема описана в (Боярчук А.А. и др., 2008). Поскольку этот отчетный материал малодоступен, рекомендуем читателям ознакомиться с основными параметрами оптической схемы телескопа в публикации (Яскович А.Л. и др., 2014) в данном выпуске журнала.

Оптическая система имеет следующие основные проектные технические характеристики:

- диаметр апертуры – 1700 ± 1 мм;
- эквивалентное фокусное расстояние – 17000 ± 6 мм;
- задний отрезок – $650 \text{ мм} \pm 30 \text{ мм}$;
- воздушный промежуток – 3057 мм ;

¹ ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow.

² ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла», Россия,
Московская область, г. Лыткарино.

JSC «Lytkarino Optical Glass Factory», Russia, Moscow
region, Lytkarino.

³ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская
область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia,
Moscow region, Khimki.

- среднеквадратичное значение деформации отраженного волнового фронта для изображения, построенного оптической системой на оси телескопа, не более 25 нм.

Изготовление космического телескопа такого размера (второго в мире по величине оптического/ультрафиолетового телескопа после телескопа им. Хаббла) – амбициозная и технически сложная задача. В данной статье кратко рассмотрены наиболее существенные аспекты реализации основных конструктивных элементов оптической схемы 170-см космического телескопа Т-170М проекта «СПЕКТР-УФ», а также основные этапы сборки и юстировки телескопа и применяемые для этого методы и вспомогательное оборудование.

1. О проектировании и изготовлении оптических элементов телескопа Т-170М

В проектировании и изготовлении оптических элементов телескопа – главного (ГЗ) и вторичного (ВЗ) зеркал, входящих в оптическую систему Т-170М, принимают участие ФГБУН «Институт астрономии РАН», ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла», ФГУП «НИИ НПО «Луч» и ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Оптические поверхности зеркал определены выбором оптической схемы. В схеме Ричи – Кретьена обе оптические поверхности – гиперболоиды вращения. Выбор формы зеркал (не оптических поверхностей) определяется требованиями. С одной стороны, зеркало должно быть жестким (обычно это означает большую эффективную толщину зеркала). Это условие необходимо при изготовлении зеркала, сохраняющего форму в условиях гравитации. С другой стороны, зеркало должно быть по возможности легким, т.к. массивное зеркало космического телескопа не только утяжеляет весь телескоп и весь КА, но и существенно увеличивает стоимость его изготовления и вывода на орбиту. Поэтому основной задачей при проектировании зеркал являлась задача разработки комплекса мероприятий по минимизации влияния гравитации при наземной отработке изделия. Важное значение при этом имеет выбор схемы контроля качества оптических поверхностей и оптической системы в целом.

Учитывая конструктивные особенности тубуса телескопа, а именно соотношение его продольной и поперечной жесткостей, в качестве штатной выбрана вертикальная схема контроля качества оптических поверхностей каждого из зеркал и объектива в целом с вертикальным направлением осей визирования.

Задача сохранения формы главного зеркала как более размерного и массивного наиболее слож-

на. Первоначально специалистами ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» прорабатывалась идея реализации системы изменения (корректировки) формы главного зеркала в полете. На ранних стадиях проектирования и макетной отработки стало ясно, что разработка системы корректировки формы ГЗ, размещаемой на борту КА, возможна, но сопряжена со значительными трудностями. Бортовая система, обеспечивающая приемлемую контролируемую деформацию зеркал и способную компенсировать искажения формы, неизбежные при изготовлении крупных зеркал в условиях гравитации, имеет слишком большую массу. Поэтому была предложена идея обезвешивания (разгрузки) зеркал при их изготовлении, контроле и при юстировке оптической системы телескопа.

С учетом опыта других проектов был выбран вариант технологической разгрузки ГЗ на пневмоопорах. После проведенных исследований была предложена такая схема разгрузки: на пяти радиусах по схеме 18-18-18-18-9 (от края к центру) расположены точки разгрузки (рисунок 1). Размещение опор было оптимизировано с учетом формы зеркала, что позволило достичь качества оптической поверхности в вертикальной схеме контроля качества по среднеквадратичному отклонению от теоретической формы не хуже 6.5 нм, хотя, как видно из рисунка 2, размах отклонений (peak-to-valley) составляет 52 нм.

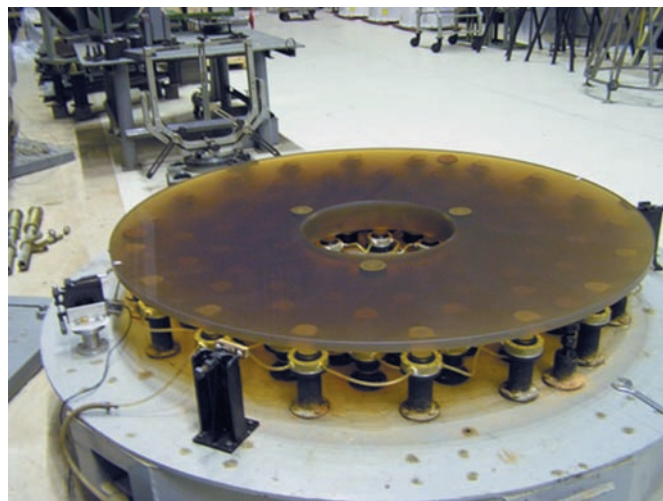


рисунок 1. Главное зеркало телескопа Т-170М (технологический образец) на пневмоопорах технологической разгрузки

Волновой фронт рабочей поверхности ГЗ при такой разгрузке соответствует тому, который должен быть реализован на орбите. Именно поэтому сборка, юстировка и контроль качества оптической системы телескопа проводится в схеме, когда ГЗ располагается в технологической оправе и разгружено на пневмоопорах.

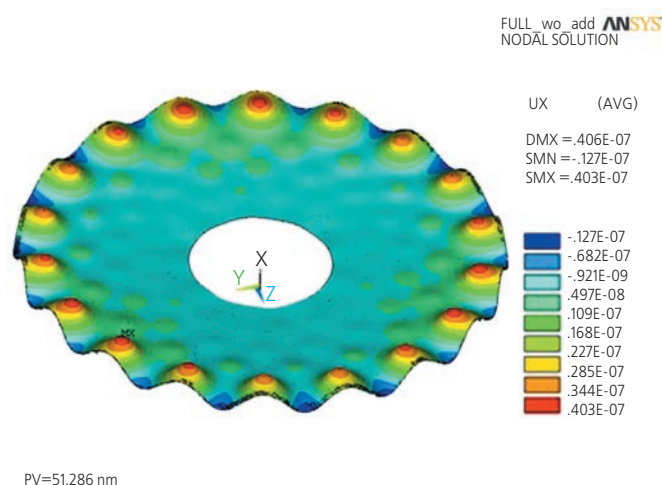


рисунок 2. Диаграмма смещения под действием гравитации точек рабочей поверхности ГЗ, находящегося на пневмоопорах технологической разгрузки (см. рисунок 1) по оси X (близко к вертикали). Смещение дано в метрах

Оптическая система собирается на стенде, при этом оптическая ось системы вертикальна. Вторичное зеркало разгружено своей собственной системой обезвешивания, которая входит в состав оправы ВЗ и сопровождает его от этапа окончательной доводки оптической поверхности до этапа летной эксплуатации включительно.

Ввиду существенной разницы в коэффициентах температурного расширения материалов зеркал и силовой конструкции объектива, отдельное внимание уделено вопросу конструктивной реализации узлов базирования зеркал. При их проектировании решалась задача минимизации влияния температурного деформирования силовой конструкции на форму рабочих поверхностей зеркал.

При проектировании зеркал немаловажной также являлась (и учитывалась) техническая возможность изготовления зеркал на мощностях и с учетом технологических особенностей ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла».

Перечисленные выше факторы предопределили как саму форму зеркал, так и конструкцию узлов их базирования.

2. Главное зеркало телескопа Т-170М

Для ГЗ была разработана оптимизированная форма поперечного профиля, обеспечивающая возможность позиционирования как разгруженного зеркала на пневмоопорах, так и неразгруженного зеркала на своих штатных опорах, осью визирования в зенит в условиях земной гравитации на разных этапах юстировки оптической системы.

Оптический элемент ГЗ представляет собой кольцевой диск переменной толщины, изготовленный из астроситалла СО-115М. Тыльная поверхность вы-

полнена в виде сферы радиусом $R=2650$ мм. Наружный габаритный диаметр зеркала – 1715 мм, диаметр центрального отверстия – 530 мм, толщина зеркала у внешнего края – 25 мм, толщина у центра – 110 мм. Масса зеркала – 360 кг.

Оправа ГЗ построена на принципе центрального базирования на три точки (рисунок 3).

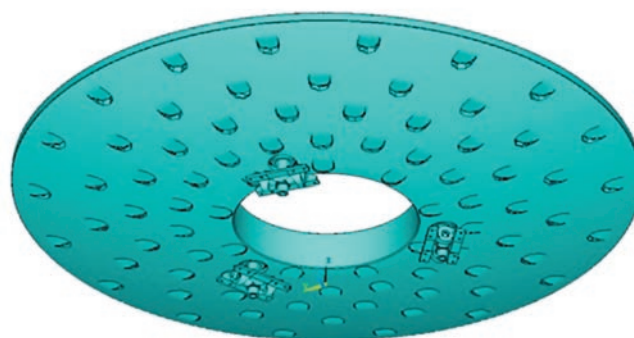


рисунок 3. Главное зеркало с элементами механического интерфейса (3D-модель)

Отказ от привычной для телескопов внешней кольцевой оправы имеет большое значение для уменьшения массы всей конструкции, но создает определенные трудности, связанные с сохранением формы зеркала в наземных условиях. Преимущества такого способа крепления проявляются в космосе. Это нетрадиционное решение было впервые успешно применено при создании телескопа «СПИКА» отечественной космической обсерватории «АСТРОН» (Боярчук А.А., Мошнеев А.А., 2013). Крепление ГЗ к силовой конструкции рамы узла главного зеркала осуществляется при помощи трех однотипных узлов. Каждый из узлов, построенных на базе шаровых подшипников скольжения ШМ25 и ШМ15, обеспечивает фиксацию оптического элемента относительно рамы только в осевом и тангенциальном направлениях. Таким образом, на зеркало накладывается шесть линейных связей, реализующих статически определимый способ крепления зеркала к раме, что исключает влияние деформаций рамы (в том числе температурных) на форму оптической поверхности зеркала. Механическое соединение узлов крепления с ситалловым главным зеркалом выполнено с использованием закладного элемента с упругими элементами и клеевой композиции DP-190.

Как уже отмечалось, контроль качества оптической поверхности при изготовлении и в процессе наземной отработки ГЗ проводится на опорах стенда пневматической разгрузки. Стенд разработан спе-

циалистами ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла». В обеспечение интерфейса с пневмоопорами на тыльной стороне оптического элемента выполнена 81 плоская цековка.

3. Вторичное зеркало телескопа Т-170М

Оптический элемент ВЗ представляет собой сплошное менисковое зеркало переменной толщины, выполненное из ситалла СО-115М (рисунок 4).

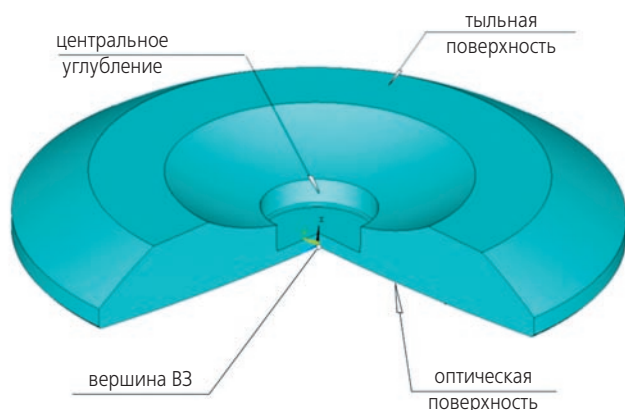


рисунок 4. Вторичное зеркало (3D-модель)

ВЗ спроектировано под разгрузку на шесть точек. Тыльная поверхность – профилированная, образованная сферой, плоским кольцом и конусом. Наружный диаметр зеркала – 415 мм, диаметр центральной экранированной зоны – 85 мм, габаритная толщина зеркала – 55 мм, толщина зеркала у края – 15 мм. Масса зеркала – 12.9 кг.

Форма поперечного профиля ВЗ и конструктивные параметры системы разгрузки, интегрированной в оправу, оптимизированы в обеспечение возможности формирования рабочей поверхности ВЗ требуемого качества в условиях земной гравитации в вертикальной схеме контроля, оптической поверхностью вниз – среднеквадратичное отклонение рабочей поверхности от теоретической формы не хуже 0.003λ (где $\lambda=632.8$ нм, рисунок 5).

Оправа вторичного зеркала (рисунок 6) реализует простейший рычажный механизм разгрузки оптического элемента на шесть точек по схеме «6→3→1» с расположением точек разгрузки на единственном радиусе. Кинематическая схема рычажной разгрузки реализована с использованием упругих шарниров, в которых взаимная подвижность сопрягаемых элементов (на малых перемещениях) обеспечивается податливостью упругих мембран.

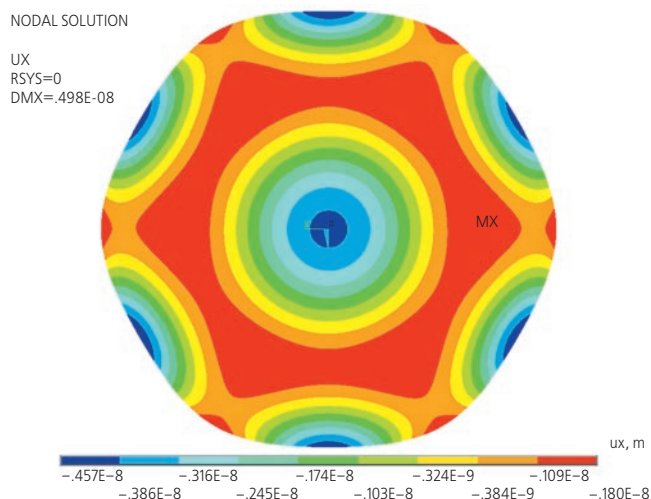


рисунок 5. Диаграмма смещения под действием гравитации точек рабочей поверхности ВЗ в летной оправе в поле гравитационных сил по оси Х (близко к вертикали). Смещение дано в метрах

Центральная пространственная рама (крестовина) является основным силовым элементом механического интерфейса зеркала с конструкцией модуля вторичного зеркала. Закладной элемент с плоской мембраной, вклеиваемый в центральную цилиндрическую проточку ВЗ, обеспечивает передачу с зеркала на крестовину поперечных сил и скручивающего момента. Система разгрузки вторичного зеркала, состоящая из трех конструктивно однотипных равноплечих рычагов, совмещает в себе функции разгрузки ВЗ в процессе наземной отработки и передачи на крестовину осевых сил и изгибающих моментов в процессе наземного и летного нагружения. Геометрические параметры упругих мембран оптимизированы в обеспечение квазистатически определимого способа крепления ВЗ к крестовине, что необходимо для минимизации искажений рабочей поверхности вследствие температурного деформирования оправы.

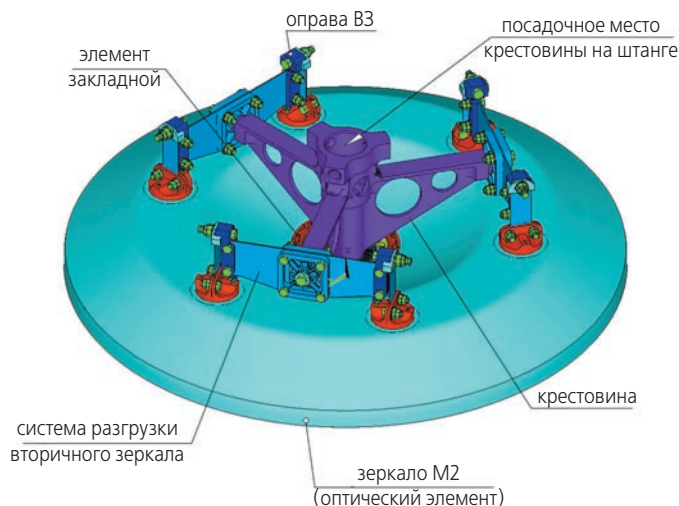


рисунок 6. Вторичное зеркало в летной оправе (3D-модель)

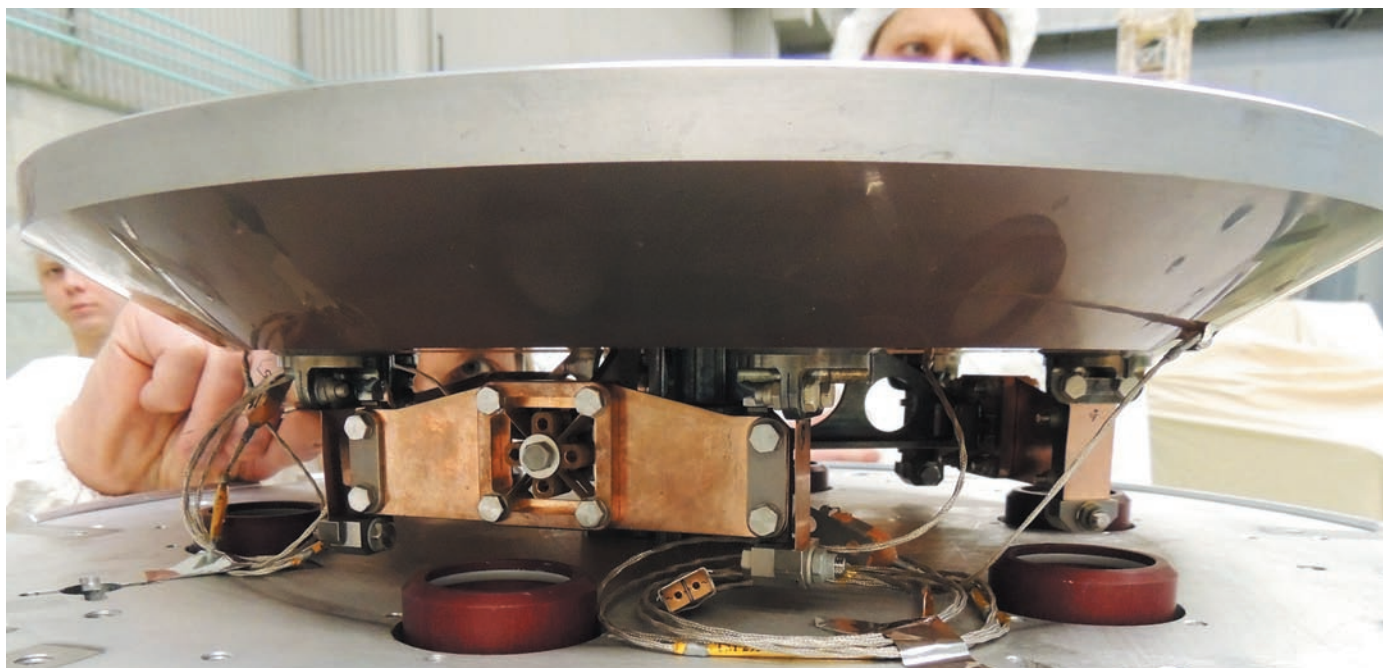


рисунок 7. Оправа вторичного зеркала

В ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла» отработана технология приклейки оправ с применением клея DP-190 (*Vlasenko O. et al.*, 2014) и изготовления ситалловых зеркал без покрытия со среднеквадратичной шероховатостью не более 1 нм и среднеквадратичным значением деформации рабочей поверхности не более 6 нм. Это достигается в том числе финишной доводкой оптической поверхности зеркал после приклейки к ним элементов оправ, чем нивелируются деформации, возникающие в массиве зеркал от воздействия «чужеродных» элементов.

В ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» изготовлены оправы главного и вторичного зеркал. На рисунке 7 показана оправа вторичного зеркала, вклеенная в ситалловую заготовку вторичного зеркала.

В ФГУП «НИИ НПО ЛУЧ» отработана технология нанесения на рабочие поверхности зеркал двухслойного тонкоплёночного отражающего покрытия $\text{Al}+\text{MgF}_2$ (*Zhupanov V. et al.*, 2014). Толщина слоя Al составляет около 100 нм, а слоя MgF_2 – около 30 нм. Разнотолщинность отражающего покрытия зеркал не превышает 3%. На отражающее покрытие зеркал выпущены технические условия. Рекомендуем читателям более подробно ознакомиться с этим вопросом в публикации (*Жупанов В.Г. и др.*, 2014) в данном выпуске.

В настоящее время ИНАСАН совместно с кооперацией проводит конструкторско-доводочные испытания зеркал. На рисунках 8 и 9 показаны зеркала с нанесенным отражающим покрытием.



рисунок 8. Главное зеркало с покрытием

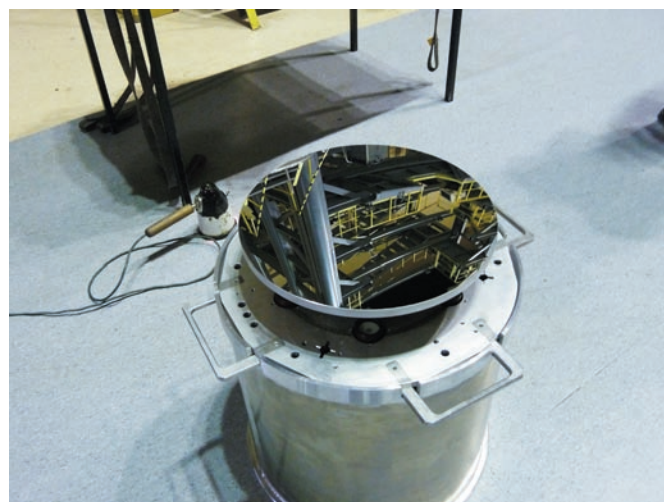


рисунок 9. Вторичное зеркало с покрытием

4. О сборке и юстировке оптической системы телескопа Т-170М

ИНАСАН совместно с ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», ОАО «Красногорский механический завод», фирмой «ЮСТАС» и ЗАО «РАСТР» разработал технологию юстировки оптической системы на стенде и в составе телескопа с учётом следующих особенностей:

- конструкция оправы главного зеркала, входящего в состав КНА «СПЕКТР-УФ», не позволяет устранить влияние гравитации на форму рабочей поверхности зеркала при его наземной эксплуатации в составе телескопа;
- требования к условиям наземной эксплуатации штатного отражающего покрытия зеркал телескопа Т-170М, оптических элементов фокальных приборов определяют необходимость его нанесения на рабочие поверхности оптических элементов КНА «СПЕКТР-УФ» максимально близко к дате пуска;
- отражающее покрытие зеркал, входящих в оптическую систему, предъявляет очень жёсткие требования к его загрязнению частицами (пылью) и веществами (молекулярное загрязнение).

Юстировка оптической системы включает в себя следующие этапы:

- подготовительные операции;
- идентификационная юстировка;
- фиксация взаимного положения главного зеркала с технологическим покрытием (ГЗТП), вторичного зеркала с технологическим покрытием (ВЗТП) и оптической скамьи (ОСк) без фокальных приборов;
- сборка телескопа и геометрический контроль взаимного положения ГЗТП, ВЗТП и ОСк в телескопе, демонтаж из телескопа ГЗТП и ВЗТП;
- чистовая сборка телескопа и геометрический контроль взаимного положения ОСк, главного и вторичного зеркал с отражающим покрытием $Al+MgF_2$ в телескопе.

Идентификационная юстировка оптической системы выполняется на специализированном измерительном стенде и состоит из:

- интерферометрического контроля оптической системы, определяющего характеристики отражённого волнового фронта для изображения, построенного оптической системой телескопа Т-170М на оси телескопа (в точке фокуса) и в зонах расположения входных щелей блока спектрографов;
- собственно идентификационной юстировки оптической системы (определение и формирова-

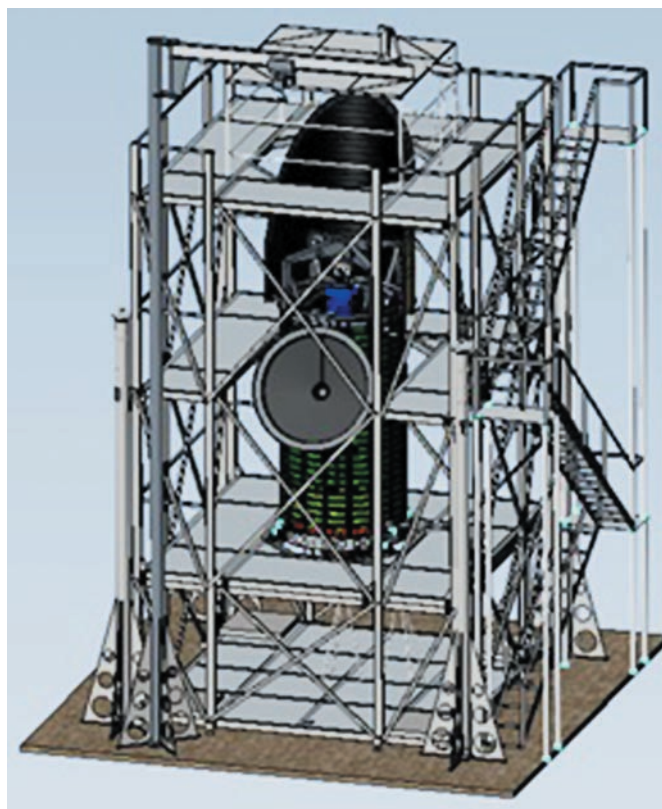


рисунок 10. Трёхмерная модель стапеля комплексного контрольно-измерительного стенда телескопа Т-170М



рисунок 11. Стапель комплексного контрольно-измерительного стенда в ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина»

ние оптимального взаимного положения главного и вторичного зеркал, точки фокуса, при котором достигается максимально возможное качество изображения в точке фокуса).

При идентификационной юстировке оптической системы применяется следующее оборудование: интерферометр Verifire IQ-410V фирмы Zygo с апертурой 4" и длиной волны 632.8 нм, компьютер и программные пакеты MetroProX, DynaPhase с коррекцией вибраций; плоское эталонное зеркало БЛ5.950.490 (световой диаметр 788 мм) в механизме перемещений и юстировки вместе с системой обезвешивания; программный пакет WinFringe с модулем субапертур; специализированный измерительный стенд оптической системы, входящий в состав комплексного контрольно-измерительного стенда телескопа Т-170М; кондуктор оптической скамьи с имитатором точки фокуса; лазерный трекер API Tracker 3-15.

Важное значение имеет стендовое оборудование. На рисунке 10 показана модель комплексного контрольно-измерительного стенда телескопа Т-170М, а на рисунке 11 – его реализация в ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Комплексный стенд находится в чистой зоне участка сборки телескопа ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», где будут обеспечены следующие характеристики окружающей среды:

- чистота воздуха не ниже класса 7 ИСО ГОСТ ИСО 14644-1-2002;
- температура $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$;
- температурный градиент по трассе интерферометрического контроля при его проведении не более $0.1^\circ\text{C}/\text{м}$ в течение 0.5 часа;
- относительная влажность не более 45%;
- атмосферное давление от 97 до 110 кПа (от 645 до 795 мм рт. ст.).

Система виброзащиты обеспечивает максимальные перемещения зеркал и измерительных приборов, установленных на ферме стапеля, не более 0.25 мкм в полосе частот от 1 до 3 Гц, не более 0.15 мкм в полосе частот выше 3 Гц.

Фиксация взаимного положения ГЗТП, ВЗТП и ОСк (посадочное место БКП) выполняется на стенде для разгруженного и неразгруженного главного зеркала и включает в себя контроль центрирования оптической системы, воздушного промежутка и заднего отрезка.

В дальнейшем в телескопе выполняется контроль вышеуказанных параметров для неразгруженного главного зеркала. Используемые методы фиксации взаимного положения зеркал ранее применялись при юстировке БТА и других наземных телескопов и дополняются измерениями с помощью лазерного трекера API Tracker 3-15.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Требования к качеству оптики ультрафиолетового телескопа предельно высоки. Изготовление высококачественных оптических элементов такого крупного космического телескопа, как Т-170М – весьма сложная технологическая задача. Также сложной задачей являются выполняемые в наземных условиях сборка и юстировка телескопа, с тем чтобы после вывода в космос его характеристики были на самом высоком уровне. Эти задачи отечественная промышленность в содружестве с учеными успешно решает.

Авторы выражают благодарность В.В. Котову за проделанную работу, результаты которой использовались при написании данной статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Боярчук А.А., Мошечев А.А. 30 лет первой отечественной астрофизической станции «АСТРОН» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 3-7.

Боярчук А.А., Шустов Б.М., Мошечев А.А., Сачков М.Е. Проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2012. № 4. С. 64-73.

Боярчук А.А., Стешенко Н.В., Тербиж В.Ю. Оптическая система космического телескопа Т-170М // Известия Крымской астрофизической обсерватории. 2008. № 1. С. 229-239.

Жупанов В.Г., Федосеев В.Н., Голышко Е.А., Мошечев А.А. и др. Функциональное покрытие оптических элементов комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 92-96.

Яскович А.Л., Власенко О.В., Макаров В.П. Оптическая схема телескопа Т-170М комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 61-66.

Vlasenko O., Zverev A., Sachkov M. Using the DP-190 glue for adhesive attachment of a large space mirror and its rim // Proc. of the SPIE. 2014. 9151-132.

Zhupanov V., Vlasenko O., Sachkov M., Fedoseev V. New facilities for Al+MgF₂ coating for 2-m class mirrors for UV // Proc. of the SPIE. 2014. 9144-112.

Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A.I. et al. WSO-UV-ultraviolet mission for the next decade // Astrophys. Space Sci. 2009. 320. P. 187-190.

Shustov B., Sachkov M., Gómez de Castro A.I. et al. World space observatory-ultraviolet among UV missions of the coming years // Astrophys. Space Sci. 2011. 335. P. 273-282.

Статья поступила в редакцию 23.09.2014 г.

БЛОК СПЕКТРОГРАФОВ ПРОЕКТА «СПЕКТР-УФ»

SPECTROGRAPHS UNIT OF «SPEKTR-UF» MISSION

И.С. Саванов¹,
доктор физико-математических
наук, savanov@inasan.ru;
I.S. Savanov

Б.М. Шустов¹,
доктор физико-математических
наук, член-корреспондент РАН,
shustov@inasan.ru;
B.M. Shustov

М.Е. Сачков¹,
доктор физико-математических
наук, msachkov@inasan.ru;
M.E. Sachkov

А.С. Шугаров¹,
shugarov@inasan.ru;
A.S. Shugarov

Д.С. Насонов¹,
nasonov@inasan.ru;
D.S. Nasonov

В.Е. Панчук²,
panchuk@sao.ru;
V.E. Panchuk

М.В. Юшкин²,
yumaks@gmail.com;
M.V. Yushkin

Т.А. Фатхуллин²,
timur@sao.ru;
T.A. Fatkhullin

С.Ю. Самойлов³,
S2916@mail.ru;
S.Yu. Samoylov

Представлено описание блока спектрографов (БС) – основного прибора космического проекта «СПЕКТР-УФ». Блок спектрографов включает в себя три канала и предназначен для получения спектров высокого ($R=50000$) и низкого ($R=1000$) разрешения наблюдаемых объектов в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного излучения (115–310 нм). Рассматриваются основные свойства новой конструкции блока спектрографов и статус изготовления его образцов и макетов.

*Ключевые слова: спектрограф;
ультрафиолетовая астрономия;
космическое приборостроение.*

ВВЕДЕНИЕ

Целью проекта «СПЕКТР-УФ», известного также как международный проект WSO-UV (World Space Observatory–Ultraviolet, Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет, ВКО-УФ), является создание космической обсерватории, предназначенной для проведения наблюдений, в основном, в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне электромагнитного спектра (длины волн 115–305 нм). Данный спектральный диапазон недоступен для наблюдений с поверхности Земли, поэтому наблюдения с космическим телескопом открывают беспрецедентные возможности изучения большого числа интереснейших космических объектов и важнейших астрофизических процессов. Основные научные задачи проекта (они включены в базовую программу) кратко могут быть сформулированы следующим образом:

A description of the spectrographs unit (SU) is presented which is the main instrument of «SPEKTR-UF» space mission. The spectrographs unit includes three channels and is intended for acquisition of spectrums of high ($R=50000$) and low ($R=1000$) resolution of the observed objects in the electromagnetic radiation's ultraviolet range (115–310 nm). This article covers main properties of the spectrographs unit new structure and current status of its mockups and prototypes manufacturing.

*Key words: spectrograph;
ultraviolet astronomy;
space instruments engineering.*

- определение барионной составляющей Вселенной, исследования химической эволюции Вселенной;
- исследования образования и эволюции нашей Галактики, исследования взаимодействия газа и звезд, роли влияния магнитных полей на звездообразование;
- физика процессов аккреции и истечения вещества;
- исследования атмосфер экзопланет, астрохимия в присутствии поля сильного УФ-излучения.

Подробное обсуждение научной программы проекта «СПЕКТР-УФ» можно найти в статьях (*Shustov B. et al.*, 2011; *Sachkov M. et al.* WSO-UV project, 2014; *Sachkov M. et al.* WSO-UV project for high-resolution..., 2014; *Шустов Б.М. и др.*, 2014). Реше-

¹ ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

² Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия, Карачаево-Черкесская республика, Нижний Архыз.
Special Astrophysical Observatory, Russia, Karachai-Cherkessian Republic, Nizhnij Arkhyz.

³ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

ние поставленных задач невозможно без получения высококачественного спектрального наблюдательного материала.

В состав комплекса научной аппаратуры (КНА) обсерватории «СПЕКТР-УФ» входят телескоп Т-170М диаметром 170 см и комплекс научных приборов, состоящий из блока спектрографов и камеры поля. Отчасти, полезные научные функции могут выполнять камеры датчиков системы точного гидирования (СДГ). Научные приборы позволяют получать спектры излучения космических объектов высокого и низкого разрешения, высококачественные изображения как протяженных источников, так и звездных полей в различных фильтрах, что позволит, в частности, получать важные фотометрические данные. Более подробно о КНА см. (Сачков М.Е. и др., 2014).

Как отмечено в статье (Шустов Б.М. и др., 2014), большая часть наблюдаемого вещества во Вселенной находится в состоянии, которое наиболее эффективно диагностируется методами ультрафиолетовой спектроскопии, поэтому спектрографы заслуженно рассматриваются как основные приборы космической обсерватории. В проекте «СПЕКТР-УФ» предусмотрено два спектрографа (канала) высокого разрешения ($R > 50000$) и один спектрограф (канал) с высокой (в англ. варианте – *long*, т.е. длинной) щелью и низким спектральным разрешением ($R \sim 1000$). Все спектрографы объединены в блок спектрографов (БС). В английском (международном) варианте документов блок спектрографов носит название WUVS (WSO-UV Ultra-Violet Spectrographs, т.е. ультрафиолетовые спектрографы проекта ВКО-УФ).

На протяжении ряда лет основными участниками кооперации по спектрографу были Германия, Россия, Украина. Германия была лидером, и разрабатываемый ею при участии партнеров комплекс спектрографов HIRDES (High Resolution Dual Echelle Spectrograph) рассматривался как вклад этой страны в проект (Kappelman N. et al., 2006). К работе в проекте привлекались эксперты и организации других стран (Италии, Китая), но их деятельность не была поддержана достаточным финансированием со стороны космических агентств. Проект спектрографа, создаваемого в Германии, был основан на опыте создания космического спектрографа эксперимента ORFEUS (Orbiting and Retrievable Far and Extreme Ultraviolet Spectrometer), успешно осуществленного в 1993 и 1996 годах (Barnstedt J. et al., 1999). Проект комплекса спектрографов несколько менялся, и последняя модификация получила название WUVS (Reutlinger A. et al., 2011).

В 2012 году, по причине невозможности финансирования со стороны своего космического агентства DLR, Германия приняла решение о прекращении

участия в проекте. Это обстоятельство обострило вопрос о поставке в проект спектрографов. В сложившейся ситуации Роскосмос принял решение о выделении необходимого финансирования для создания ультрафиолетовых спектрографов. Головной организацией за создание блока спектрографов был назначен Институт астрономии РАН (ИНАСАН).

Проект спектрографа, создаваемого в Германии, предполагал применение МКП-детекторов, также производимых в Германии, в Тюбингенском Университете. Хорошо известно, что детекторы этого типа (обладающие рядом неоспоримых преимуществ: отсутствие шума считывания, низкий темновой ток, возможность работы в режиме счета фотонов) хорошо зарекомендовали себя в предыдущих ультрафиолетовых космических проектах. В то же время детекторам этого типа присущи следующие недостатки: невысокий динамический диапазон, сравнительно невысокая чувствительность в ближнем УФ-диапазоне и, что главное, наблюдения ярких объектов приводят к существенному снижению времени жизни прибора. С учетом этих обстоятельств, а также значительного прогресса в создании ПЗС матриц (Shugarov A. et al., 2014), в России было принято решение об оснащении блока спектрографов проекта «СПЕКТР-УФ» детекторами этого типа. Изменения типа фотоприемников, материала конструкции (немецкие коллеги предполагали создание корпуса спектрографа из CeSiC (Reutlinger A. et al., 2011) привели нас к необходимости практически полностью пересмотреть дизайн прибора. Ответственность за разработку оптической системы взяли на себя эксперты из CAO РАН (Panchuk V. et al., 2014).

В данной статье представлены основные характеристики блока спектрографов, включая новую оптическую схему, конструкцию и текущее состояние разработки. В разделе 2 приведены новые оценки эффективности трех каналов спектрографа в комбинации с телескопом, основанные на наиболее современных сведениях об отражающих и пропускающих свойствах используемых оптических элементов (Жупанов В.Г. и др., 2014) и приемников излучения (Шугаров А.С. и др., 2014).

1. Оптическая схема и конструкция блока спектрографов

Блок спектрографов (БС) функционально имеет три канала для получения спектров: канал вакуумного УФ-спектрографа (ВУФЭС), канал УФ-спектрографа (УФЭС), канал спектрографа с длинной щелью (СДЩ). Основные задаваемые техническим заданием характеристики каналов представлены в таблице.

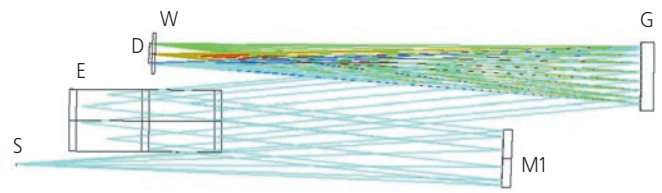
таблица – Основные характеристики каналов БС

параметр	ВУФЭС	УФЭС	СДЩ
рабочий спектральный диапазон	от 115 до 176 нм	от 174 до 310 нм	от 115 до 305 нм
спектральное разрешение	не менее 50000	не менее 50000	не менее 1000
диаметр входной щели	80 мкм	80 мкм	80×6000 мкм

Оптическая схема рассчитывалась, чтобы удовлетворить этим требованиям, а также оптимизировать согласование с приемниками излучения и потери информации (излучения) в спектрографе.

Поскольку в качестве детекторов во всех трех каналах спектрографа были выбраны ПЗС камеры, в САО РАН был выполнен новый оптический расчет и создана оптическая схема БС (Panchuk V. et al., 2014). Она имеет два существенных отличия от ранее существовавшей оптической схемы.

Во-первых, в канале УФЭС в качестве кросс-дисперсора вместо призмы предлагается применить комбинированный зеркальный оптический элемент, совмещающий функции кросс-дисперсора и камеры. При этом принципиальные оптические схемы каналов УФЭС и ВУФЭС становятся идентичными (рисунок 1).



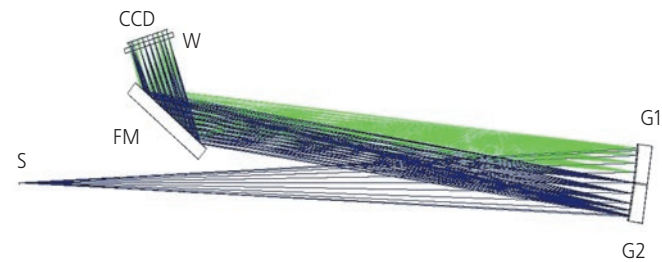
S – входная щель; **M1** – коллиматор; **E** – дифракционная решетка; **G** – кросс-дисперсор и камера спектрографа; **D** – детектор со входным стеклом **W**.

рисунок 1. Оптическая схема каналов УФЭС и ВУФЭС

Рисунок 1 также иллюстрирует принцип работы каналов УФЭС и ВУФЭС. Излучение небесного объекта, собираемого телескопом, через входную щель **S** попадает на коллиматор **M1** и заполняет апертуру дифракционной решетки **E**. Разложенный на спектральные порядки свет попадает на оптический элемент **G**, который осуществляет функции кросс-дисперсора (пространственно разводит порядки спектров в направлении перпендикулярном дисперсии) и камеры спектрографа. Построенное двумерное изображение спектра объекта регистрируется детектором **D**, закрытым входным стеклом **W**, также являющимся элементом оптической схемы прибора.

Во-вторых, схема СДЩ (рисунок 2) предусматривает использование сегментированных тороидальных решеток и плоского зеркала, так что весь спектральный диапазон 115–305 нм проецируется на один де-

тектор. В канале СДЩ свет проходит через щель **S**, заполняет апертуру двух тороидальных решеток **G1** и **G2**, наклоненных на 0,2 градуса относительно друг друга, отражается от плоского зеркала **FM** и через окно детектора **W** попадает на ПЗС камеру.



S – щель спектрографа; **G1** и **G2** – тороидальные решетки; **FM** – плоское зеркало; **CCD** – детектор с окном **W**.

рисунок 2. Оптическая схема канала СДЩ

На рисунках 3–5 приводятся схемы расположения спектров на ПЗС детекторах для каналов ВУФЭС, УФЭС и СДЩ соответственно.

Конструктивно БС состоит из оптико-механического блока (ОМБ) и блоков электроники (БЭ). ОМБ БС включает в свой состав: корпус; оптические элементы БС; приемники излучения трех каналов БС; электромеханические затворы для ПЗС детекторов трех каналов; агрегаты средств обеспечения теплового режима, источники излучения для засветки ПЗС детекторов трех каналов, образцы-свидетели для контроля

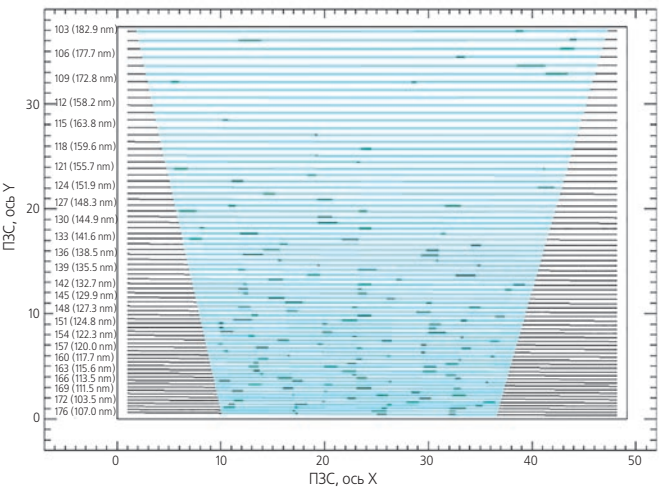


рисунок 3. Расположение спектров на ПЗС детекторе для канала ВУФЭС. Показаны спектральные порядки от 103 (верхний, центральная длина волны 182,9 нм) до 176 (нижний, центральная длина волны 107,0 нм)

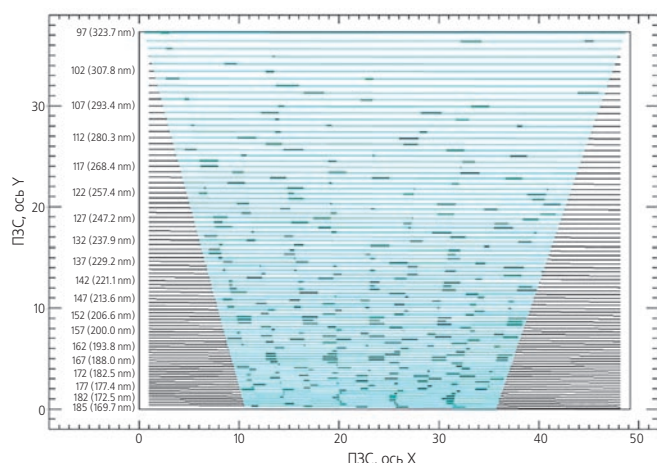


рисунок 4. Расположение спектров на ПЗС детекторе для канала УФЭС. Показаны спектральные порядки от 97 (верхний, центральная длина волны 323,7 нм) до 185 (нижний, центральная длина волны 169,7 нм)

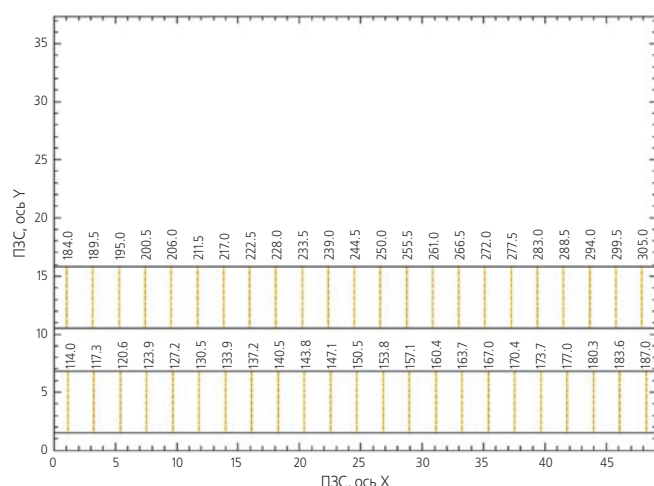


рисунок 5. Расположение спектров на ПЗС детекторе для канала СДЩ. Применение сегментированных тороидальных решеток и плоского зеркала позволяет проецировать весь спектральный диапазон 115–305 нм на один ПЗС детектор. С целью повышения эффективности переноса заряда оба спектра смещены в нижнюю часть детектора

чистоты ОМБ БС, нагреватели, термодатчики. На рисунке 6 представлена трехмерная модель БС.

Геометрическая стабильность спектрографа обеспечивается его конструкцией. Основной несущий каркас выполнен из титановых труб. Отвод тепла от всех источников осуществляется тепловыми трубами. Система охлаждения детекторов включает в себя внешний радиатор, соединенный с детекторами системой из тепловых труб и холодного пальца.

Комплект блоков электроники состоит из контроллера ввода-вывода, блока управления каналами, блока коммутации питания. Электрическая мощность, потребляемая БС, не превышает 130 Вт.

БС должен работать в следующих режимах: рабочий режим; калибровка приемников излучения БС;

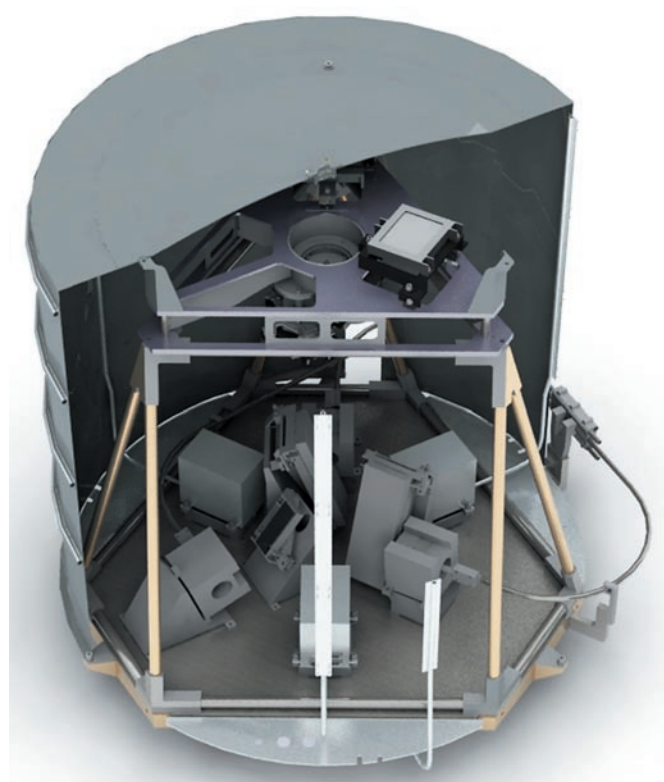


рисунок 6. Трехмерная модель БС

диагностика состояния БС и его работоспособности; дежурный режим. Основным является рабочий режим, в котором осуществляется накопление спектров наблюдаемых космических объектов, первичная обработка и, при необходимости, сжатие наблюдательной научной информации. В основном режиме работы и при калибровке должен функционировать только один канал БС. Максимальная длительность наблюдательного сеанса (наблюдения космических объектов) должна составлять не менее 12 часов.

Для повышения качества получаемого наблюдательного материала с ПЗС детекторами и предотвращения деградации приемников введены система засветки приемников излучения и их нагрев (отжиг) при температуре +20°C.

На момент написания статьи был создан оптический макет БС «СПЕКТР-УФ». Оптические элементы все трех каналов БС создаются в Университете ИТМО (Санкт-Петербург) и Государственном оптическом институте им. С.И. Вавилова (ГОИ). На рисунке 7 представлены элементы оптического макета БС, созданного в ГОИ. К середине 2014 года в ГОИ была осуществлена пробная сборка оптической модели одного канала БС на оптическом столе, и на этом макете получены пробные спектры. Участок спектра Солнца, зарегистрированный с макетом в марте 2014 года, показан на рисунке 8.

Для проведения тестовых оптических работ с БС в ГОИ были созданы имитаторы телескопа Т-170М (рисунок 9) и вакуумный имитатор ВУФЭС со стен-

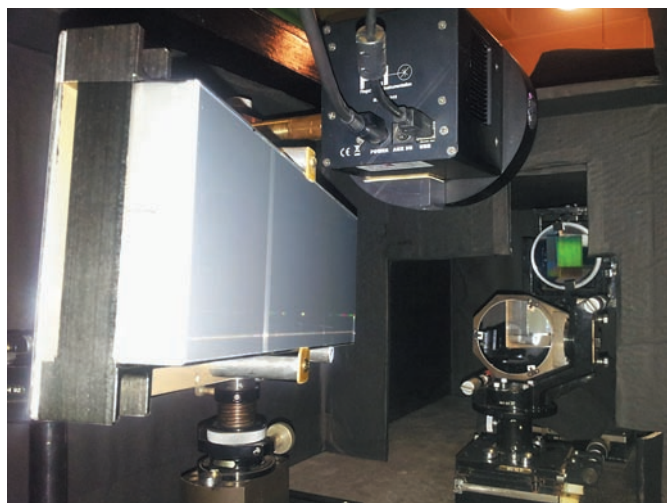


рисунок 7. Оптический макет БС, изготовленный в ГОИ. Вид изнутри со стороны щели. Слева видна эшеле-решетка производства Университета ИТМО

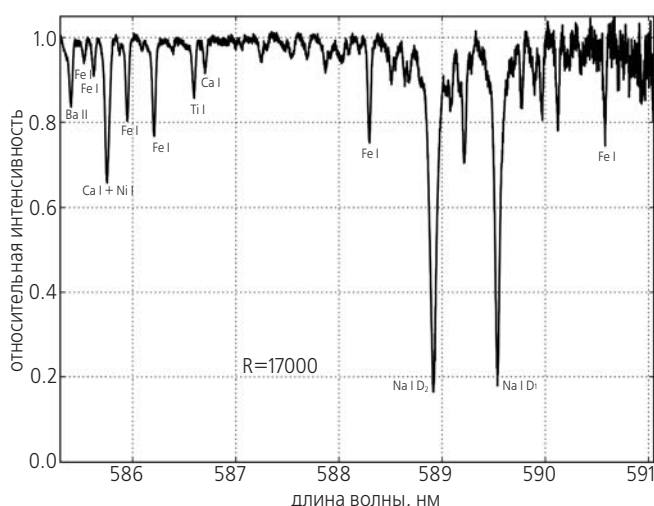


рисунок 8. Пробный спектр, полученный в ГОИ в марте 2014 г. на оптическом макете БС

дом, способным работать в большой вакуумной камере ГОИ (рисунок 10).

Для проведения всех видов испытаний предусматривается создание ряда макетов БС. В 2013 году был изготовлен натурный габаритно-массовый макет (НГММ) БС (рисунок 11), в настоящее время ведется работа над экспериментальным образцом БС для проведения автономных термо-вакуумных испытаний телескопа и над технологическим образцом БС.

2. Эффективность БС

Ключевым вопросом является оценка эффективности каналов БС, которая определяется как произведение эффективностей каждого из элементов оптической схемы соответствующего канала. В первую очередь к ним следует отнести данные, характеризующие отражательные свойства покрытия $Al+MgF_2$



рисунок 9. Оптический имитатор телескопа Т-170М

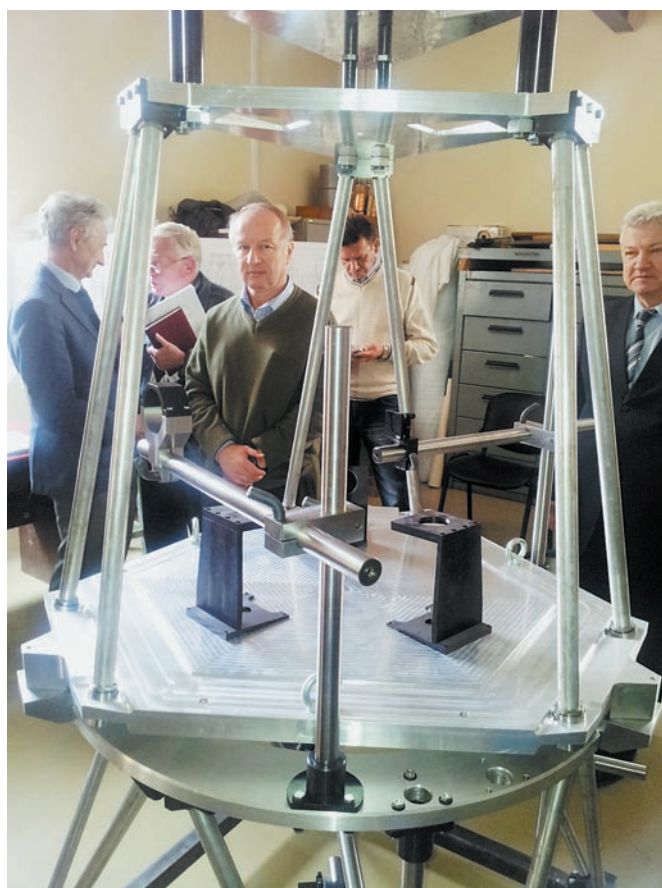
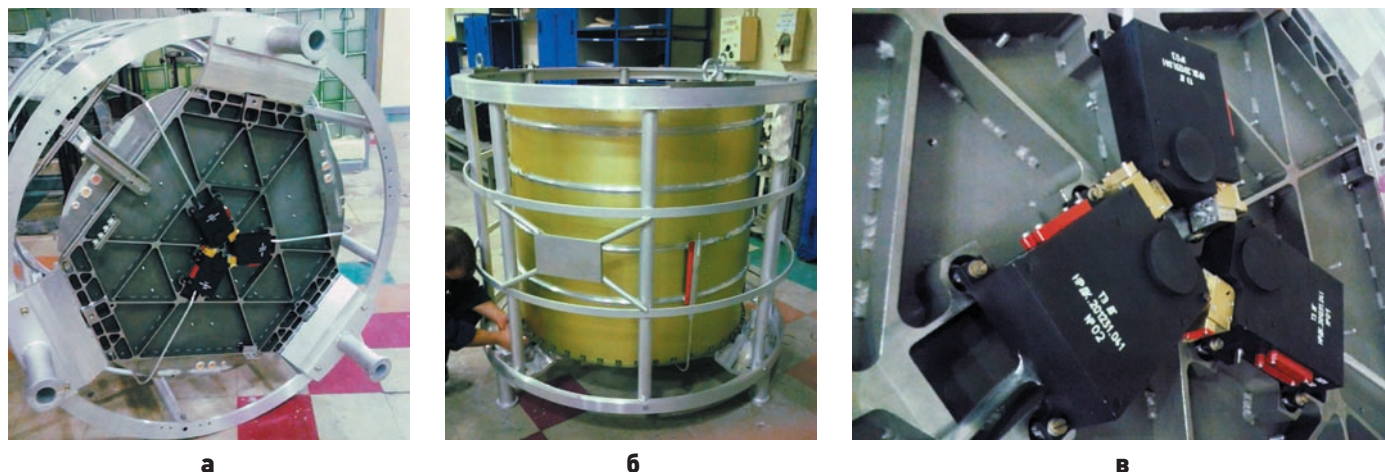


рисунок 10. Вакуумный имитатор ВУФЭС со станом

главного и вторичного зеркал телескопа, покрытий диспергирующих элементов/камер каналов БС, плоского зеркала канала СДЩ, эффективности дифракционных решеток и, наконец, эффективность ПЗС детекторов (рисунок 12). Отметим, что данные, характеризующие отражательные свойства покрытия $Al+MgF_2$, являются не теоретическими, а в их основе лежат реально выполненные измерения (Zhupanov V. et al., 2014; Sachkov M. et al., 2014).

На рисунках 13 и 14 представлены оценки эффективных площадей, рассчитанных для каналов УФЭС,



а, б – общий вид; **в** – фокальный узел с макетами датчиков гида, затворами и входными щелями.

рисунок 11. Натурный габаритно-массовый макет БС, март 2014 г.

ВУФЭС и СДЩ в сопоставлении с данными для COS/HST и STIS/HST – спектрографов космического телескопа Хаббла (КТХ). Отметим, что спектральное разрешение каналов УФЭС и ВУФЭС сопоставимо с разрешением спектрографа STIS (HST) с эшелле-решетками E140 и E230, но выше максимального разрешения, достигаемого при наблюдениях с HST COS ($R=20000$). В дальнем УФ-диапазоне эффективная площадь ВУФЭС сопоставима с результатами для инструментов КТХ, а в области ближнего УФ – должна превосходить их. По нашему мнению, такое превосходство может быть достигнуто благодаря существенному прогрессу в эффективности применяемых ПЗС-детекторов и высокому качеству УФ-покрытия отражающих элементов. При этом следует

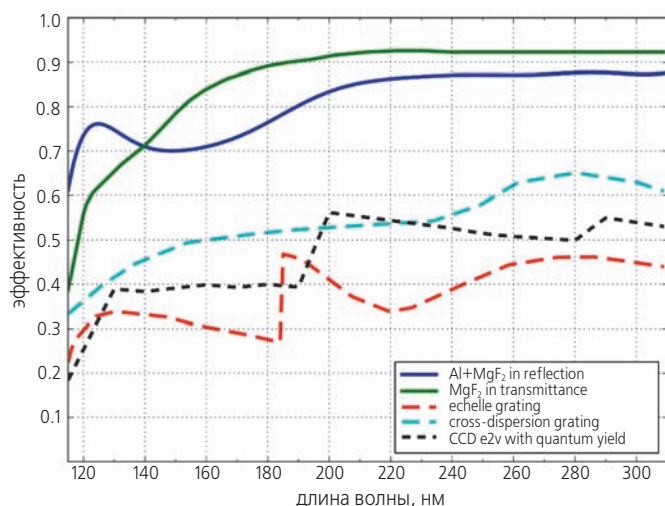


рисунок 12. Эффективность отрагательных поверхностей и различных компонент каналов БС в зависимости от длины волны. Сверху вниз – эффективности: пропускания $\text{Al}+\text{MgF}_2$ (зеленая кривая), покрытия $\text{Al}+\text{MgF}_2$ (синяя кривая), разводящих порядки решеток и камер (пунктирная зеленая кривая), эшелле-решеток (красная пунктирная кривая), ПЗС-детектора (черная пунктирная кривая)

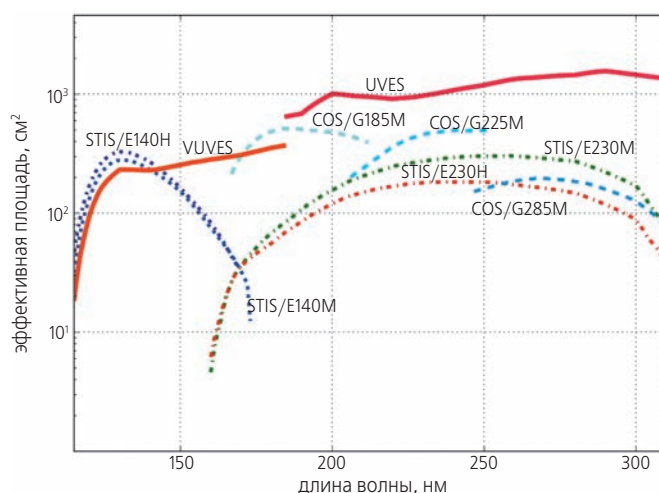


рисунок 13. Эффективная площадь каналов ВУФЭС и УФЭС в зависимости от длины волны. Красная сплошная линия – данные для каналов ВУФЭС и УФЭС; пунктирные кривые различного цвета даны для приборов COS/HST и STIS/HST с различными дифракционными решетками

иметь в виду, что высокая эффективность спектрографов достигается с учетом того, что площадь поверхности зеркала телескопа Т-170М примерно в два раза меньше, чем у КТХ.

Эффективность канала СДЩ в ближней УФ-области будет выше, чем у COS/HST, и лишь в дальнем ультрафиолете может уступать этому прибору КТХ. По информационной способности канал СДЩ превосходит COS/HST, поскольку весь спектральный диапазон канал регистрируется за одну экспозицию, а для COS/HST требуется несколько.

закключение

В статье представлено описание блока спектрографов, являющегося основным научным прибором космического проекта «СПЕКТР-УФ». БС включает

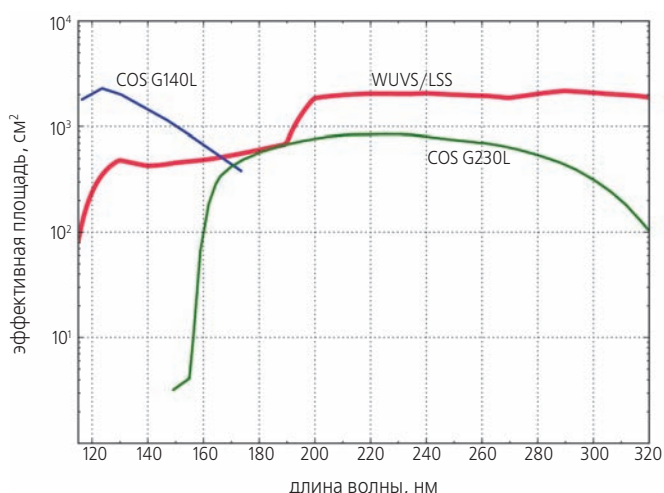


рисунок 14. Эффективная площадь канала СДЩ в зависимости от длины волны. Красная линия – данные для канала СДЩ, синяя и зеленая кривые даны для прибора COS/HST с различными дифракционными решетками

в себя три канала, оснащенных ПЗС-детекторами фирмы e2v, и предназначен для получения спектров высокого ($R=50000$) и низкого ($R=1000$) разрешения наблюдаемых объектов в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного излучения (115–305 нм).

Процесс создания БС идет по плану. Оцениваемая эффективность каналов спектрографа будет сравнима или несколько превысит характеристики спектрографов космического телескопа Хаббла.

Поскольку работу телескопа КТХ планируется остановить во второй половине нынешней декады, исследования со спектральным оборудованием обсерватории «СПЕКТР-УФ» займут уникальное место в космической науке.

список литературы

Жупанов В.Г., Федосеев В.Н., Голышко Е.А., Мошнеев А.А., и др. Функциональное покрытие оптических элементов комплекса научной аппаратуры «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 92-96.

Сачков М.Е., Шустов Б.М., Мошнеев А.А., Власенко О.В. и др. Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 34-39.

Шугаров А.С., Саванов И.С., Кузин С.В. Приемники излучения в проекте «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 86-91.

Шустов Б.М., Сачков М.Е., Боярчук А.А., Мошнеев А.А. и др. Космические перспективы изучения ультрафиолетовой Вселенной: проект «СПЕКТР-

УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 4-15.

Barnstedt J., Kappelman N., Appenzeller I., Fromm A. et al. The ORFEUS II Echelle Spectrometer: Instrument description, performance and data reduction // A&AS. 1999. 134. P. 561-567.

Gomez de Castro A.I., Pagano I., Sachkov M. et al. Science with the World Space Observatory-Ultraviolet. in Chavez M., Bertone E., Rosa-Gonzalez D., Rodriguez-Merino L.H. New Quests in Stellar Astrophysics. II. Ultraviolet Properties of Evolved Stellar Populations. Berlin: Springer, 2009. P. 319-327.

Kappelman N., Barnstedt J., Werner K., Becker-Ross H. et al. WSO/UV spectrographs: the expected performance of HIRDES // Astrophys. Space Sci. 2009. 320. P. 191-195.

Kappelman N., Barnstedt J., Gringel, W., Werner K. et al. HIRDES UV spectrographs, HIRDES UV spectrographs / Space Telescopes and Instrumentation II: Ultraviolet to Gamma Ray. Edited by Turner, Martin J.L.; Hasinger, Günther. Proceedings of the SPIE. 2006. Vol. 6266. id. 62660X.

Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T., Sachkov M. Optical layouts of the WSO-UV spectrographs // Astrophysics and. Space Science. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-2087-4.

Reutlinger A., Sachkov M., Gral C., Brandt C Using the CeSiC material for the WSO-UV spectrographs // Astrophys. Space Sci. 2011. 335. P. 311-316.

Sachkov M., Shustov B., Gomez de Castro A.I. WSO-UV project // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, Issue 6. P. 990-995. DOI:10.1016/j.asr.2013.12.023

Sachkov M., Shustov B., Savanov I., Gomez de Castro A.I. WSO-UV project for high-resolution spectroscopy and imaging // Astronomische Nachrichten. 2014. 335. P. 46-50.

Shugarov A., Savanov I., Sachkov M., Jerram P. et al. UV detectors for spectrographs of WSO-UV project // Astrophys. Space Sci. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-1911-1.

Shustov B., Sachkov M., Gomez de Castro A.I., Werner K. et al. World space observatory-ultraviolet among UV missions of the coming years // Astrophys. Space Sci. 2011. 335. P. 273-282.

Zhupanov V., Vlasenko O., Sachkov M., Fedoseev V. New facilities for Al+MgF2 coating for 2-m class mirrors for UV // Proc. of the SPIE. 2014. 9144-112.

Статья поступила в редакцию 23.09.2014 г.

БЛОК КАМЕР ПОЛЯ

THE ISSIS

А.И. Гомес де Кастро¹, Б. Переа Абарка¹, А.С. Шугаров²,
 профессор, aig@ucm.es; grperea@ucm.es; shugarov@inasan.ru;
 A.I. Gomez de Castro B. Perea Abarca A.S. Shugarov

И.С. Саванов²,
 доктор физико-математических наук, savanov@inasan.ru;
 I.S. Savanov

М.Е. Сачков²,
 доктор физико-математических наук, msachkov@inasan.ru;
 M.E. Sachkov

Дано описание блока камер поля – основного научного инструмента проекта «СПЕКТР-УФ» для получения прямых снимков в УФ-области. Представлены научное обоснование выбранных параметров БКП, основные технические характеристики и краткое описание конструкции.

Ключевые слова: научные инструменты; ультрафиолет; МКП.

ВВЕДЕНИЕ

Блок камер поля (БКП) является одним из основных научных приборов проекта «СПЕКТР-УФ» (Шустов Б.М. и др., 2014; Sachkov M. et al., 2014) и предназначен для получения высококачественных прямых снимков космических объектов в УФ-диапазоне с использованием светофильтров, а также для получения снимков в режиме полевой спектроскопии низкого разрешения.

В соответствии с Соглашением между Роскосмосом и CDTI (Centre for the Development of Industrial Technology of Spain) БКП является вкладом Испании в международный проект «World Space Observatory-Ultraviolet» (Спектр-УФ). БКП присвоено название ISSIS (Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument) – инструмент для получения изображений и бесщелевой спектроскопии (Gomez de Castro A.I. et al., 2011; 2012).

Головной научной организацией по разработке БКП является Университет Комплутенсе г. Мадрида (UCM), основным индустриальным подрядчиком – компания SENER.

После запуска обсерватории «СПЕКТР-УФ» БКП будет единственным УФ-инструментом для получения качественных изображений в УФ на высокой околоземной орбите.

Основным физическим фактором, ограничивающим чувствительность БКП, является ультрафиолетовый фон, который для высокой орбиты преимущественно состоит из зодиакального света и диффузного

There is a description of the Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument for Surveys which is one of main scientific instrument of «SPEKTR-UF» mission for direct imaging of ultraviolet-domain. A scientific rationale of the ISSIS selected parameters is presented, as well as main technical characteristics, a brief structure description.

Key words: scientific instruments; ultraviolet; MCP.

галактического фона, образованного рассеянием света от звезд на пыли. Минимизация собственных шумов приемников излучения БКП и использование в оптической схеме зеркал с высоким коэффициентом отражения в УФ-области позволит приблизить чувствительность БКП к предельно возможному уровню, определяемому размером главного зеркала телескопа Т-170М.

В первую очередь БКП предназначен для исследования слабых точечных УФ-источников и протяженных источников с использованием светофильтров. Также БКП оснащен дифракционными решётками для работы в режиме полевой спектроскопии низкого разрешения. Данный режим позволяет проводить спектральный анализ слабых точечных и протяженных объектов.

Среди основных научных задач, для решения которых предназначен БКП, можно отметить следующие:

- образование галактик;
- образование и эволюция Млечного пути;
- физика аккреции и истечений;
- атмосферы планет Солнечной системы и экзопланет;
- астрохимия в присутствии сильных УФ-полей излучения.

Научные задачи, стоящие перед БКП, определяют основные требования к техническим параметрам БКП:

¹ Мадридский Университет Комплутенсе, Испания, Мадрид.
 Madrid Complutense University, Spain, Madrid.

² ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
 Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

- обеспечение получения прямых снимков с максимально доступным для телескопа Т-170М угловым разрешением 0.1" и максимальной чувствительностью;
- режим спектроскопии с низким разрешением $R \sim 500$;
- расширение динамического диапазона для регистрации более ярких объектов;
- режим коронографа;
- высокое временное разрешение для отслеживания быстропеременных источников.

1. Описание конструкции БКП

БКП имеет два практически одинаковых канала, работающих попеременно:

- канал дальнего УФ (FUV), диапазон 115–175 нм;
- канал ближнего УФ (NUV), диапазон 185–320 нм.

Каждый из каналов может работать в одном из трех режимов:

- получение изображения;
- полевая спектроскопия;
- калибровка от встроенного источника УФ-излучения.

Основные характеристики БКП приведены в таблице 1.

таблица 1 – Основные характеристики БКП

параметр	канал FUV	канал NUV
спектральный диапазон, нм	115–175	185–320
поле зрения, угл. с	70×75	70×75
поле зрения при спектроскопии, угл. с	36×65	31×61
масштаб пикселя, угл. с	0.036	0.036
пространственное разрешение, угл. с	0.11	0.11
формат детектора (эквивалент), пиксель	2048×2048	2048×2048
тип приемника излучения	CsI MCP	CsTe MCP
диаметр фотокатода приемника излучения, мм	40	40
спектральное разрешение	500	500
временное разрешение*, мс	40	40
предельная скорость счета*, отсчетов/с/пиксель	5	5
количество светофильтров	5	5

* в режиме получения полного кадра

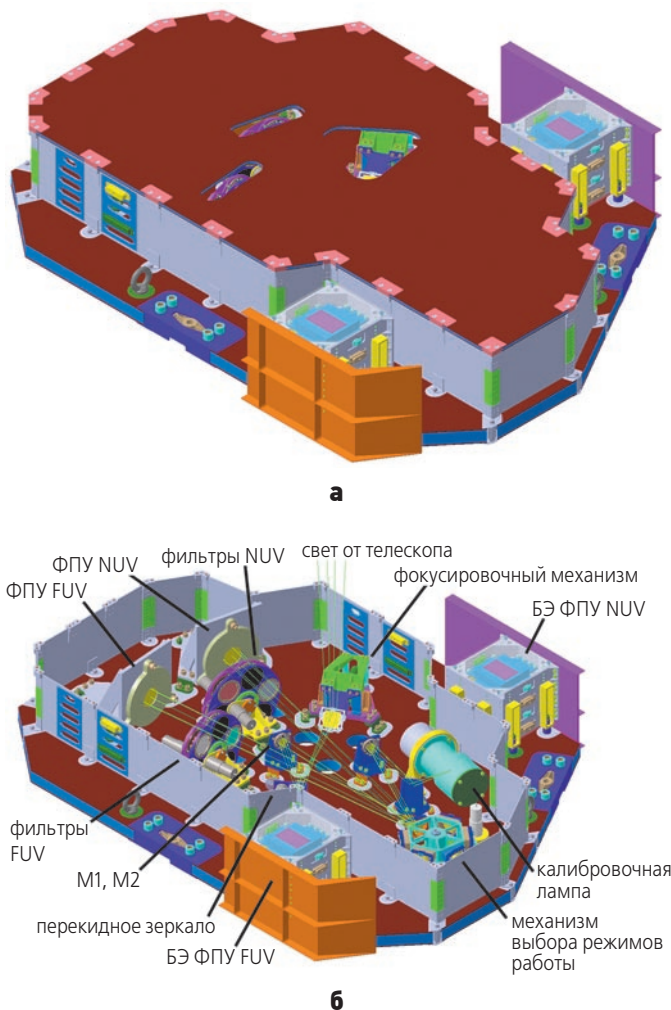
БКП состоит из следующих узлов:

- оптико-механический блок (ОМБ), расположенный в инструментальном отсеке телескопа Т-170М;
- два контроллера ввода-вывода, расположенных на проставке инструментального отсека;

- блок управления БКП и блок питания, расположенные на панели внешнего расположения.

Общая масса БКП составляет 99 кг, из них масса ОМБ – 61 кг. Максимальное энергопотребление БКП в режиме калибровки составляет 68 Вт. Типовой потребление – 56 Вт, из них 31 Вт приходится на ОМБ.

Наиболее сложной и технологичной частью БКП является оптико-механический блок, расположенный в узком пространстве между узлом главного зеркала телескопа и оптической скамьей. Высота ОМБ составляет 17 см, общий вид ОМБ БКП приведен на рисунке 1.



а – общий проектный вид; б – ход лучей.

рисунк 1. Оптико-механический блок

В состав ОМБ БКП входят следующие элементы:

- силовой корпус, совмещенный с оптической скамьей;
- фокусирующий механизм с перебрасывающим зеркалом;
- два дополнительных зеркала оптической системы M1 и M2;
- механизм выбора режимов работы;

- четыре турели со светофильтрами, по две на каждый канал;
- два фотоприемных устройства (ФПУ) каналов FUV и NUV, совмещенных с высоковольтными источниками питания;
- два блока электроники ФПУ каналов FUV и NUV;
- калибровочная лампа;
- подвижное зеркало системы калибровки;
- нагреватели и термодатчики.

Для уменьшения тепловыделения внутри ОМБ все прочие электронные узлы располагаются в отдельных блоках за пределами ОМБ. Электронные схемы управления основных механизмов ОМБ расположены в блоках контроллеров ввода-вывода в непосредственной близости от ОМБ для уменьшения длины межблочных кабелей. Остальные электронные узлы располагаются на панели внешнего расположения.

Корпус ОМБ, одновременно являющийся оптической скамьей, изготовлен американской компанией ATK. Материал корпуса – CFRP (усиленный фиберпластик) с внутренними сотовыми элементами и титановыми вставками для крепежа механизмов БКП. Данный материал обеспечивает необходимую размеростабильность оптической скамьи ОМБ при умеренном весе. Температура оптической скамьи поддерживается на уровне $20 \pm 1^\circ\text{C}$ с помощью нагревателей.

Электронные блоки ФПУ БКП расположены по краям ОМБ за пределами кожуха оптического тракта на теплоизолирующих подставках и снабжены радиаторами для излучения тепла в область инструментального отсека телескопа Т-170М. Это сделано для минимизации тепловых потоков в области нахождения оптических элементов.

Оптическая схема канала FUV в режиме получения изображения приведена на рисунке 2, схема канала NUV аналогична приведенной.

По центру фокальной поверхности телескопа Т-170М в области наилучших изображений рас-

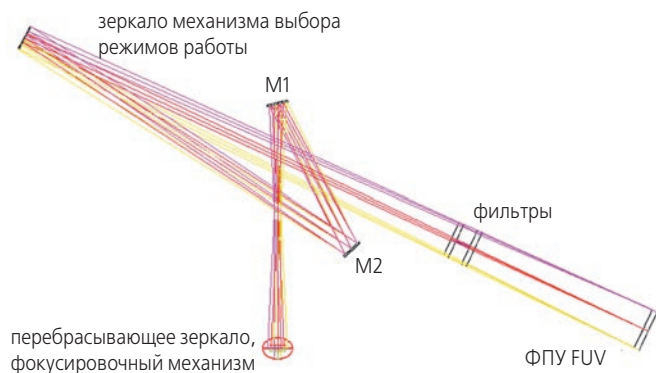


рисунок 2. Оптическая схема канала FUV в режиме получения изображений

полагается входное перебрасывающее зеркало БКП, снабженное фокусирующим механизмом с диапазоном подвижки 0.6 мм. Фокусирующий механизм позволит достичь максимального качества изображения без необходимости частой перефокусировки телескопа Т-170М вторичным зеркалом при переходе от одного научного прибора к другому.

Для достижения предельного углового разрешения телескопа 0.1" в оптическую схему БКП введены два дополнительных зеркала М1 и М2, удлиняющие эквивалентное фокусное расстояние телескопа.

После отражения от зеркал свет попадает на вращающийся барабан с шестью фиксированными позициями – механизм выбора режимов работы (рисунок 3), несущий на себе шесть оптических элементов: две дифракционные решетки и четыре плоских зеркала, расположенных под разными углами наклона. С помощью данного механизма осуществляется переключение между каналами FUV и NUV, а также выбор режима работы БКП – получение изображений, полевая спектроскопия или получение калибровочных кадров от встроенной лампы.

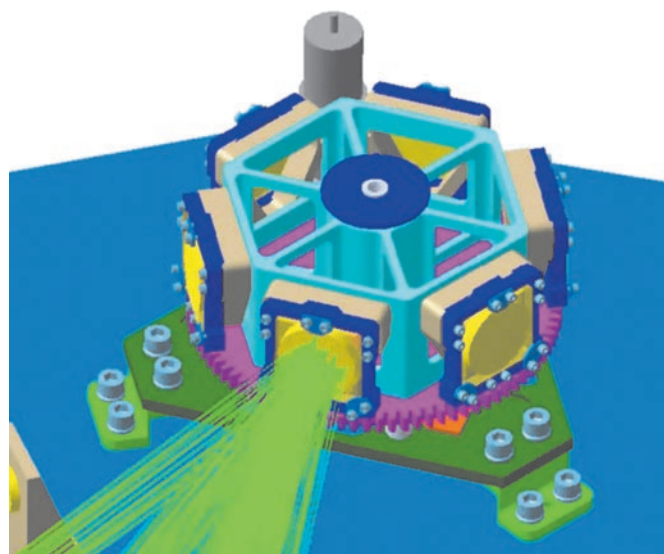


рисунок 3. Механизм выбора режимов работы БКП

Непосредственно перед ФПУ в каждом из каналов располагаются по две турели со сменными светофильтрами. Предварительные параметры используемых фильтров приведены в таблице 2. Ограничения по высоте корпуса ОМБ БКП, необходимость размещения нейтральных фильтров и глухих позиций уменьшает количество доступных научных фильтров.

Оба канала БКП оборудованы однотипными фотоприемными устройствами на основе микроканальных пластин с оптической системой считывания с помощью КМОП-сенсора (Шугаров А.С. и др., 2014). Для канала FUV используется фотокатод CsI, для NUV – CsTe. Оба фотокатода являются солнечно-слепыми. Разработчиком ФПУ для БКП является испанская

таблица 2 – Светофильтры БКП

позиция	FUV, турель 1	NUV, турель 2	NUV, турель 1	NUV, турель 2
1	нейтральный 1	F115LP	нейтральный 1	F280N
2	глухая	F125LP	глухая	F308N
3	нейтральный 2	F140LP	нейтральный 2	F232N
4	глухая	F150LP	глухая	резерв
5	открытая	F165LP	открытая	резерв
6	глухая	открытая	глухая	открытая

компания SENER, ответственная за изготовление БКП в целом. Фоточувствительная головка поставляется английской компанией Photek. Блоки электроники разрабатываются компанией SENER.

ФПУ на основе МКП обладают очень высокой чувствительностью, поскольку работают в режиме счета фотонов и имеют очень низкий собственный темновой ток. С целью экономии бортовой памяти и уменьшения нагрузки на радиолинию передачи научных данных в БКП также будет реализован режим накопления кадра.

Использование ФПУ на основе МКП обуславливает ряд ограничений. Поле зрения БКП определяется размером доступных фотокатодов и составляет 70 угл. с. Для расширения динамического диапазона в каждом из каналов будут использоваться по два нейтральных светофильтра; обсуждается возможность нанесения на входное окно приемника излучения маски. С целью равномерной выработки ресурса поверхности МКП необходимо следить за тем, чтобы яркие источники каждый раз проецировались на разные области детектора. Получение снимков в оптическом диапазоне с помощью БКП будет невозможно.

Для предотвращения риска необратимого выхода из строя ФПУ на основе МКП при высоком уровне засветки будет применяться электронная схема защиты ФПУ, а также глухие позиции в турели светофильтров, перекрывающие световой поток от телескопа.

Режим счета фотонов имеет ряд преимуществ по сравнению с режимом накопления, а именно возможность изучения быстрой переменности объектов, улучшенные возможности по фильтрации следов космических частиц на этапе наземной обработки. Используя информацию от системы датчиков гида о фактическом положении телескопа, будет возможно осуществлять цифровую коррекцию остаточных колебаний телескопа Т-170М для предотвращения смаза изображения и достижения предельного углового разрешения на снимках при длительных экспозициях.

Для калибровки равномерности чувствительности ФПУ и отслеживания его деградации, а также учета возможной неоднородности светофильтров в со-

став БКП включена система получения калибровочных кадров равномерной засветки ФПУ. В систему калибровки БКП входят источник УФ-излучения на основе дейтериевой лампы, оптическая система, формирующая равномерную засветку ФПУ при прохождении света через светофильтры, подвижное зеркало перед зеркалом М2. Калибровочные кадры будут получаться раз в месяц.



а



б

а – оптико-механический блок; б – блоки электроники.

рисунок 4. Натурный габаритно-массовый и тепловой эквивалент БКП, 2012 г.

Управление работой БКП осуществляется от блока управления БКП, который расположен на панели внешнего расположения телескопа Т-170М. Управление БКП и прием научных данных осуществляется по шине SpaceWire.

Все блоки электроники БКП полностью дублированы и имеют перекрестные линии связи, за исключением ФПУ и калибровочной лампы.

В конце 2012 года компания SENER завершила изготовление натурного габаритно-массового теплового эквивалента (НГМТЭ) БКП (рисунок 4) и поставила его в Россию. Основным критический элемент НГМТЭ ОМБ БС – корпус из композитного материала, был изготовлен по штатной технологии и успешно прошел цикл автономных испытаний.

Блоки электроники НГМТЭ БКП успешно прошли термовакuumные испытания на территории НПО им. С.А. Лавочкина в составе сборки панели внешнего расположения (рисунок 5).

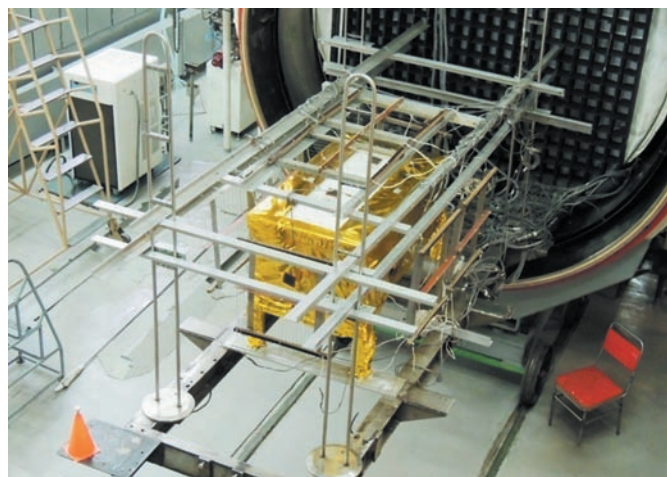


рисунок 5. Термовакuumные испытания блоков БКП в составе ППВР. НПО им. С.А. Лавочкина, 2013 г.

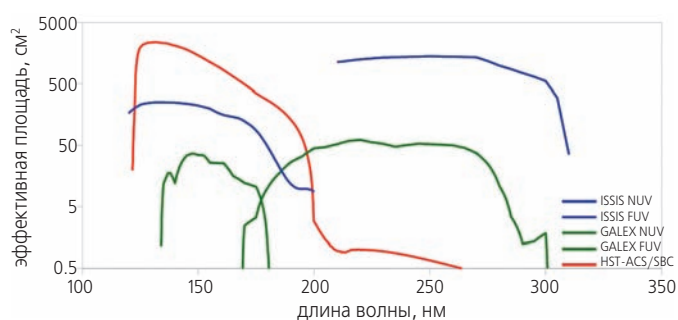
2. Оценка чувствительности БКП

Для оценки чувствительности БКП были проведены расчеты с учетом параметров оптических элементов БКП, ФПУ и телескопа. На рисунке 6 приведена эффективная площадь обоих каналов БКП и сравнение с аналогичными инструментами космических телескопов HST и GALEX в режимах получения изображения и полевой спектроскопии.

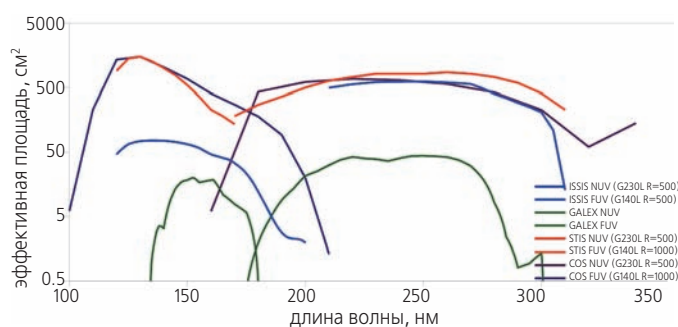
закключение

В статье представлено описание блока камер поля, являющегося основным научным прибором космического проекта «СПЕКТР-УФ» для получения прямых снимков в УФ-диапазоне.

Эффективность БКП будет находиться на уровне аналогичных инструментов космического телескопа Хаббла, который завершит свою миссию в ближайшие



а



б

а – режим получения изображений;

б – режим полевой спектроскопии.

рисунок 6. Эффективная площадь БКП (ISIS) в сравнении с инструментами других космических проектов

годы. После запуска БКП проекта «СПЕКТР-УФ» будет единственным инструментом для получения высококачественных УФ-снимков объектов Вселенной.

список литературы

- Шугаров А.С., Саванов И.С., Кузин С.В. Приемники излучения в проекте «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 86-91/
- Шустов Б.М., Сачков М.Е., Боярчук А.А., Мошнев А.А. и др. Космические перспективы изучения ультрафиолетовой Вселенной: проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 4-15.
- Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I. WSO-UV project // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, Issue 6. P. 990-995. DOI: 10.1016/j.asr.2013.12.023.
- Gómez de Castro A.I. et al. ISIS: the imaging and slitless spectroscopy instrument for surveys in the World Space Observatory-Ultraviolet telescope // Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE. 2012. Vol. 8443. P. 12. article id. 84432W.
- Gómez de Castro A.I., Maíz-Apellániz J., Rodríguez P. et al. The imaging and slitless spectroscopy instrument for surveys (ISIS) for the world space observatory-ultraviolet (WSO-UV) // Ap&SS. 2011. 335. P. 283-289.

Статья поступила в редакцию 23.09.2014 г.

ПРИЕМНИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПРОЕКТЕ «СПЕКТР-УФ»

А.С. Шугаров¹,
shugarov@inasan.ru;
A.S. Shugarov

И.С. Саванов¹,
доктор физико-математических наук,
savanov@inasan.ru;
I.S. Savanov

RADIATION RECEIVERS OF «SPEKTR-UF» MISSION

С.В. Кузин²,
доктор физико-математических наук,
kuzin@sci.lebedev.ru;
S.V. Kuzin

Дано описание фотоприемного устройства блока спектрографов проекта «СПЕКТР-УФ» на основе ПЗС с обратной засветкой и антиотражательным покрытием. Описаны меры, предпринятые для увеличения радиационной стойкости. Дается описание фотоприемного устройства МКП-детектора на основе микроканальных пластин с оптической системой считывания для блока камер поля проекта «СПЕКТР-УФ».

Ключевые слова: УФ;
приемники излучения; ПЗС; МКП.

There is a description of «SPEKTR-UF» Spectrographs Unit photodetector on the basis of back-illuminated CCD with antireflection coating, also the actions taken to increase radiation resistance are presented. Also a photodetector is described based on MCPs with optical readout system for «SPEKTR-UF» Imaging and Slitless Spectroscopy Instrument for Surveys.

Key words: Ultraviolet;
radiation receivers; CCD; MCP.

ВВЕДЕНИЕ

Основными параметрами, определяющими прогресс в наблюдательной технике, являются увеличение чувствительности астрономической аппаратуры, увеличение пространственного и спектрального разрешения, расширение динамического диапазона (Саванов И.С. и др., 2014).

Повышение чувствительности астрономических приборов можно достичь двумя способами – увеличением собирающей площади зеркала телескопа либо совершенствованием приемной аппаратуры. Увеличение размеров главного зеркала для телескопа УФ-диапазона космического базирования приводит к экспоненциальному росту стоимости и сложности проекта, поэтому на первый план выходит совершенствование приемной астрономической аппаратуры и ее частей.

Одним из основных элементов научного прибора, во многом определяющим его характеристики, является фотоприемное устройство (ФПУ). В УФ-диапазоне параметры фотоприемных устройств по-прежнему далеки от теоретически возможного предела. Например, квантовый выход детектора МАМА ближнего УФ-спектрографа COS, установленного на космическом телескопе им. Хаббла в 2009 году, в ближнем УФ составляет около 10%. МКП-детектор вакуумного УФ-спектрографа COS имеет очень маленький ресурс, который почти полностью был выработан на три года, несмотря на строгие ограниче-

ния на получение спектров с соотношением сигнал/шум (С/Ш) более 15.

В основных научных приборах проекта «СПЕКТР-УФ» будут использоваться наиболее совершенные из доступных на сегодняшний день модели фотоприемных устройств.

1. Фотоприемные устройства блока спектрографов

Фотоприемное устройство блока спектрографов (ФПУ БС) должно обеспечивать регистрацию спектров в УФ-диапазоне, обеспечивать возможность длительного (до 10 часов) накопления сигнала от слабых источников. ФПУ БС должны сочетать в себе высокую чувствительность в УФ-области, низкий шум считывания, низкий темновой ток, высокую геометрическую стабильность получаемых изображений.

В настоящее время существует два основных типа панорамных фотоприемников УФ-диапазона, имеющих достаточный уровень отработки и надежности, потенциально пригодных для использования в БС – электронно-вакуумные МКП-детекторы на основе микроканальных пластин (МКП) и твердотельные полупроводниковые детекторы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС).

Основные преимущества МКП – работа в режиме счета фотонов с предельно высокой чувствительно-

¹ ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,
Russia, Moscow.

² Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Россия, г. Москва.
Astro Space Centre of P.N. Lebedev Physical Institute of the
Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

стью. Недостатки – существенные ограничения по динамическому диапазону и ресурсу, низкий квантовый выход.

Основные преимущества ПЗС – высокая чувствительность в ближнем УФ, динамический диапазон, геометрическая стабильность, большой ресурс. Недостатки – наличие шума считывания, необходимость охлаждения.

Современные ПЗС с обратной засветкой и антиотражающим покрытием в ближнем УФ-диапазоне имеют существенно больший квантовый выход (до 60%) чем МКП, что компенсирует основной недостаток ПЗС – шум считывания. На коротковолновой границе (120 нм) рабочего диапазона БС чувствительность ПЗС уступает МКП.

Основываясь на научных задачах и проведенном моделировании использования различных типов приемников излучения для БС предпочтение было отдано ПЗС. При использовании ПЗС спектрографы проекта «СПЕКТР-УФ» впервые в мире будут иметь возможность массового получения УФ-спектров высокого разрешения с высоким соотношением С/Ш до 100 без заметной деградации ФПУ.

Поставщиком ФПУ БС была выбрана английская фирма e2v technologies, ведущий мировой производитель ПЗС для наземных и космических астрономических применений. Основные характеристики ФПУ приведены в таблице 1.

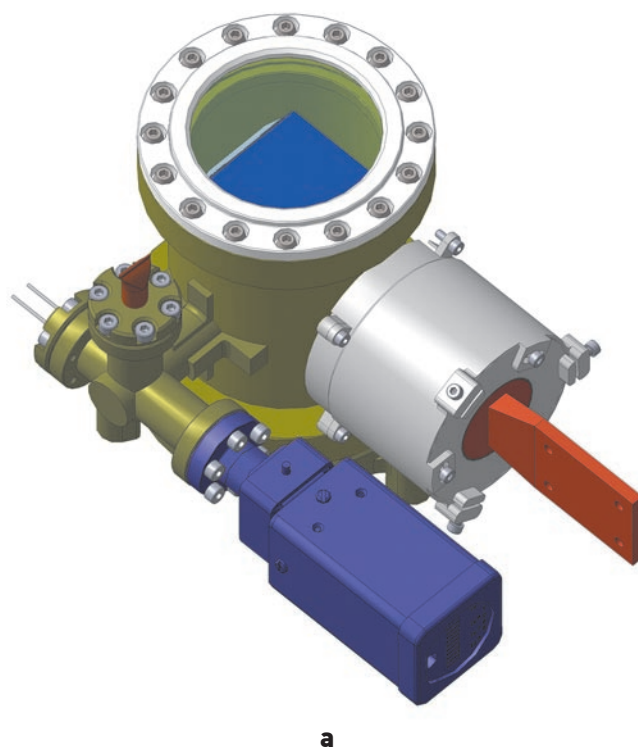
таблица 1 – Основные характеристики ФПУ БС

характеристика	канал ВУФЭС	канал УФЭС	канал СДЦ
спектральный диапазон, нм	115–176	174–310	115–315
градиентное антиотражающее покрытие ПЗС	нет	есть	есть
размер фоточувствительной области, мм	37.3×49.1		
формат детектора, пиксель	3112×4096		
размер пикселя, мкм	12		
шум считывания при скорости 50кГц, е ⁻ СКО	3		
темновой ток в начале/конце срока службы, е ⁻ /час	3/9		
разрядность оцифровки изображения, бит	14		
время считывания полного кадра, с	60		
время экспозиции, с	1–3600		
рабочая температура ПЗС, °С	-100		
температура отжига ПЗС, °С	+20		
скорость внешнего интерфейса SpaceWire, Мбит/с	25		
энергопотребление, Вт	15		
масса ФПУ (один канал), кг	10		

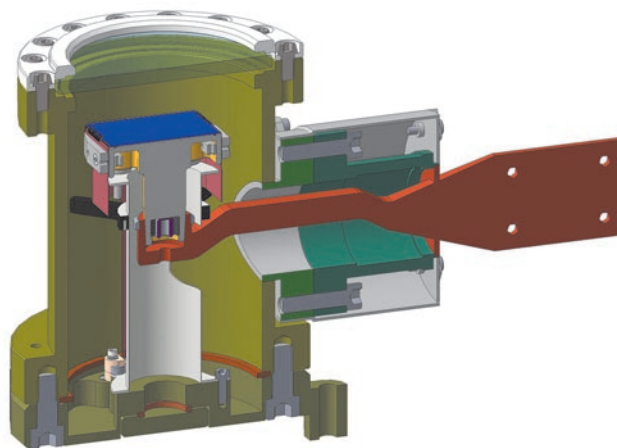
ФПУ БС состоит из трех фоточувствительных блоков приемника излучения (БПИ ФПУ), внутри которых установлены ПЗС, оптимизированные для работы в соответствующем канале БС, трех одинаковых блоков электроники (БЭ ФПУ) и комплекта межблочных кабелей. Каждый БПИ работает со своим БЭ ФПУ, который осуществляет управление ПЗС, считывание и оцифровку видеосигнала, передачу данных в БС.

Чувствительность ПЗС в УФ-области сильно падает при наличии загрязнений на ПЗС из-за малой глубины поглощения УФ-излучения в кремнии, поэтому ПЗС размещен внутри герметичного объема БПИ.

В состав БПИ ФПУ (рисунок 1) входят следующие основные элементы:



а



б

а – вид сверху; **б** – разрез.

рисунок 1. Блок приемника излучения ФПУ БС

- силовой корпус из титана;
- входное защитное окно из MgF_2 ;
- охранный нагреватель входного окна;
- ПЗС на подложке из карбида кремния с нагревателями и термодатчиками;
- холодный палец с медным хладопроводом, предназначенный для отвода тепла от ПЗС;
- два электрических разъема: один для обслуживания ПЗС, второй для нагревателей и термодатчиков;
- химический газопоглотитель;
- ионный насос;
- трубка откачки.

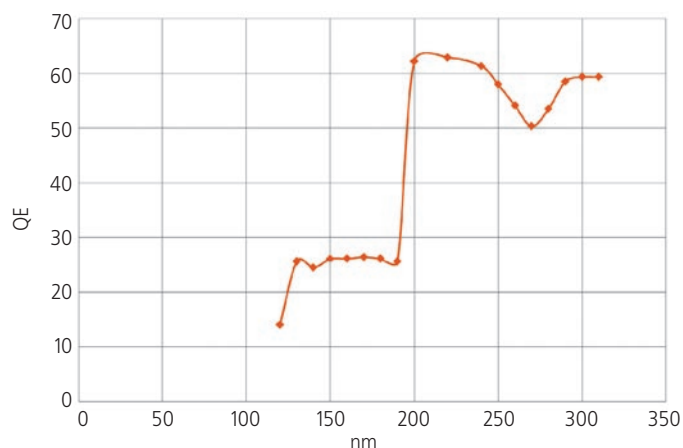
Охлаждение ПЗС осуществляется пассивным образом с помощью внешнего радиатора площадью 1.4 м^2 , соединенного с каждым из БПИ тепловыми трубами.

Для стабилизации температуры ПЗС во время научных наблюдений будет использоваться нагреватель мощностью 1 Вт и термодатчики, установленные в непосредственной близости от ПЗС. Управление нагревателем осуществляется стабилизированным напряжением для предотвращения возможных наводок на ПЗС.

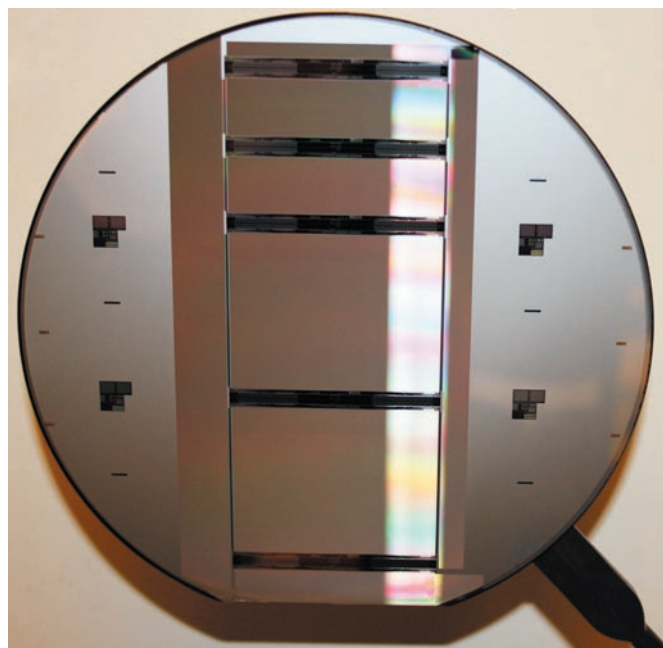
В равновесном режиме входное защитное окно БПИ будет примерно на 7 градусов холоднее окружающих элементов БС из-за близко расположенного ПЗС. Для предотвращения загрязнения защитного окна на стадии вывода и первичной дегазации КА «СПЕКТР-УФ», а также в перерывах между научными наблюдениями будут включаться охранные нагреватели окна БПИ.

При наземном хранении БПИ ФПУ должен использоваться ионный насос для поддержания высокого вакуума.

Фоточувствительным элементом ФПУ является утонченный ПЗС с обратной засветкой, оптимизированный для работы в УФ-области. Спектральная чувствительность ФПУ БС с учетом входного окна приведена на рисунке 2.



рисунк 2. Спектральная чувствительность ФПУ БС



рисунк 3. Кремниевая пластина из первой партии с заказными чипами WUVS-CCD272 для БС «СПЕКТР-УФ»

ПЗС для БС являются заказной модифицированной версией прибора CCD272, разрабатываемого фирмой e2v для перспективного космического проекта ESA EUCLID. В ПЗС БС реализованы последние наработки e2v в области производства высокочувствительных ПЗС с высокой радиационной стойкостью.

Основные отличия ПЗС БС относительно базовой версии CCD272 состоят в изменении геометрических размеров чипа, повышении коэффициента усиления выходного каскада для достижения меньшего шума считывания, применении градиентного антиотражающего покрытия для каналов УФЭС и СДЦ.

В середине 2014 года фирма e2v успешно произвела первую пробную партию пластин с заказными чипами WUVS-CCD272 для БС «СПЕКТР-УФ» (рисунк 3). Каждая пластина содержит два рабочих ПЗС и два контрольных технологических ПЗС меньшего размера.

ФПУ на основе ПЗС успешно применяются на большинстве наземных спектрографов оптического и УФ-диапазонов. Основная сложность при создании ФПУ космического применения – обеспечение необходимого уровня радиационной стойкости ПЗС, предназначенного для регистрации очень слабых сигналов.

Для сохранения высоких характеристик ФПУ БС в течение всего срока службы КА «СПЕКТР-УФ» приняты следующие меры:

- используются сертифицированные для космического применения ПЗС, прошедшие радиационные испытания;

- используется особый техпроцесс производства ПЗС с оптимизированной топологией чипа с целью увеличения радиационной стойкости;
- введена предварительная засветка ПЗС для заполнения ловушек заряда;
- усилено экранирование ПЗС;
- введен режим периодического отжига ПЗС путем нагрева;
- проведена оптимизация размеров ПЗС и направления считывания.

Под воздействием тяжелых заряженных частиц в структуре ПЗС происходят изменения, приводящие к появлению «ловушек» заряда, уменьшению эффективности переноса заряда и появлению на изображении характерных «тянучек». Для уменьшения данного явления в секции накопления ПЗС применяется технология концентрации накопленных фотоэлектронов в малом объеме по центру пикселя за счет краевых эффектов, что уменьшает вероятность встречи зарядового пакета с ловушкой. В горизонтальном регистре для этой же цели используются электроды особой формы, концентрирующие заряд в центре пикселя.

Для уменьшения эффекта «тянучек» в БС реализована функция предварительной засветки ФПУ на уровне 10 электрон/пиксель для заполнения ловушек заряда, которая будет использоваться в конце срока службы ФПУ и на спектрах с низким уровнем фоновой засветки. Данная мера успешно применяется в других космических проектах (HST WFC3, STIS) и позволяет существенно поднять эффективность переноса заряда даже после многих лет эксплуатации ПЗС на орбите.

Для уменьшения общей поглощенной дозы толщина стенок корпуса БПИ ФПУ увеличена до 5 мм, что в совокупности с подложкой из карбида кремния и другими элементами конструкции ФПУ БС и КА «СПЕКТР-УФ» обеспечивает эквивалентную толщину защиты ПЗС не менее 10 мм.

Под воздействием космической радиации на ПЗС будут появляться сбойные пиксели, общее количество которых в конце срока службы достигнет несколько процентов. Эти пиксели будут исключены из обработки. Поскольку изображение каждого спектрального элемента проецируется примерно на девять пикселей, наличие умеренного количества дефектов не приведет к существенным потерям.

С целью фильтрации изображения от следов космических частиц длительные экспозиции БС будут разбиваться на серию более коротких субэкспозиций по 10 минут с последующим сложением кадров на этапе наземной обработки изображений. Наличие серии кадров позволит отфильтровать космические

частицы, а также устранить возможные температурные дрейфы конструкции БС и уход звезды с центра щели.

Раз в месяц температура ПЗС будет повышаться с -100°C до $+20^{\circ}\text{C}$ на 6 часов с целью частичного восстановления кристаллической структуры ПЗС. Данный процесс называется отжигом. По опыту других космических проектов, нагрев ПЗС позволяет устранять более 90% новых горячих пикселей, образующихся под воздействием космической радиации. Во время отжига ФПУ БС температура внешнего радиатора охлаждения будет подниматься до $+20^{\circ}\text{C}$ с помощью нагревателей общей мощностью 500 Вт, а для ускорения процесса прогрева ПЗС будут включаться дополнительные нагреватели на тепловой трубе около БПИ. Рассматривается вопрос организации нагрева ПЗС до температуры $+100^{\circ}\text{C}$, что позволит отжигать не только горячие пиксели, но и часть ловушек заряда.

Эксплуатация ПЗС фирмы e2v в других космических проектах показывает, что основной вид деградации ПЗС в космосе – появление тянучек – в максимальной степени проявляется при переносе изображения по секции накопления заряда. При оптимизации геометрических параметров ПЗС и оптической схемы БС во всех трех каналах спектральные порядки на ПЗС были расположены перпендикулярно к направлению переноса заряда. В этом случае появление небольших тянучек не приведет к уменьшению спектрального разрешения спектрографа, а скажется лишь на фотометрической точности спектра. Для минимизации количества переносов по секции накопления для каналов ВУФЭС и УФЭС изображение с ПЗС считывается в две стороны через два выходных усилителя. Для канала СДЦ спектр располагается с краю ПЗС рядом с горизонтальным регистром для уменьшения количества переносов заряда. Для повышения надежности считывание также происходит через два выходных усилителя.

Видеосигнал от ПЗС между БПИ и блоком электроники передается в аналоговом виде по кабелю длиной около 20 см в псевдодифференциальном виде с целью уменьшения наводок. Для этого ПЗС имеет дополнительные холостые выходные усилители.

Блоки электроники (БЭ) ФПУ разрабатывает подрядчик e2v – RAL Space (Великобритания). БЭ ФПУ основан на схемотехнических решениях, успешно применявшихся в проектах NASA STEREO (SCIP/NI), SDO (AIA/HMI), GOES-R (SUVI).

Отличительной особенностью БЭ ФПУ БС будет измененный видеотракт и отсутствие ITAR компонент. Для достижения низких уровней шумов и высокой фотометрической стабильности аналоговый

видеотракт БЭ ФПУ обрабатывает дифференциальный видеосигнал от ПЗС по методу двойной цифровой коррелированной выборки. Суть метода состоит в использовании 14-битного АЦП избыточной производительности, который обеспечивает несколько сот отсчетов при считывании каждого пикселя. Последующая цифровая обработка сигнала в БЭ ФПУ позволяет добиться уровня шума 3 электрона (СКО) при скорости считывания ПЗС 50 кГц.

Технологический образец БЭ ФПУ поставлен в Россию в конце 2013 года (рисунок 4).

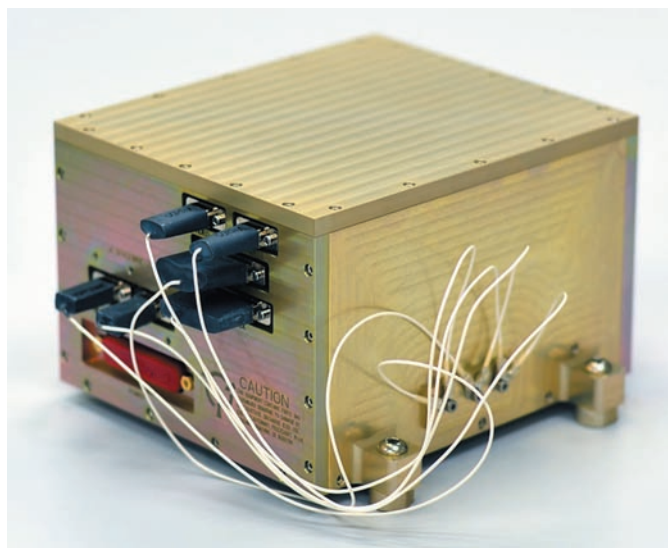


рисунок 4. Технический образец БЭ ФПУ

Применение ПЗС в качестве ФПУ повлекло изменения в конструкции БС. Были введены электро-механические затворы, располагаемые перед входными щелями БС, с помощью которых перекрывается излучение от исследуемого объекта на время считывания ПЗС. Поскольку ПЗС обладают высокой чувствительностью не только в УФ, но и в оптической области, с целью предотвращения засветки ФПУ рассеянным светом применены дополнительные бленды, на элементы внутренней полости БС нанесено светопоглощающее покрытие.

2. Фотоприемные устройства блока камер поля

Фотоприемное устройство блока камер поля (ФПУ БКП) предназначено для получения прямых снимков космических объектов в УФ-диапазоне с использованием светофильтров, а также для получения снимков в режиме полевой спектроскопии низкого разрешения.

Требования к ФПУ БКП во многом схожи с требованиями на ФПУ БС: высокая чувствительность в УФ-области, низкий шум считывания, низкий тем-

новой ток, высокая геометрическая стабильность получаемых изображений. Главное отличительное требование к ФПУ для БКП – отсутствие чувствительности в оптическом диапазоне, поскольку УФ-фильтры не обеспечивают необходимого уровня подавления оптического излучения.

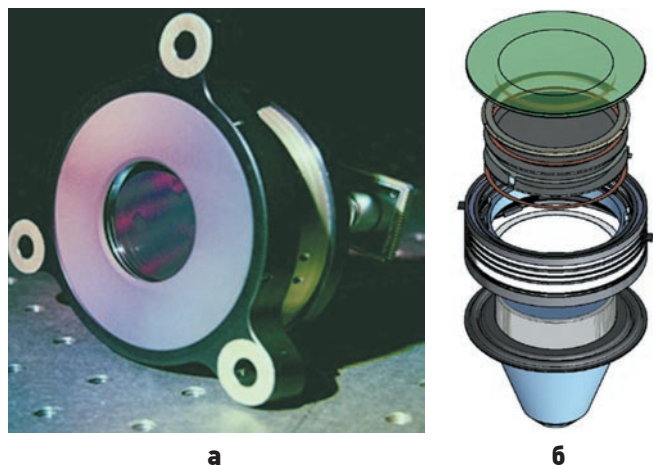
При проектировании БКП рассматривался вариант использования двух типов приемников излучения – МКП для дальнего УФ и ПЗС для ближнего УФ и оптического диапазона. В итоге с целью упрощения конструкции было принято решение реализовать в БКП два УФ-канала с однотипными ФПУ на основе МКП с солнечно-слепыми фотокатодами CsI и CsTe.

Разработчиком ФПУ для БКП является испанская компания SENER, ответственная за изготовление БКП в целом. Фоточувствительная головка поставляется английской компанией Photek. Блоки электроники разрабатываются компанией SENER.

ФПУ БКП состоит из двух комплектов для каналов FUV и NUV. Каждый комплект состоит из фоточувствительной головки, совмещенной с высоковольтным источником питания, блока электроники и межблочной кабельной сети. Основные характеристики ФПУ БКП приведены в таблице 2.

таблица 2 – Основные характеристики ФПУ БКП

характеристика	канал FUV	канал NUV
материал фотокатода	CsI	CeTe
спектральный диапазон, нм	115–175	185–320
диаметр фотокатода, мм	40	40
разрешающая способность, мкм	25	25
формат изображения, пиксель	2048×2048	2048×2048
временное разрешение, мс	40	40
квантовый выход на длине волны 120 нм, %	8	–
квантовый выход на длине волны 150 нм, %	6	–
квантовый выход на длине волны 250 нм, %	–	21
коэффициент подавления оптической составляющей излучения	10^5	10^5
максимальная локальная скорость счета в полнокадровом режиме, событий/с	5	5
максимальная общая скорость счета, событий/с	10^5	10^5
темновой ток, событий/с/см ²	10	20
масса фоточувствительной головки, кг	2	2



а – общий вид;
б – устройство фоточувствительной головки.

рисунок 5. ФПУ на основе МКП инструмента UVIT проекта ASTROSAT

Конструкция фоточувствительной головки ФПУ БКП основана на детекторе, разработанном фирмой Photek для инструмента UVIT индийского проекта ASTROSAT.

В основе ФПУ БКП лежит электронно-оптический преобразователь (рисунок 5) на основе микроканальных пластин (МКП). Фоточувствительная головка состоит из следующих основных частей: входного окна из MgF_2 , фотокатода, сборки микроканальных пластин, фосфорного экрана, волоконно-оптического масштабирующего преобразователя, радиационно-стойкого КМОП-сенсора видимого диапазона (STAR250 или STAR1000), высоковольтного источника питания. ФПУ БКП являются герметичными и допускают работу, как при атмосферном давлении, так и в вакууме.

ФПУ БКП по сравнению с ФПУ UVIT будет отличаться улучшенными параметрами фотокатодов, применением более современных и быстрореагирующих КМОП-сенсоров, новым блоком высоковольтного питания с более высокой радиационной стойкостью.

ФПУ БКП может работать в одном из двух режимов – накопления или счета фотонов.

В режиме накопления в течение экспозиции в оперативной памяти электронного контроллера БКП будет формироваться двухмерный кадр изображения. В режиме счета фотонов в оперативной памяти будут храниться координаты, время и амплитуда каждого события (фотона), зарегистрированного ФПУ.

Наземная обработка снимков, полученных в режиме счета фотонов, позволит осуществлять цифровую коррекцию остаточных колебаний телескопа, возможные дрейфы конструкции БКП при длительных экспозициях. Это сделает возможным получение качественных снимков звездного неба без смаза с

максимальным угловым разрешением даже при наличии определенных проблем в системе ориентации телескопа.

Одним из существенных недостатков ФПУ БКП является риск необратимого выхода из строя МКП при высоком уровне засветки. Электронная схема ФПУ будет осуществлять постоянный контроль скорости счета и тока потребления МКП, в случае их превышения обеспечит отключение высоковольтного источника питания. В целях дополнительной защиты МКП от пересветки в конструкции турелей светофильтров предусмотрены глухие области, которые могут полностью перекрыть поток излучения от телескопа.

ФПУ на основе МКП обладают довольно узким динамическим диапазоном. Для расширения диапазона регистрируемых звездных величин в каждом канале БКП предусмотрена возможность введения в световой поток нейтральных ослабляющих светофильтров 10х и 100х.

Для реализации режима коронографических наблюдений рассматривается возможность нанесения на входное окно черной точки размером 0.4–0.8 мм.

список литературы

Саванов И.С., Шустов Б.М., Сачков М.Е., Шугаров А.С. и др. Блок спектрографов проекта «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 74-80.

Шугаров А.С. Современные астрономические панорамные приемники УФ-диапазона // Ультрафиолетовая Вселенная II / Под ред. Б.М. Шустова. М.: Янус-К, 2008. 71 с.

Gómez de Castro A.I. et al. ISIS: the imaging and slitless spectroscopy instrument for surveys in the World Space Observatory-Ultraviolet telescope // Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE. 2012. Vol. 8443. 12 p. article id. 84432W.

Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T., Sachkov M. Optical layouts of the WSO-UV spectrographs // Astrophysics and Space Science. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-2087-4.

Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I. WSO-UV project // Advances in Space Research. 2014. Vol. 53, Issue 6. P. 990-995. DOI: 10.1016/j.asr.2013.12.023.

Shugarov A., Savanov I., Sachkov M. et al. UV detectors for spectrographs of WSO-UV project // Astrophys. Space Sci. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-1911-1.

Статья поступила в редакцию 25.09.2014 г.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПОКРЫТИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЛЕКСА НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ «СПЕКТР-УФ»

FUNCTIONAL COATING FOR «SPEKTR-UF» SCIENTIFIC INSTRUMENTATION COMPLEX OPTICAL ELEMENTS

В.Г. Жупанов¹,
zhupanov@luch.podolsk.ru;
V.G. Zhupanov

В.Н. Федосеев¹,
кандидат технических наук,
pro@sialuch.ru;
V.N. Fedoseev

Е.А. Голышко¹,
pro@sialuch.ru;
E.A. Golyshko

А.А. Моисеев²,
кандидат технических наук,
moisheev@laspace.ru;
A.A. Moisheev

О.П. Баженова²,
metall@laspace.ru;
O.P. Bazhenova

С.В. Алексеев²,
кандидат технических наук,
nio27@laspace.ru;
S.V. Alekseev

Б.М. Шустов³,
доктор физико-математических
наук, член-корреспондент РАН,
bshustov@inasan.ru;
B.M. Shustov

М.Е. Сачков³,
доктор физико-математических наук,
msachkov@inasan.ru;
M.E. Sachkov

О.В. Власенко³,
vlaskenko@inasan.ru;
O.V. Vlasenko

В статье дается описание методики нанесения отражающего и защитного покрытия на оптические элементы телескопа Т-170М, входящего в состав комплекса научной аппаратуры (КНА) проекта «СПЕКТР-УФ», а также применяемых методов и оборудования. Представленные результаты свидетельствуют, что покрытия оптических элементов телескопа Т-170М по своим отражающим свойствам соответствуют (и даже немного превышают) требования технического задания.

Ключевые слова: ультрафиолетовая астрономия; космический телескоп; оптические покрытия.

ВВЕДЕНИЕ

В проекте «СПЕКТР-УФ» (Шустов Б.М. и др., 2014; Shustov B. et al., 2014) концентратором потока излучения от астрофизических объектов является главный инструмент комплекса научной аппаратуры – крупный космический телескоп Т-170М. В ультрафиолетовом (УФ) диапазоне отражательная способность оптических поверхностей играет важную роль в общей производительности системы и оптической конструкции приборов. Число отражений является серьезным ограничением для УФ-инструментов, особенно, на длинах волн короче 115 нм (пороговое значение для коэффициента

There is a description of a methodology of a reflecting and protective coating applying on T-170M telescope optical elements, which is a part of «SPEKTR-UF» Scientific Instrumentation Complex (SIC). Also the employed methods and equipment are described. The presented outcomes give evidence that reflectivity performance of T-170M telescope optical elements' coatings is compliant (even somewhat exceeding) with Technical Specification requirements.

Key words: ultraviolet astronomy; space telescope; optical coatings.

отражения комбинации покрытий Al+MgF₂). Даже незначительное изменение отражательной способности может оказать сильное воздействие на проектирование оптических конструкций. Системы из 21 отражательной поверхности при коэффициенте отражения 95%, 10 поверхностей при 90% и 3 поверхностей при 70% имеют одинаковое пропускание! В оптической схеме телескопа Т-170М два оптических элемента, и, тем не менее, необходимо максимально заботиться о достижении высокой отражательной способности, особенно в дальнем ультрафиолетовом участке спектра.

¹ ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ», Россия, Московская область, г. Подольск.

Federal Enterprise «Research Institute «Luch», Russia, Moscow region, Podolsk.

² ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

³ ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.

Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

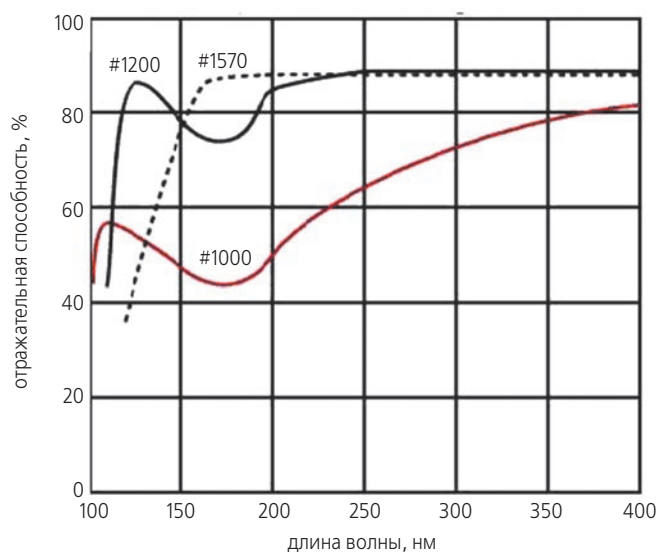
Для нанесения отражающего слоя обычно используют алюминий. Его коэффициент отражения в УФ превышает 80%. Давно известно (*Haas G., Hunter R.W.*, 1956), что алюминий является прекрасным зеркалом для длин волн более 120 нм и имеет коэффициент отражения более 90% для всех длин волн, превышающих 200 нм, кроме области от 700 до 900 нм, где минимальное значение коэффициента отражения составляет 86% для длины волны 850 нм. Это делает его одним из лучших материалов при создании зеркала для работы – от вакуумного УФ (точнее от 100 нм, где коэффициент отражения превышает 10%) до ближнего ИК. Проблема в том, что на алюминии образуется слой оксида (Al_2O_3), который становится весьма непрозрачным на длинах волн короче 200 нм и значительно ухудшает УФ-отражательную способность. До некоторой степени УФ-отражательную способность можно сохранить, защищая голый алюминий покрытием из соединений фтора. В современных УФ-телескопах используют LiF или MgF_2 . Например, в космическом телескопе им. Хаббла для покрытия главного и вторичного зеркала и оптических элементов многих инструментов использовано сочетание покрытий $\text{Al}+\text{MgF}_2$, в то время как в проекте FUSE использовано сочетание $\text{Al}+\text{LiF}$, более эффективное в диапазоне 100–120 нм. Сложность применения LiF в его очень высокой гигроскопичности, так что все время до запуска должны соблюдаться очень жесткие условия по влажности. Контроль влажности и защита больших зеркал может быть одним из основных факторов стоимости крупной оптики с покрытием $\text{Al}+\text{LiF}$. Другим вариантом является использование твердого кристаллического материала (SiC или B_4C), сохраняющего отражательную способность вплоть до 60 нм, хотя коэффициент отражения этих материалов на более длинных волнах невелик.

На протяжении многих лет в качестве покрытий рассматривалось большое количество различных материалов для защитных покрытий в УФ, но ни один пока не превосходит по комплексу параметров MgF_2 или LiF. Учитывая вопросы технологии и стоимости, мы сделали при изготовлении оптических элементов телескопа T-170М проекта «СПЕКТР-УФ» выбор в пользу «классического» сочетания покрытий $\text{Al}+\text{MgF}_2$.

Важными характеристиками покрытия являются его толщина, однородность и плотность. Очевидно, например, что чем тоньше защитное покрытие, тем оно более прозрачно, но тонкое покрытие может быть неоднородным, допуская «пробелы», через которые молекулы кислорода могут достигнуть слоя алюминия. Поэтому приходится увеличивать толщину защитного слоя или постараться сделать его плотнее. Новые достижения в технологии нанесения

покрытий, заимствованные из полупроводниковой промышленности, открыли возможность технологии ALD (atomic layer deposition – осаждения атомных слоев). Эта технология в будущем позволит получать очень тонкие и бездефектные покрытия, эффективно препятствующие окислению алюминиевого слоя, и отражающая способность алюминия в сочетании покрытий $\text{Al}+\text{MgF}_2$ будет такой же, как и для чистого алюминия.

Нужно также иметь в виду, что важнейшим свойством защитного покрытия является способность увеличивать (или уменьшать) отражательную способность в одном из диапазонов длин волн. Для УФ-зеркал естественно подбирать такие материалы покрытий и их толщины, чтобы добиться максимального отражения на данных длинах волн УФ-диапазона. Пожалуй, рекордных показателей в этом направлении добилась фирма Acton Research (США). На рисунке 1 (копия оригинального рисунка из ее рекламного материала «Optics and Coatings, 120–1064 nm») показаны зависимости отражательной способности различных образцов $\text{Al}+\text{MgF}_2$ от длины волны в УФ-участке спектра. Числа, идентифицирующие образцы (см. соответствующие кривые на рисунке 1), означают наиболее короткую длину волны, на которую оптимизирован коэффициент отражения. К сожалению, эти прекрасные результаты получены на малых образцах (диаметр 1 дюйм), и в крупных оптических элементах не достигаются. Аналогичное замечание может быть сделано и в отношении экспериментов, выполненных испанскими специалистами (*Larruquert J.L., Keski-Kuha R.A.M.*, 2001).



рисунки 1. Зависимости отражательной способности различных образцов $\text{Al}+\text{MgF}_2$ от длины волны в УФ-участке спектра. Числа, идентифицирующие кривые, означают наиболее короткую длину волны, на которую оптимизирован коэффициент отражения (по оригинальному материалу фирмы Acton Research)

Неоднородность (толщины) слоя как алюминия, так и защитного слоя также может существенно влиять на оптическое качество зеркала. Поэтому еще одна важная составляющая технологии нанесения покрытий – необходимость контроля качества (однородности, плотности) и толщины покрытий.

В разделе 1 мы кратко описываем методы, инструменты и установки, применяемые в проекте для нанесения и исследования покрытий оптических элементов КНА. В разделе 2 представлены основные результаты.

1. Инструменты, установки, методики нанесения и измерения покрытий

Для отработки технологии и нанесения отражающего и защитного покрытия $\text{Al}+\text{MgF}_2$ на главное зеркало телескопа использовалась имеющаяся в ФГУП «НИИ НПО «ЛУЧ» установка INTEGRITY-100, размещенная в специально сконструированных чистых помещениях класса ISO 8 (рисунок 2). Установка представляет собой вакуумную камеру производства Denton Vacuum с внутренними размерами $2.54 \times 2.54 \times 2.6$ м, оборудованную двухступенчатыми форвакуумными насосами, двумя крионасосами, а также мейснеровской ловушкой для проведения откачки. Для испарения в камеру установлены четыре электронно-лучевые пушки, четыре резистивные испарителя; камера оборудована ионным источником для очистки изделия, а также нагревателями для создания необходимой для проведения процесса температуры.

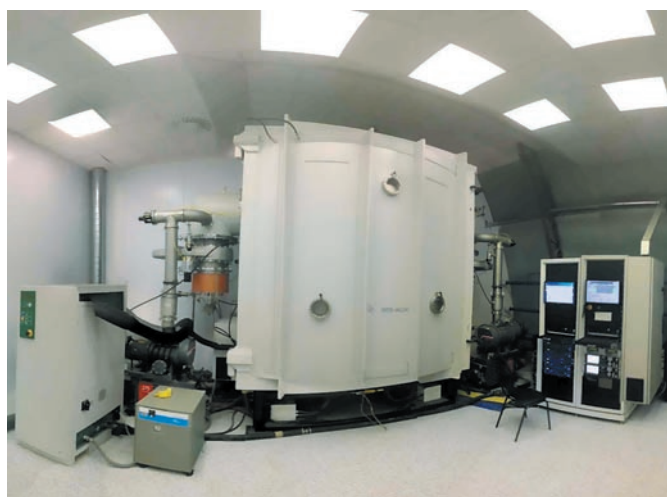


рисунок 2. Общий вид установки INTEGRITY-100

Для измерения основной характеристики покрытия – коэффициента отражения в области вакуумного ультрафиолета – используется спектрофотометр вакуумного УФ VUVaS 1000 фирмы McPherson. Он предназначен для снятия спектров отражения и пропускания в области спектра 115–350 нм. С по-

мощью спектрофотометра проводятся измерения отражения и пропускания на разных длинах волн, индикатрисы рассеяния, в том числе и в поляризованном свете.

Дополнительные детали описания установок можно найти в работе (Zhupanov V. et al., 2014).

В связи с высокой склонностью алюминия к окислению для нанесения качественного двухслойного функционального покрытия $\text{Al}+\text{MgF}_2$ необходимо выполнение двух условий.

Первым условием является создание в камере наилучшего вакуума с минимальным парциальным давлением веществ, которые способствуют образованию оксида алюминия, а именно кислорода и воды. После откачки вакуумной камеры получены следующие характеристики:

- давление в камере 2.5×10^{-7} мБар;
- парциальное давление кислорода около 1.7×10^{-10} мБар;
- парциальное давление воды 3×10^{-8} мБар.

Вторым условием, необходимым для нанесения качественного покрытия с необходимым коэффициентом отражения, являются высокая скорость испарения алюминия, так как молекулы кислорода и воды всё равно присутствуют в камере, и минимизация времени между окончанием нанесения алюминия и началом нанесения пленки фторида магния.

Чтобы получить максимально возможную скорость испарения, необходимо правильно выбрать материал тигля и режим испарения. В качестве материала тигля для испарения был выбран вольфрам. Для того чтобы тигель был полностью заполнен испаряемым материалом (10 г), выбрана высота тигля 25 мм. Было проведено три процесса, достигнута скорость напыления 60–65 Å/с, подобраны оптимальные режимы прогрева и испарения.

Для измерения толщины алюминиевого слоя в разных точках отражающей поверхности главного зеркала телескопа были изготовлены имитаторы формы поверхности (рисунок 3).

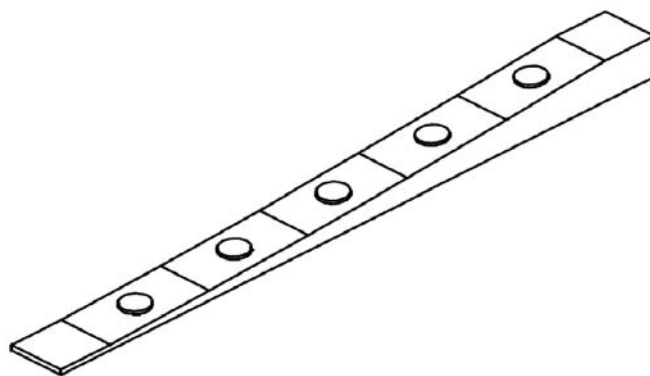


рисунок 3. Общий вид имитатора формы поверхности

Всего было изготовлено четыре имитатора, которые были установлены на планшайбе по окружности через каждые 90° . На каждый имитатор устанавливалось по пять образцов-свидетелей, согласно рисунку 3. Вначале скорость вращения планшайбы с имитаторами была установлена в размере 50% от максимальной скорости, что соответствует 20 об/мин. Был проведен процесс, а затем измерена толщина покрытия на образцах-свидетелях. Максимальное отклонение толщины на одном имитаторе составило 55%, а на одном радиусе 15%. Для улучшения распределения скорость вращения была увеличена до 40 об/мин.

Была также проведена работа по оптимизации распределения толщины алюминиевого слоя по поверхности зеркала путем подбора высоты расположения зеркала над плоскостью испарения и применения масок (рисунок 4).

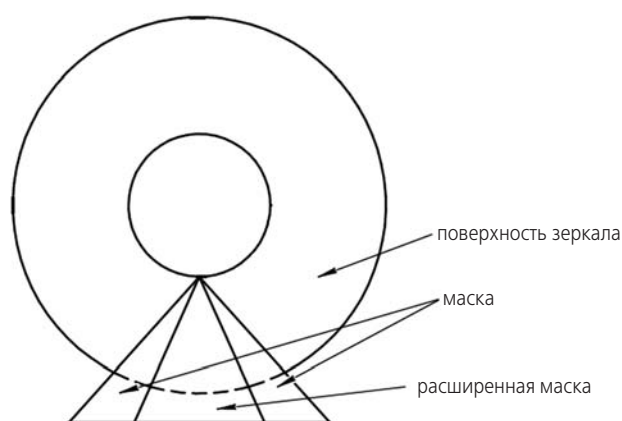


рисунок 4. Общая схема ограничения потока испаряемого вещества при помощи маски (вид снизу)

С целью оптимизации распределения толщины слоя алюминия по поверхности зеркала было проведено более 15 процессов, в которых подбирались форма маски и ее расположение внутри камеры. Полученные результаты представлены на рисунке 5.

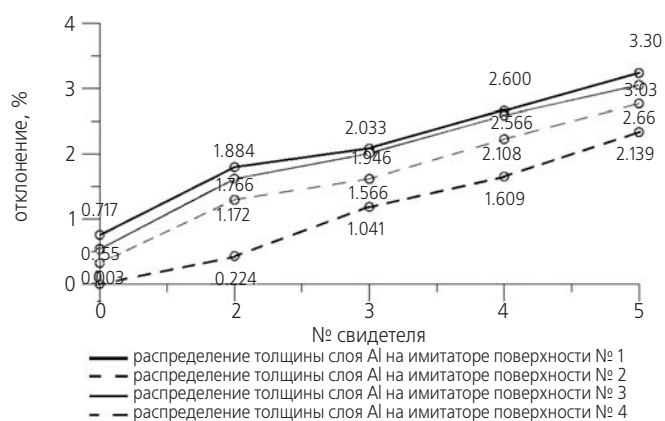


рисунок 5. Распределение толщины Al по поверхности зеркала

Минимальная толщина слоя Al принята за 100%, а по оси ординат показано отклонение от этой толщины.

В оптимальном случае распределение толщины алюминиевого слоя по поверхности всего зеркала не превышает 4%.

Для измерения распределения толщины слоя защитного покрытия MgF_2 по поверхности главного зеркала на стеклянную подложку наносилось более толстое покрытие (100 нм), после чего измерялся спектр пропускания. Распределение толщины защитного покрытия представлено на рисунке 6, где минимальная толщина также принята за 100%.

Одним из важнейших пунктов в процессе нанесения является безопасное перемещение и позиционирование зеркала. Все оборудование должно работать предельно деликатно, так как малейший удар может вызвать необратимые повреждения. Транспортировка планшайбы с главным зеркалом по чистым помещениям осуществлялась при помощи электрической тали, специально сконструированного кантователя, который также предусматривает поворот планшайбы с зеркалом вокруг горизонтальной оси для проведения очистки и обдува. Загрузка зеркала в камеру осуществлялась штабелером с функцией плавной доводки. Для финишной очистки главного зеркала и снятия статического заряда с его поверхности применялась обдувка сухим ионизированным азотом.

После отработки описанных выше технологических процессов мы провели нанесение покрытия на макет главного зеркала телескопа Т-170М, изготовленного в ОАО «Лыткаринский завод оптического стекла». После нанесения двухслойного функционального покрытия были проведены измерения основной характеристики – коэффициента отражения в области вакуумного ультрафиолета. Коэффициент отражения полученного покрытия измерялся по образцам-свидетелям, установленным в центральное отверстие макета главного зеркала (рисунок 7).

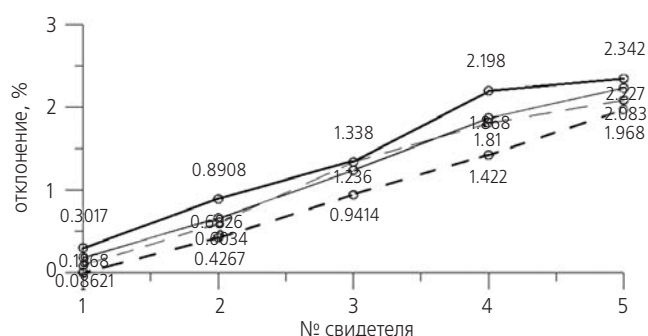


рисунок 6. Распределение толщины MgF_2



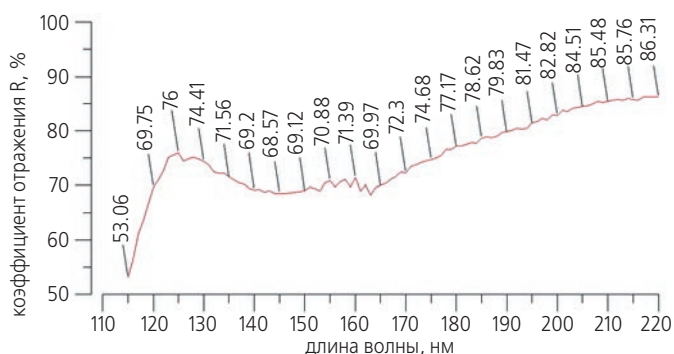
рисунк 7. Макетный образец главного зеркала телескопа Т-170М с закрепленными в центре образцами-свидетелями после процесса нанесения

2. Результаты: коэффициент отражения

К коэффициенту отражения зеркал телескопа Т-170М предъявляются достаточно жесткие требования в области от вакуумного ультрафиолета до видимого излучения. Средний коэффициент отражения должен быть:

- не менее 50% для длины волны 115 нм;
- не менее 60% для длины волны 130 нм;
- не менее 75% для длины волны 190 нм;
- не менее 85% для излучения в диапазоне длин волн 350–600 нм.

На рисунке 8 представлен график зависимости коэффициента отражения от длины волны в области от 115 до 220 нм. График соответствует измерениям, полученным на образце-свидетеле, закрепленном в центральном отверстии зеркала.



рисунк 8. Зависимости коэффициента отражения от длины волны

Видно, что на длинах волн 130 нм и 190 нм отражение превышает требования технического задания на 5–10%.

закключение

На основании полученных результатов, можно заключить, что процесс нанесения отражающего и защитного покрытий на главное зеркало телескопа проведен успешно, требования к коэффициенту отражения удовлетворены на всем промежутке длин волн. Однако имеется потенциал для получения лучших результатов, так как реализованы не все механизмы минимизации парциального давления кислорода и паров воды в камере; кроме того качество покрытия может быть улучшено за счёт более тщательной отработки процесса нанесения фторида магния.

список литературы

Шустов Б.М., Боярчук А.А., Сачков М.Е., Моисеев А.А. и др. Космические перспективы изучения ультрафиолетовой Вселенной: проект «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 4-15.

Haas G., Hunter R.W. New Development in vacuum-Ultraviolet Reflecting coatings for Space Astronomy // LOSA. 1956. Vol. 46, Issue 12. P. 1009-1012.

Larruquert J.L., Keski-Kuha R.A.M. Far ultraviolet optical properties of MgF₂ films deposited by ion-beam sputtering and their application as protective coatings for Al // Applied Optics. 2001. Vol. 40, Issue 7. P. 1126-1131.

Shustov B., Gomez de Castro A.I., Sachkov M. et al. WSO-UV progress and expectations // Astrophysics and Space Science. 2014. DOI: 10.1007/s10509-014-2119-0.

Zhupanov V., Vlasenko O., Sachkov M., Fedoseev V. New facilities for Al+MgF₂ coating for 2-m class mirrors for UV // Proc. SPIE 9144, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray, 914435 (24 July 2014). DOI: 10.1117/12.2055737.

Статья поступила в редакцию 19.09.2014 г.

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТЕЛЕСКОПА Т-170М И НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ

Д.В. Тулин¹,
tulin@laspace.ru;
D.V. Tulin

Т.Н. Ефремова¹,
etn@laspace.ru;
T.N. Efremova

Приведены результаты разработки системы обеспечения теплового режима телескопа Т-170М и бортового комплекса научной аппаратуры космического аппарата «СПЕКТР-УФ». Представлена структура системы обеспечения теплового режима, которая содержит комплекс автономных систем конструктивных составляющих телескопа и научной аппаратуры, схемы и состав агрегатов. Рассмотрены основные принципы работы автономных систем обеспечения теплового режима.

Ключевые слова: космический аппарат; тепловой режим; температура; агрегаты системы обеспечения теплового режима.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка телескопа Т-170М, предназначенного для исследования космического пространства в составе КА «СПЕКТР-УФ», является одной из актуальных задач, решаемых в настоящее время (Хартов В.В., 2011; Ефанов В.В., Мартынов М.Б., 2013; Автоматические космические аппараты..., 2010). Важный этап этой разработки – обеспечение температурных условий эксплуатации телескопа, которые предъявлены к посадочным местам блоков аппаратуры, к конструктивным элементам и к элементам оптической системы. Температурные требования определены рабочими температурными диапазонами блоков аппаратуры, а также требованиями по геометрической стабильности конструкции телескопа.

Заданные температурные условия эксплуатации поддерживаются системой обеспечения теплового режима (СОТР), которая включает в себя автономные средства обеспечения теплового режима отдельных составляющих телескопа и научной аппаратуры.

По наличию автономных средств обеспечения теплового режима конструкция телескопа может быть разделена на следующие составные части (рисунок 1):

- узел главного зеркала (УГЗ) и тубуса;
- модуль вторичного зеркала (МВЗ);
- инструментальный отсек (ИО);

THERMAL CONTROL SYSTEM OF T-170M TELESCOPE AND SCIENTIFIC INSTRUMENTS

С.М. Плугарь¹,
plug314@laspace.ru;
S.M. Plugar

А.Ф. Шабарчин¹,
кандидат технических наук,
shaf@laspace.ru;
A.F. Shabarchin

There are results of design and development of thermal control system of T-170M telescope and onboard scientific instrumentation complex of «SPEKTR-UF» Spacecraft. The architecture of the thermal control system is presented which comprises set of autonomous subsystems and structural components of the telescope and scientific instruments. The schematics and units breakdown structures are given and the main principles of thermal control autonomous subsystems operations are summarized.

Key words: spacecraft; thermal conditions; temperature; thermal control system units.

- приборная панель внешнего расположения (ППВР-1);
- приборная панель внешнего расположения (ППВР-2);
- механизм раскрытия крышки солнцезащитной (МР КСЗ);
- приводы бленды наружной.

Кроме того, находящиеся в инструментальном отсеке блок камер поля и блок спектрографов имеют свои автономные средства обеспечения теплового режима, которые разработаны изготовителями этих блоков и в данной статье не рассматриваются.

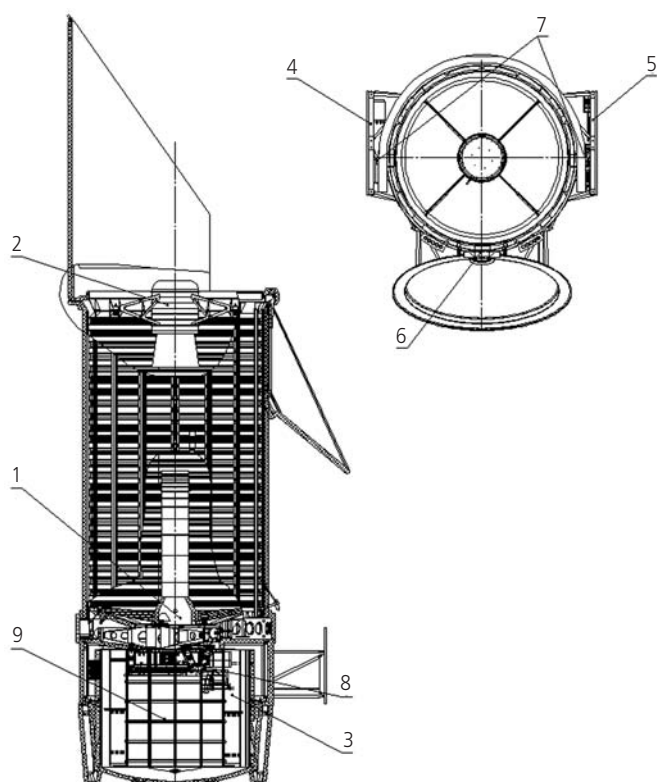
Информационно-логическое обеспечение СОТР телескопа осуществляется телеметрическими и управляющими температурными датчиками. Сбор информации с температурных датчиков и управление агрегатами СОТР по показаниям датчиков проводится блоком управления температурным режимом (БУТР) либо по функциональным командам с наземного центра управления.

1. Средства обеспечения теплового режима УГЗ и тубуса

СОТР УГЗ и тубуса предназначена для поддержания следующих температурных условий функционирования элементов конструкции:

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.



- 1** – узел главного зеркала и тубуса;
2 – модуль вторичного зеркала;
3 – инструментальный отсек;
4 – приборная панель внешнего расположения ППВР-1;
5 – приборная панель внешнего расположения ППВР-2;
6 – механизм раскрытия крышки светозащитной;
7 – привод бленды наружной;
8 – блок камер поля; **9** – блок спектрографов.

рисунк 1. Конструктивные узлы телескопа, оснащенные автономными средствами обеспечения теплового режима

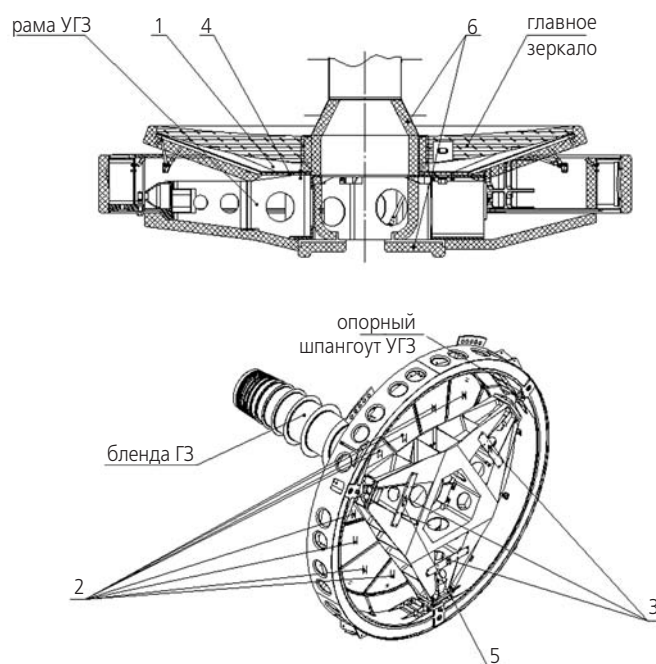
1. На этапе выведения и в режиме хранения (при закрытой КСЗ и зачеканенной бленде наружной):

- температурный диапазон всех элементов УГЗ и тубуса от минус 50°C до плюс 50°C;

2. В режиме штатной эксплуатации:

- температурный диапазон ГЗ от плюс 5°C до плюс 45°C;
- номинальная рабочая температура ГЗ 20°C;
- перепад температуры ГЗ в осевом направлении не более 3.5°C;
- перепад температуры ГЗ в диаметральной направлении не более 6°C;
- темп изменения температуры ГЗ не более 2°C за сеанс;
- температурный диапазон тубуса от минус 130°C до плюс 50°C;
- допустимый перепад температур по длине тубуса не более 60°C;
- перепад температуры по окружности тубуса не более 10°C.

Состав агрегатов СОТР УГЗ приведен на рисунке 2.



- 1** – излучатель ГЗ;
2 – электронагреватели излучателя ГЗ;
3 – электронагреватели рамы УГЗ;
4, 5 – управляющие температурные датчики;
6 – теплоизоляция УГЗ.

рисунк 2. СОТР узла главного зеркала

Для компенсации тепловых потерь ГЗ в сторону тубуса с тыльной стороны ГЗ установлен излучатель, находящийся в лучистом теплообмене с ГЗ. На излучателе размещен многосекционный электронагреватель (18 секций) суммарной мощностью 100 Вт. Для управления работой электронагревателя между излучателем и ГЗ установлены управляющие температурные датчики. При температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков ниже плюс 19°C все секции электронагревателя включены, при температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков выше плюс 21°C все секции электронагревателя выключены.

Мощность электронагревателя выбрана с учетом следующих теплофизических характеристик элементов конструкции УГЗ:

- степень черноты рабочей поверхности ГЗ $\epsilon \leq 0.05$;
- степень черноты тыльной поверхности ГЗ и поверхности излучателя, обращенной к ГЗ, $\epsilon \geq 0.88$;
- степень черноты внутренних поверхностей тубуса и бленды наружной $\epsilon \geq 0.9$;
- термические сопротивления каждого узла крепления ГЗ к раме УГЗ, каждого узла крепления рамы УГЗ к опорному шпангоуту, узлов крепления излучателя к раме УГЗ и узлов крепления излучателя к опорному шпангоуту составляют не менее 10 К/Вт.

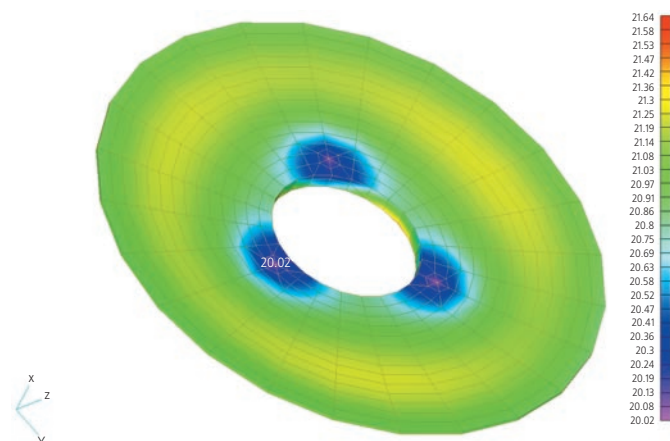
Для компенсации тепловых потерь с рамы УГЗ на опорный шпангоут и бленду ГЗ на раме, в зоне посадочных мест оптической скамьи, размещен трехсекционный электронагреватель суммарной мощностью 30 Вт. При температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков ниже плюс 19°C все секции электронагревателя включены, при температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков выше плюс 21°C все секции электронагревателя выключены.

Наружные поверхности УГЗ закрыты экранно-вакуумной теплоизоляцией (ЭВТИ).

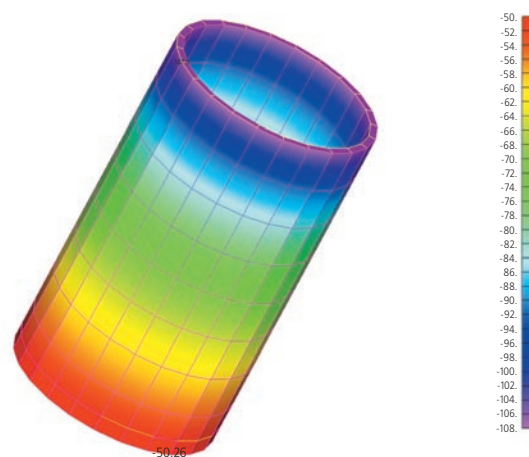
От оптической системы телескопа Т-170М предъявлены жесткие требования по уровню запыленности среды вокруг КА. Поэтому на телескопе и на аппарате в целом не используется традиционно применяемый материал теплоизоляции ЭВТИ-2В, где экранный материал – пленка ПЭТ с двусторонней металлизацией – сдублирован с холстом стеклотканевым ХСВН-7, который может быть источником запыления.

Для КА «СПЕКТР-УФ» разработан новый тип ЭВТИ, в нем используется беспылевой экранный материал ЭБК (*Материал экранный беспылевой комбинированный* – «ЭБК» Технические условия ТУ 2245-012-18420369-2012), в котором пленка ПЭТ с двусторонней металлизацией скреплена с прокладкой из полиэфирной ткани. Сравнительные испытания ЭВТИ-2В и ЭБК показали, что эти типы ЭВТИ имеют близкие теплофизические характеристики.

Типовые температурные поля по ГЗ и тубусу, полученные при моделировании номинального теплового режима, приведены на рисунках 3 и 4. Перепад температур по толщине ГЗ не более 1.5°C, а по диаметру на рабочей поверхности ГЗ не более 1.1°C. Максимальный диаметральный перепад температур по тубусу телескопа не более 2°C, а по длине не более 53°C.



рисунки 3. Температурное поле по рабочей поверхности ГЗ



рисунки 4. Температурное поле по тубусу телескопа

2. Средства обеспечения теплового режима МВЗ

СОТР МВЗ поддерживает температурные условия эксплуатации вторичного зеркала (ВЗ) телескопа, приводов механизмов юстировки и фокусировки ВЗ:

1. На этапе выведения до подачи питания на агрегаты СОТР – от минус 50°C до плюс 50°C.

2. В режиме штатной эксплуатации:

- температурный диапазон ВЗ – от плюс 5°C до плюс 45°C;
- температурный диапазон приводов механизмов юстировки и фокусировки ВЗ – от минус 45°C до плюс 50°C.

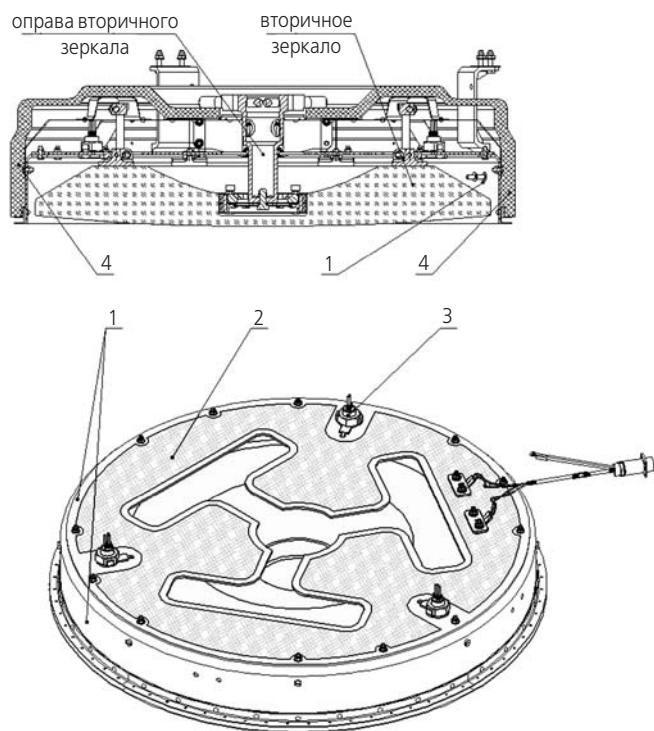
Состав агрегатов СОТР МВЗ приведен на рисунках 5 и 6.

Для компенсации тепловых потерь ВЗ с тыльной стороны ВЗ установлен излучатель, находящийся в лучистом теплообмене с ВЗ. На излучателе размещен электронагреватель мощностью 32 Вт. Для управления работой электронагревателем на излучателе установлены управляющие температурные датчики. При температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков ниже плюс 19°C электронагреватель включен, при температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков выше плюс 21°C электронагреватель выключен.

Мощность электронагревателя выбрана с учетом следующих теплофизических характеристик элементов конструкции узла вторичного зеркала (УВЗ):

- степень черноты рабочей поверхности ВЗ $\epsilon \leq 0.05$;
- степень черноты тыльной поверхности ВЗ и поверхности излучателя, обращенной к ВЗ, $\epsilon \geq 0.88$;
- степень черноты внутренних поверхностей тубуса и бленды ВЗ $\epsilon \geq 0.9$;
- термические сопротивления каждого узла крепления ВЗ к оправе ВЗ не менее 20 К/Вт;
- термические сопротивления узлов крепления оправы ВЗ к валу механизма фокусировки и узлов крепления излучателя ВЗ к нижнему шпангоуту спайдера не менее 10 К/Вт.

СИСТЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТЕЛЕСКОПА Т-170М И НАУЧНОЙ АППАРАТУРЫ



- 1 – излучатель ВЗ;
2 – электронагреватель ВЗ;
3 – управляющий температурный датчик;
4 – теплоизоляция.

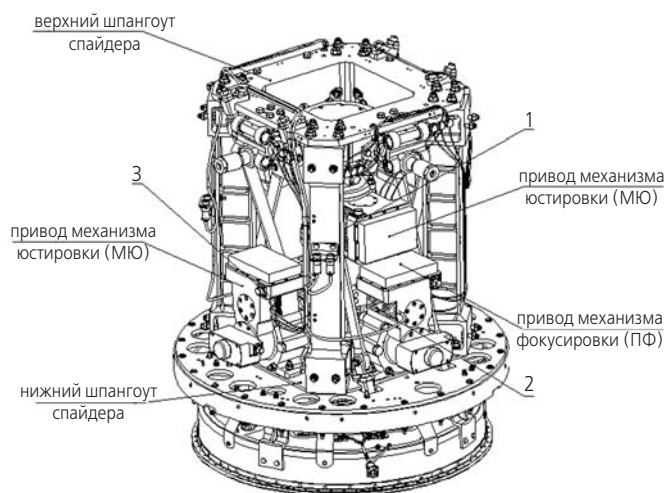
рисунок 5. СОТР узла вторичного зеркала

На приводе фокусировки и каждом приводе юстировки размещены электронагреватели мощностью по 10 Вт. Для управления работой каждым электронагревателем на приводах установлены управляющие температурные датчики. При температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков ниже минус 15°C электронагреватель включен, при температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков выше плюс 15°C электронагреватель выключен.

Мощность электронагревателя выбрана с учетом следующих теплофизических характеристик элементов конструкции МВЗ:

- термические сопротивления узлов крепления привода к нижнему шпангоуту спайдера и узлов крепления привода к верхнему шпангоуту спайдера не менее 9 К/Вт;
- термическое сопротивление пилонов спайдера не менее 20 К/Вт;
- наружные поверхности МВЗ закрыты ЭВТИ.

Типовые температурные поля по ВЗ и оправе ВЗ, полученные при моделировании номинального теплового режима, приведены на рисунках 7 и 8. Перепад температур по толщине ВЗ не превышает 1.2°C, а по радиусу на рабочей поверхности ВЗ – не более 1.5°C.



- 1 – электронагреватель привода МЮ;
2 – электронагреватель привода МФ;
3 – управляющий температурный датчик.

рисунок 6. СОТР отсека приводов МВЗ

Температурные поля, полученные в тепловых моделях по всем основным фрагментам конструкции телескопа, переданы в прочностные модели, и по ним проведена оценка геометрической стабильности телескопа из-за возможных термических деформаций.

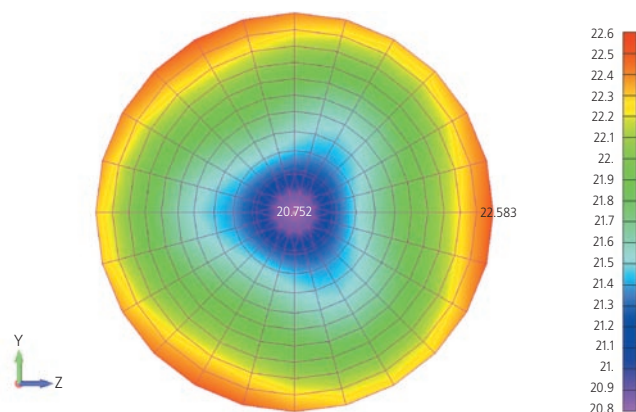


рисунок 7. Температурное поле по рабочей поверхности ВЗ

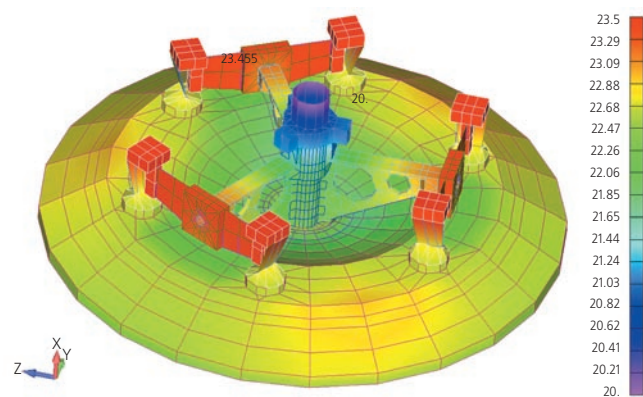


рисунок 8. Температурное поле по тыльной поверхности и по оправе ВЗ

3. Средства обеспечения теплового режима инструментального отсека

СОТР ИО предназначена для отвода тепла от работающей аппаратуры блока камер поля и блока спектрографов, расположенных внутри инструментального отсека. Отвод тепла осуществляется за счет лучистого теплообмена между радиационными поверхностями блоков и поверхностью термостабилизированного защитного кожуха (ТЗК), входящего в состав СОТР ИО. Кроме того, СОТР ИО должна поддерживать температурные условия для конструктивных элементов ИО, обеспечивающих их геометрическую стабильность, а также заданные температурные условия на посадочных местах блоков аппаратуры, установленных на проставке ИО.

СОТР ИО поддерживает следующие температурные условия на элементах конструкции:

1. На этапе выведения температурный диапазон всех элементов конструкции ИО – от минус 20°C до плюс 50°C.

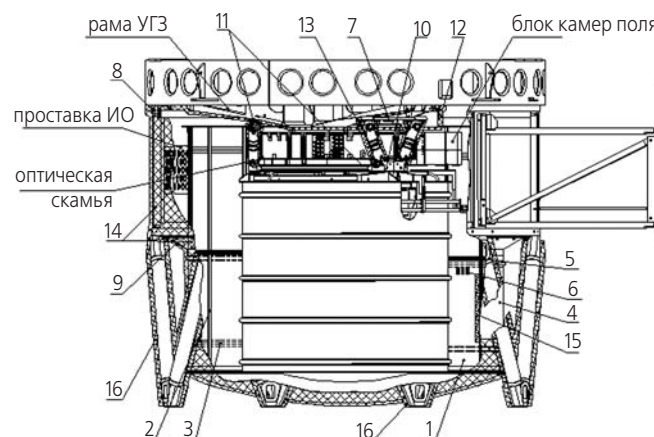
2. В режиме штатной эксплуатации:

- температурный диапазон посадочных мест конструкции оптической скамьи под блок камер поля и блок спектрографов – от плюс 15°C до плюс 25°C;
- изменение температуры оптической скамьи в течение сеанса – не более 1°C;
- температурный диапазон проставки ИО в зонах установки блоков аппаратуры – от минус 50°C до плюс 40°C;
- температурный диапазон ТЗК – от плюс 10°C до плюс 20°C.

Состав агрегатов СОТР ИО приведен на рисунке 9.

Основным агрегатом СОТР является термостабилизированный защитный кожух, который выполнен из теплопроводного алюминиевого сплава и состоит из цилиндрической оболочки и донной части в виде сегмента сферы. Внутренняя поверхность ТЗК имеет степень черноты $\varepsilon \geq 0.9$. На цилиндрической оболочке ТЗК для выравнивания температурного поля равномерно по образующей цилиндра установлены аксиальные тепловые трубы в количестве 21 шт. и три кольцевых коллекторных тепловых трубы. Теплоносителем тепловых труб является аммиак.

Для сброса подводимого к ТЗК тепла часть наружной поверхности ТЗК выполнена в виде радиационного теплообменника со степенью черноты $\varepsilon \geq 0.9$, размещенного с теневой стороны космического аппарата. Для терморазвязки между нижним шпангоутом проставки ИО и ТЗК введена титановая вставка с термическим сопротивлением 1 К/Вт. Вся наружная



- 1 – термостабилизированный защитный кожух;
- 2 – аксиальные тепловые трубы (АТТ) ТЗК;
- 3 – коллекторный теплопровод на базе АТТ ТЗК;
- 4 – радиационный теплообменник ТЗК;
- 5 – электронагреватель ТЗК;
- 6 – управляющий термодатчик (РТО) ТЗК;
- 7 – электронагреватель рамы узла главного зеркала в зоне установки узла подвески оптической скамьи;
- 8 – терморазвязка верхнего шпангоута проставки и опорного шпангоута телескопа;
- 9 – терморазвязка между нижним шпангоутом проставки и ТЗК;
- 10 – терморазвязка оптической скамьи и блока спектрографов;
- 11 – терморазвязка оптической скамьи и блока камер поля;
- 12 – теплоизоляция рамы УГЗ;
- 13 – теплоизоляция фермы оптической скамьи;
- 14 – теплоизоляция наружной поверхности проставки и ТЗК ИО;
- 15 – теплоизоляция нерабочей поверхности РТО ТЗК;
- 16 – теплоизоляция переходной фермы.

рисунок 9. СОТР инструментального отсека

поверхность ИО, кроме поверхности радиационного теплообменника ТЗК, закрыта ЭВТИ.

На цилиндрической поверхности ТЗК около средней коллекторной тепловой трубы установлен электронагреватель мощностью 130 Вт. Электронагреватель выполнен в виде секций, размещенных равномерно по окружности ТЗК. Управление работой электронагревателя проводится по показаниям температурных датчиков, установленных на поверхности ТЗК. При температуре ТЗК в зоне установки температурных датчиков ниже плюс 14°C электронагреватель включен, при температуре выше плюс 16°C – выключен.

Температурное поле по ТЗК, полученное в результате моделирования теплового режима ИО при штатной эксплуатации телескопа, представлено на рисунке 10. Результаты моделирования показывают, что неравномерность температурного поля укладывается в диапазон $15 \pm 3^\circ\text{C}$.

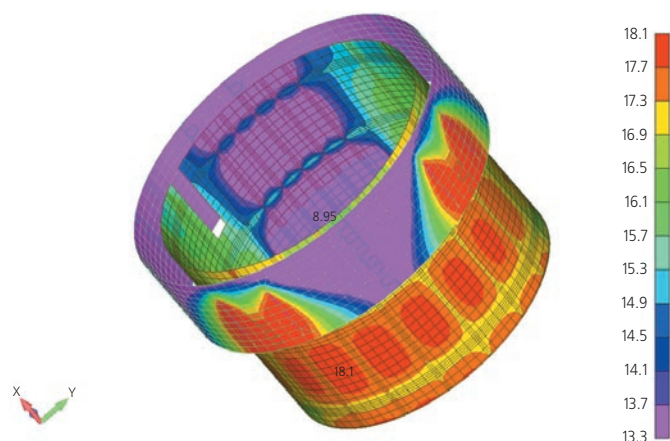


рисунок 10. Температурное поле по ТЗК и проставке ИО

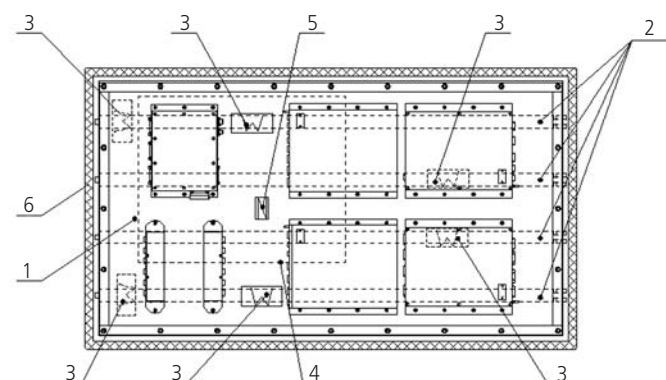
4. Средства обеспечения теплового режима приборных панелей внешнего расположения ППВР-1 и ППВР-2

Выносные приборные панели размещены с внешней стороны инструментального отсека телескопа и предназначены для размещения комплекса служебной аппаратуры (ППВР-1) и научных блоков электроники (ППВР-2) телескопа.

Автономные СОТР приборных панелей внешнего расположения предназначены для поддержания заданных температурных диапазонов на посадочных местах блоков аппаратуры:

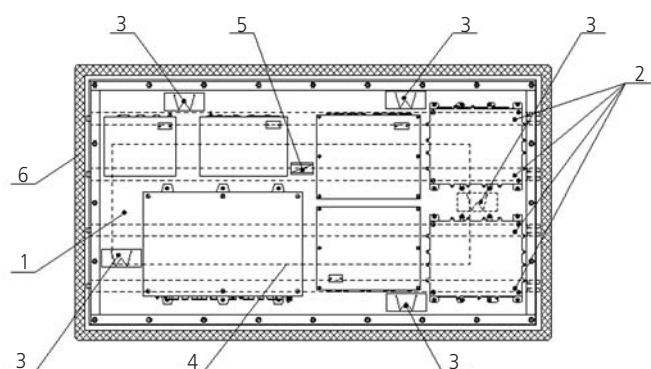
- на этапе выведения – от минус 50°C до плюс 50°C;
- в режиме штатной эксплуатации – от минус 20°C до плюс 40°C.

Состав агрегатов СОТР панелей внешнего расположения приведен на рисунках 11 и 12.



- 1 – тепловая сотованель;
- 2 – тепловая труба;
- 3 – электронагреватель;
- 4 – радиатор;
- 5 – управляющий температурный датчик;
- 6 – теплоизоляция.

рисунок 11. СОТР ППВР-1



- 1 – тепловая сотованель;
- 2 – тепловая труба;
- 3 – электронагреватель;
- 4 – радиатор;
- 5 – управляющий температурный датчик;
- 6 – теплоизоляция.

рисунок 12. СОТР ППВР-2

ППВР-1 и ППВР-2 крепятся к проставке инструментального отсека с помощью ферменных конструкций с термическим сопротивлением между панелью и проставкой не менее 10 К/Вт.

Каждая панель внешнего расположения выполнена в виде тепловой сотованели (ТСП), внутри которой для выравнивания температурного поля размещены аксиальные тепловые трубы. Теплоносителем тепловых труб является аммиак. Блоки аппаратуры устанавливаются на ТСП через теплопроводные прокладки из терморасширенного графита, что обеспечивает необходимую тепловую проводимость между блоками аппаратуры и ТСП.

Тепловые потоки, поступающие от блоков аппаратуры к ТСП, сбрасываются в космическое пространство излучением через радиационные поверхности на внешней стороне ТСП. Радиационные поверхности имеют следующие термооптические характеристики:

- коэффициент поглощения солнечной радиации $A_s \leq 0.22$;
- степень черноты $\epsilon \geq 0.9$.

Для поддержания теплового режима ТСП при неработающей (не выделяющей тепловую энергию) аппаратуре на ТСП установлены электронагреватели. Электронагреватели выполнены в виде нескольких секций, распределенных по ТСП – шесть секций на ППВР-1 суммарной мощностью 50 Вт и пять секций на ППВР-2 суммарной мощностью 90 Вт.

Управление электронагревателями осуществляется управляющими температурными датчиками, установленными на каждой ТСП. При температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков ниже 0°C электронагреватель включен, при темпе-

ратуре в зоне установки управляющих температурных датчиков выше плюс 10°C электронагреватель выключен.

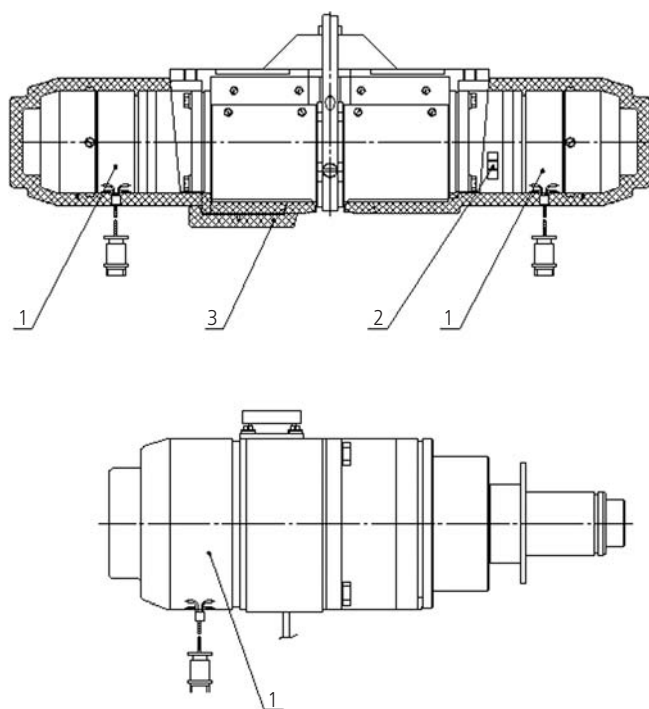
Все наружные поверхности ППВР-1 и ППВР-2, за исключением радиационных поверхностей ТСП, закрыты ЭВТИ.

5. Средства обеспечения теплового режима механизма раскрытия крышки солнцезащитной и приводов бленды наружной

СОТР электромеханических приводов бленды наружной (БН) и крышки солнцезащитной (КСЗ), а также пирочек механизмов их фиксации в транспортном положении обеспечивают следующие температурные диапазоны:

- температурный диапазон корпусов приводов БН и КСЗ – от минус 30°C до плюс 50°C на этапе эксплуатации и от минус 50°C до плюс 50°C – в режиме хранения;
- температурный диапазон пирочек механизмов раскрытия БН и СЗК – от минус 60°C до плюс 60°C.

Состав агрегатов СОТР приводов приведен на рисунке 13.



- 1 – электронагреватель;
2 – управляющий температурный датчик;
3 – теплоизоляция.

рисунок 13. СОТР приводов КСЗ и БН

Приводы БН и СЗК расположены на теневой стороне телескопа, и для поддержания их рабочих температурных диапазонов на корпусах приводов установлены электронагреватели.

Приводы БН работают однократно в процессе перевода бленды из транспортного положения в рабочее. Электронагреватели приводов мощностью по 12 Вт каждый до раскрытия бленды работают по временной циклограмме с заданной скважностью, а после раскрытия бленды выключаются.

Приводы СЗК обеспечивают многократное открытие и закрытие СЗК. Электронагреватели приводов по 24 Вт каждый управляются по показаниям управляющих температурных датчиков. При температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков ниже минус 10°C электронагреватели включены, при температуре в зоне установки управляющих температурных датчиков выше плюс 20°C электронагреватели выключены.

Конструкция узлов крепления приводов БН и СЗК к верхнему шпангоуту тубуса выполнена с высоким термическим сопротивлением – не менее 50 К/Вт. Наружные поверхности приводов закрыты ЭВТИ.

В заключение следует отметить, что в настоящее время завершается наземная тепловакуумная обработка автономных средств обеспечения теплового режима составных частей телескопа Т-170М и его научной и служебной аппаратуры, которая подтверждает эффективность разработанных средств обеспечения теплового режима.

список литературы

Автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований / Под ред. Г.М. Полищука и К.М. Пичхадзе. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 660 с.

Ефанов В.В., Мартынов М.Б. Космические комплексы научно-производственного объединения им. С.А. Лавочкина для фундаментальных и прикладных исследований // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2013. № 8. С. 88-97.

Хартов В.В. Новый этап создания автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований // Вестник ФГУП им. С.А. Лавочкина. 2011. № 3. С. 3-10.

Статья поступила в редакцию 25.09.2014 г.

СЛУЖЕБНЫЙ КОМПЛЕКС ТЕЛЕСКОПА T-170M

HOUSEKEEPING COMPLEX OF T-170M TELESCOPE

И.В. Чулков¹,
chulkov@iki.rssi.ru;
I.V. Chulkov

К.В. Ануфрейчик¹,
kos@iki.rssi.ru;
K.V. Anufreychik

А.А. Коновалов¹,
konovalov@iki.rssi.ru;
A.A. Konovalov

Д.Г. Тимонин¹,
timonin@iki.rssi.ru;
D.G. Timonin

А.В. Семенов¹,
asemenov@iki.rssi.ru;
A.V. Semenov

А.В. Никифоров¹,
nikiforov@iki.rssi.ru;
A.V. Nikiforov

Служебный комплекс космического телескопа T-170M – основного инструмента проекта «СПЕКТР-УФ» – предназначен для управления и обеспечения прецизионности конструкции на всех этапах эксплуатации телескопа. В статье рассмотрены задачи, состав и особенности создания служебного комплекса.

T-170M Space Telescope is a main instrument of «SPEKTR-UF» project. The housekeeping complex is intended for control and the structural precision assurance during all telescope lifetime phases. The article reviews objectives, composition and special features of the housekeeping complex design & development.

Ключевые слова: проект «СПЕКТР-УФ»; телескоп T-170M; служебный комплекс; системы управления и сбора служебной информации.

Key words: «SPEKTR-UF» project; T-170M telescope; housekeeping complex; control system and housekeeping data acquisition system.

Комплекс научной аппаратуры входит в состав космического аппарата (КА) «СПЕКТР-УФ» и включает в себя телескоп T-170M, комплекс основных научных приборов (КОНП) и научную аппаратуру «КОНУС-УФ» (Боярчук А.А. и др., 2012).

Создание крупного космического телескопа является непростой задачей. В качестве примера успешного решения подобной задачи можно рассматривать телескоп КРТ проекта «СПЕКТР-РАДИОАСТРОН» (Аставин А.С. и др., 2014).

Не менее сложной задачей является управление и обеспечение прецизионности конструкции телескопа во время эксплуатации. Для этих целей в состав телескопа входит служебный комплекс.

Служебный комплекс телескопа состоит из следующих блоков:

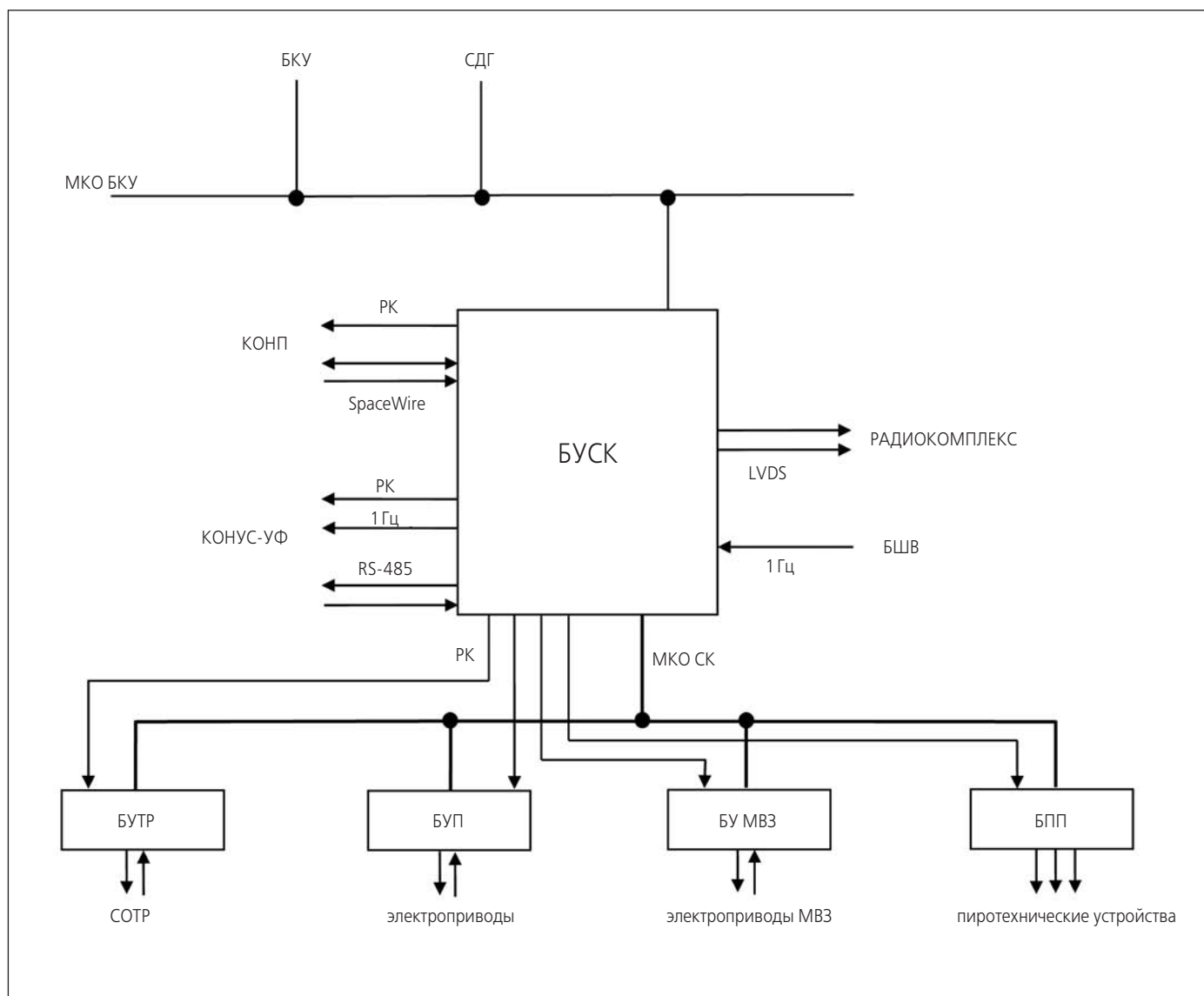
- блок управления служебным комплексом (БУСК). Основными функциями являются прием, хранение и передача в радиоканал телеметрической информации, выдача цифровых и импульсных команд в блоки служебного комплекса, КОНП и «КОНУС-УФ». В части работы с КОНП БУСК дублирует функции блока управления научными данными;
- блок управления температурным режимом (БУТР). Опрашивает температурные датчики, а также включает или выключает нагреватели системы обеспечения температурным режи-

мом для предотвращения тепловой деформации конструкции телескопа. Может осуществлять автоматическое управление нагревателями по показаниям термодатчиков в соответствии с программируемыми алгоритмами;

- блок управления модулем вторичного зеркала (БУ МВЗ). С его помощью осуществляются прецизионные линейные перемещения вторичного зеркала для обеспечения юстировки и фокусировки объектива телескопа в процессе штатной эксплуатации;
- блок управления приводами (БУП). Предназначен для управления электроприводами механизмов раскрытия, а также опроса датчиков положения светозащитной крышки и наружной бленды;
- блок управления пиротехническими устройствами (БПП). Обеспечивает подрыв пиропатронов, входящих в механизм раскрытия наружной бленды и светозащитной крышки телескопа;
- система датчиков гида (СДГ), которая, в свою очередь, состоит из трех датчиков гида и общего блока обработки данных. Предназначена для формирования информации, используемой бортовым комплексом управления (БКУ) служебного модуля КА для точного наведения телескопа на объект исследования и удержания его в этом направлении с заданной точностью в течение сеанса научного наблюдения.

¹ ФГБУН Институт космических исследований РАН, Россия, г. Москва.

Space Research Institute of RAN, Russia, Moscow.



рисунк 1. Функциональная блок-схема служебного комплекса

Функциональная блок-схема служебного комплекса (СК) приведена на рисунке 1. Система датчиков гирды рассматривается в отдельной статье.

Основные характеристики остальных блоков служебного комплекса приведены в таблице.

Все блоки построены по модульному принципу, и в целях повышения надёжности все модули дублируются для организации двух полнофункциональных полуккомплектов, один из которых находится в холодном резерве всё время эксплуатации. Такое резервирование позволяет обеспечить заданную вероятность

безотказной работы в течение всего срока активного существования КА (пять лет).

Обмен командной и телеметрической информацией между блоками служебного комплекса осуществляется по магистральному каналу обмена (МКО) СК на основе интерфейса ГОСТ Р 52070-2003.

Рассмотрим более подробно задачи и структуру блоков на примере БУСК как самого сложного.

Одной из основных функций БУСК является обмен телеметрической и командной информацией по следующим интерфейсам:

таблица – Основные характеристики блоков СК

блоки	БУСК	БУТР	БУП	БПП	БУ МВЗ
масса, кг	4,5	5,0	3,0	3,5	3,5
габариты, мм	230×160×122	230×274×138	230×270×48	230×270×48	180×150×130
потребляемая мощность, Вт	<6	<14	<4,5	<6	<6,5

1. Интерфейсы импульсных (релейных) команд. По двум дублированным интерфейсам осуществляется управление электропитанием БУСК от БКУ. По 44 дублированным интерфейсам БУСК управляет питанием и режимами работы приборов СК, «КОНУС-УФ» и КОНП.

2. Интерфейс приема сигнала 1 Гц от бортовой шкалы времени (БШВ). БУСК принимает временную метку от БШВ, синхронизируется и транслирует ее в блоки СК, «КОНУС-УФ» и КОНП. По данному интерфейсу передается только временная метка, а код бортового времени передается по интерфейсу МКО БКУ (описан ниже).

3. Интерфейс МКО БКУ. Интерфейс построен на основе ГОСТ Р 52070-2003 и используется для передачи управляющих кодовых слов (УКС) для управления БУСК или дальнейшей трансляции в блоки СК, «КОНУС-УФ» или КОНП. Кроме того, МКО БКУ используется для передачи кадров информации с СДГ в БУСК (формат передачи «ОУ-ОУ»). Каждый полукомплект БУСК подключается к дублированному интерфейсу МКО БКУ в качестве оконечного устройства с выделенным адресом. Таким образом, управление БУСК со стороны БКУ возможно даже при одновременном включении обоих полукомплектов.

4. Интерфейс МКО СК. Каждый полукомплект БУСК подключен к дублированному интерфейсу в качестве контроллера шины. По этому интерфейсу осуществляется передача УКС от БУСК в блоки СК (за исключением СДГ) и опрашивается телеметрия.

5. Интерфейсы с «КОНУС-УФ». Опрос научной информации и остальной телеметрии с аппаратуры «КОНУС-УФ» осуществляется по дублированному интерфейсу RS-485, на котором БУСК является ведущим, а «КОНУС-УФ» – ведомым устройством. Скорость передачи информации в обе стороны составляет 115200 кбит/с, качество передачи информации контролируется не только по битам четности, но и по циклической контрольной сумме в каждом пакете информации. Также БУСК передает в «КОНУС-УФ» по выделенным линиям временную метку 1 Гц.

6. Интерфейсы SpaceWire. Для опроса телеметрии с КОНП каждый полукомплект БУСК содержит дублированный интерфейс SpaceWire (европейский стандарт ECSS-E-ST-50-12C). Так как стандарт предполагает полнодуплексный обмен по каналу типа «точка-точка», а абонентов получается 8 – 2 дублированные системы сбора (БУСК и блок управления научными данными) и 2 дублированных интерфейса в приборах КОНП (ISSIS и БС), для организации обмена используется бортовой маршрутизатор (БМ-4). Установка соединения осуществляется на скорости

10 Мбит/с (определяется стандартом), передача информации – на скоростях до 30 Мбит/с.

7. Интерфейс с бортовым радиокомплексом. Связь с радиокомплексом каждого полукомплекта осуществляется по дублированному интерфейсу типа «точка-точка», использующему низковольтные дифференциальные сигналы (LVDS). Скорость передачи кадра данных составляет 8000000 бит/с. Размер кадра – 645 байт. Реальную информативность радиоканала стоит ожидать примерно 4 Мбит/с за счёт служебных транспортных кадров и сверточного кодирования. По данному интерфейсу транслируется вся телеметрия, принятая с блоков СК, «КОНУС-УФ» и КОНП.

Кроме перечисленных интерфейсов, БУСК содержит интерфейс электропитания (для каждого из полукомплектов) 27 В и четыре контактных датчика, показывающих прохождение импульсных команд на БУСК и состояние (включен/выключен) каждого из полукомплектов.

Другой важной задачей, помимо рассмотренной организации обмена между приборами и блоками, является организация временного хранения полученной телеметрии. Требуемая продолжительность хранения данных определяется временем между опросом телеметрии и возможностью передать эту телеметрию на Землю. Для этой цели в БУСК реализован кластер из долговременной энергонезависимой памяти типа NAND Flash. Основные схемотехнические и программные решения данного кластера отработаны авторами на системе сбора и регистрации научной информации (ССРНИ) эксперимента «КОРОНАС-ФОТОН» (*Ануфрейчик К.В. и др., 2007*). Кластер в каждом полукомплекте БУСК содержит четыре микросхемы NAND Flash, объемом 4 Гбайта каждая. Питание каждой микросхемы управляется независимо от остальных, что позволяет отключать неиспользуемые микросхемы для увеличения ресурса и защиты от тиристорного эффекта. Программное обеспечение построено таким образом, чтобы обеспечить равномерность износа памяти (wear leveling). Программное обеспечение также «на лету» обрабатывает возникновение сбойных блоков или даже выход из строя микросхем целиком. Данные ситуации не приводят к потере принимаемых данных, хотя, безусловно, могут привести к потере данных, сохраненных в сбойных блоках или микросхемах. Кластер поддерживает динамические квоты на телеметрию на каждый блок или прибор. Это позволяет задать доступную для прибора память как в абсолютных величинах (пакетах информации), так и в пропорциях от свободного места в памяти. Кластер поддерживает вывод информации в радиоканал в порядке посту-

пления в память (FIFO), возможна повторная выдача уже выведенной информации.

Решения, отработанные на ССРНИ проекта «КОРОНАС-ФОТОН» (Аликин Ю.И. и др., 2011), лежат в основе не только кластера, но и всего блока БУСК.

Конструкция БУСК представляет собой рамочную структуру, каждая рамка которой несет один или несколько узлов.

Рассмотрим эти узлы от оснований к крышке:

- узел коммутации электропитания КРМ, содержит вторичные источники питания для электропитания остальных узлов БУСК;
- узел коммутации выдачи релейных команд КРК, содержит ключи для выдачи 44 дублированных импульсных команд в блоки СК, «КОНУС-УФ» и КОНП;
- узлы управления приборами СК, НА «КОНУС-УФ» и аппаратурой КОНП – КМХ1 и КМХ2 – наиболее «насыщенные» узлы, которые будут рассмотрены ниже;
- узел межплатных соединений КМЛ, располагается перпендикулярно остальным узлам и служит для организации электрической связи между узлами.

Узлы КМХ1 (основной полукомплект) и КМХ2 (резервный полукомплект) содержат микропроцессор, программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС), оперативное запоминающее устройство (ОЗУ), кластер долговременной памяти NAND Flash, входные и выходные каскады всех интерфейсов (за исключением питания, импульсных команд и контактных датчиков).

ПЛИС формирует временные диаграммы обмена по каждому интерфейсу и обращений с NAND Flash, обеспечивает параллельную запись и считывание потоков информации от различных приборов и блоков в ОЗУ.

Процессор осуществляет диспетчеризацию и выполнение следующих процессов: обработка входящих из БКУ команд, формирование УКС для управления приборами и блоками, поддержка механизма квот, а также формирование собственной телеметрии БУСК.

Изготовлены и прошли автономные проверки (включая приемо-сдаточные испытания) технологические образцы блоков служебного комплекса. Технологические образцы БУСК, БУТР и БУП прошли стыковочные испытания. Готовятся комплексные испытания служебного комплекса в составе комплекса научной аппаратуры (КНА) и КА. На рисунке 2 приведена фотография технологического образца БУСК.



рисунок 2. Технологический образец БУСК

Помимо работ с технологическими образцами СК, идет работа над штатными образцами – закуплены в полном объеме и прошли сертификацию электро-радиоизделия, изготавливаются узлы и детали образцов для конструкторско-доводочных испытаний.

Результаты проведенных испытаний, опыт летно-космических испытаний схожих схемотехнических решений на проектах «КОРОНАС-ФОТОН» и «СПЕКТР-РАДИОАСТРОН» позволяют надеяться на соблюдение плана-графика создания служебного комплекса и его надежную работу в течение всего срока наземной отработки и летной эксплуатации.

список литературы

Аликин Ю.И., Ануфрейчик К.В., Гляненько А.С., Козлов И.В. и др. Структура управления и передачи данных научной аппаратуры спутникового проекта «КОРОНАС-ФОТОН» // *Астрономический вестник РАН*. 2011. Т. 45. № 3. С. 228-232.

Ануфрейчик К.В., Чулков И.В., Бунтов М.В., Семенина Н.П. и др. Построение кластера на накопителях типа Flash для использования в бортовых информационно-управляющих системах // *Космическое приборостроение: сб. тр. по результатам выездного семинара. Приборы для космических исследований планет и Земли*. ИКИ РАН, 2007. С. 329-339.

Аставин А.С., Ковалев В.С., Комаев Р.В., Мошнеев А.А. и др. Создание прецизионной конструкции крупногабаритного космического радиотелескопа // *Вестник НПО им. С.А. Лавочкина*. 2014. № 3. С. 91-95.

Боярчук А.А., Шустов Б.М., Мошнеев А.А., Сачков М.Е. Проект «СПЕКТР-УФ» // *Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина*. 2012. № 4. С. 64-73.

Статья поступила в редакцию 03.10.2014 г.

СИСТЕМА ТОЧНОГО ГИДИРОВАНИЯ**FINE GUIDANCE SYSTEM****Б.Б. Беляев¹,***кандидат технических наук,
bbb@laspace.ru;***B.B. Belyaev****А.И. Ульяшин¹,***ulyashin@laspace.ru;
A.I. Ulyashin***Ф.А. Ковалев¹,***phkovalev@gmail.ru;
F.A. Kovalev*

В статье изложен принцип построения контура прецизионной стабилизации космического аппарата, положенный в основу проекта «СПЕКТР-УФ», рассмотрены состав основных приборов и их характеристики, определяющие условие выполнения заданных в техническом задании точностных требований. Приведены алгоритмы управления и основные результаты численного моделирования, подтверждающие выполнение заданных требований.

Ключевые слова: космический телескоп; датчик гида; космический аппарат; бортовой комплекс управления; алгоритмы управления.

ВВЕДЕНИЕ

Система точного гидирования предназначена для наведения телескопа Т-170М на исследуемый источник на небесной сфере и удержания его в таком положении в течение всего интервала наблюдения с высокой точностью. Этого требуют исследовательские приборы, получающие лучистую энергию через узкие входные диафрагмы, которые расположены в фокальной поверхности оптической системы телескопа Т-170М, а также камера поля, получающая изображение исследуемой области с высоким разрешением.

Для работы этих устройств требуется обеспечить точность наведения и стабилизации телескопа в 0.1 угл. с на уровне 3 σ .

Достижение этих параметров требует вполне определенных характеристик измерительных средств и исполнительных органов, которые должны образовать контур системы управления КА. Основным измерительным средством этого контура является система датчиков гида (СДГ), обеспечивающая измерение углов отклонения телескопа вокруг трех осей. Облик СДГ явился результатом длительной проработки.

Чтобы получить необходимые точностные характеристики СДГ, чувствительные элементы датчиков гида (ДГ), использующие ПЗС-матрицы, пришлось расположить непосредственно в фокальной поверхности оптической системы телескопа. Датчики были

The article covers the principles of the spacecraft precision stabilization looping, assumed as a basis of «SPEKTR-UF» project, composition of main instruments and their properties are given providing that precision requirements stated in the technical specification are met. Control algorithms and major results of numerical simulation are presented giving evidence of compliance to the specified requirements.

Key words: space telescope; fine guidance sensor; spacecraft; onboard control system; control algorithms.

установлены так, что центры ПЗС-матриц легли по окружности радиусом в 60 мм симметрично через 120°, с центром в главной точке оптической системы, а их плоскости – по касательной к фокальной поверхности. При этом угловой размер поля зрения каждого датчика составил ~3 угл. мин, а пространственный угол между направлениями осей датчиков составил ~21 угл. мин. При штатной работе используется комбинация из любых двух датчиков, что позволяет измерять отклонение оси от направления визирования с точностью до 0.01 угл. с, а разворот вокруг оси визирования – около 3 угл. с. Это эквивалентно перемещению изображения на ~0.8 микрон в пределах фокальной поверхности, что достаточно для нормальной работы исследовательской аппаратуры. Стабилизация вокруг направления визирования необходима для того, чтобы исключить смещение изображения на фокальных приборах, так как их оси визирования не совпадают с осями СДГ.

Начальное наведение телескопа осуществляется по данным оптико-электронных приборов космического аппарата бортового комплекса управления (БКУ). Узкие поля зрения датчиков гида, обусловленные форматом ПЗС-матрицы, требуют высокой точности начального наведения. Выполнение этого условия достигается проведением юстировки астродатчиков БКУ относительно базовых элементов телескопа. Юстировка проводится в два этапа, сначала при на-

¹ ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

земной подготовке КА, а в последующем – при летных испытаниях. Наземная юстировка заключается в измерении фактического положения контрольно-юстировочного элемента астродатчиков относительно аналогичного элемента телескопа. Полученные измерения вносятся в матрицу поправок, учитывающую взаимное положение измерительных приборов БКУ. Однако точности этих поправок недостаточно для работы телескопа на орбите. На точность измерений влияют такие факторы, как точность обезживания элементов конструкции КА и телескопа, эффекты релаксации конструкционных материалов после прохождения участков выведения КА, температурные условия и др. По проведённым оценкам и с учётом статистики, возможная погрешность взаимного положения астродатчиков относительно телескопа может составлять 4 угл. мин. Поэтому предусмотрено проведение измерений взаимного положения этих приборов в полёте по измерительной информации. Учитывая такую погрешность наведения телескопа, СДГ может не выполнить идентификацию звёзд-гидов, и, следовательно, не выполнить измерения, поэтому предусмотрена передача изображения камер ДГ на Землю для идентификации его наземными средствами и определения фактической ориентации СДГ. Очевидно, что эта задача должна выполняться в областях небесной сферы с наиболее благоприятным набором звёзд (по расположению и яркости).

Результаты полученных измерений будут также введены в матрицу поправок, что в дальнейшем позволит гарантированно наводить телескоп с погрешностью до 1 угл. мин. Эта погрешность в основном определяется термодетформациями конструкционного перехода оптический датчик – телескоп в процессе работы. Величина этой погрешности будет влиять на время приведения телескопа в заданное положение. Поскольку угловые скорости КА в режиме прецизионной стабилизации не должны превышать $\sim 10^{-5}$ град/с, то время «приведения» может составлять 15...20 минут.

Другой задачей юстировки становится измерение фактического положения фокальных приборов в телескопе. К ним же относится и СДГ. Неточность взаимного положения камер СДГ приведёт к невозможности совмещения изображений звёзд и данных рабочего каталога. Проблемы точности заданного фокусного расстояния оптической системы телескопа решаются проведением измерений фактического положения и коррекцией установочных параметров СДГ. Сложнее дело обстоит с неточностями каталогов звёзд. Следует отметить, что погрешности координат некоторых звёзд доходят до 0.3 угл. с, что превышает требование по точности наведения. Для этой цели, а также для определения фактического положения фокальных приборов предусмотрено

выполнение сканирования в ограниченной области, выполняемое программным движением КА по заданному маршруту. При выполнении этого манёвра предполагается использование информации научных приборов для определения текущих координат источников наблюдения.

Чтобы обеспечить работу телескопа в любой области небесной сферы, необходимо иметь чувствительность датчиков гига к яркости звёзд до $+17m_v$ звездной величины. Эта оценка была произведена исходя из вероятности попадания хотя бы по одной звезде в поле зрения двух выбранных датчиков.

Для функционирования СДГ перед началом работы загружается рабочий звездный каталог. Область рабочего каталога превышает размер поля зрения ДГ на величину возможной погрешности первоначального наведения, производимого по информации астроприборов БКУ, и может составлять 5...6 угл. мин для каждого ДГ.

Задаются также параметры требуемой ориентации полей ДГ в виде расчетной точки наведения (РТН). Если поля зрения каждого из работающих ДГ наведены точно в РТН, то прибор выдает информацию о «нулевом» рассогласовании.

Работа СДГ начинается с идентификации полученного изображения звезд с данными введенного каталога на запланированный для работы участок небесной сферы. При положительном завершении этой процедуры СДГ переходит к выдаче данных по отклонению телескопа от РТН. Для случая отрицательного результата идентификации звезд предусмотрен режим создания каталога звезд по полученному фактическому изображению. Принудительно по специальной команде текущие координаты изображения звезд принимаются за каталожные, и в дальнейшем относительно них производится измерение отклонений.

СДГ способен работать при наличии до одной звезды в каждой камере. При обнаружении единственной звезды данные по вращению вокруг оси телескопа не формируются. В этом случае стабилизация оси вращения осуществляется по астродатчикам БКУ.

1. Основные характеристики СДГ

Точность измерения отклонения в поперечном направлении 0.01 угл. с (СКО).

Точность измерения отклонения вокруг оси визирования при использовании двух ДГ 5 угл. с (СКО).

Дискретность измерения угла 0.005 угл. с.

Диапазон яркости используемых для гидирования звезд $+8m_v$... $+16m_v$ (допускается работа по звёздам $+17m_v$, характеристики измерительных параметров определяются экспериментально).

Период обновления выходной информации 2 сек.

При проектировании контура стабилизации прецизионного режима учитывалось также возможное повышение уровня шума выходной информации СДГ в период солнечной активности. Применение фильтров при двухсекундном опросе датчиков приводит к существенному увеличению постоянной времени контура или, что то же самое, к снижению быстродействия, в результате происходит увеличение зависимости точности стабилизации от переменного возмущающего момента. Радикальным решением этой проблемы является использование прецизионного гироприбора, который в настоящий момент проходит наземную экспериментальную отработку (НЭО). Это прибор КИНД34-064, разработчиком его является НИИ прикладной механики им. ак. В.И. Кузнецова.

2. Основные характеристики прибора КИНД34-064

Случайная составляющая дрейфа $0.001^\circ/\text{ч}$.

Шумовая составляющая («нулевой» сигнал) 0.05 угл. с.

Дискретность измерения 0.003 угл. с.

Частота обновления информации 10 Гц.

Использование данного прибора в контуре позволяет сохранить требуемое быстродействие и реализовать глубокую фильтрацию измерений СДГ.

В качестве исполнительных органов в проекте использованы электромаховичные исполнительные органы (ЭМИО) типа «АГАТ-40», разработанные предприятием ОАО НПЦ «Полус».

3. Основные характеристики ЭМИО

Максимальный кинетический момент 40 Нмс.

Максимальный момент управления 0.2 Нм.

Дискретность управления 10^{-4} Нм.

Количество маховиков с единым блоком управления – четыре.

Важным параметром данного прибора является очень малая дискретность реализации управляющего момента, что позволяет достигать минимальных скоростей стабилизации до уровня $10^{-6}^\circ/\text{с}$.

Основным фактором достижения минимальной скорости и угла при стабилизации являются измерительные средства.

Вместе с этим, следует отметить некоторое негативное свойство маховика при переходе через нулевую скорость вращения. Как известно из механики, для различных механических пар скольжения или качения сопротивление движению «покоя» больше сопротивления «движения» обычно в несколько раз. Поэтому, когда маховик проходит состояние «покоя» (обнуляется его угловая скорость), наступает потеря управляемости, так как величина входного сигнала

на маховик соответствовала ранее установленному балансу моментов и этой величины недостаточно для преодоления внезапно возникшего момента сопротивления. Это явление создает возмущения в контуре стабилизации, которое приводит к невыполнению заданных требований по точности.

Чтобы избежать этого явления, необходимо при планировании сеансов работы учитывать направление возмущающего момента и обеспечивать необходимое начальное «смещение» маховиков.

Существуют разработанные алгоритмы компенсации этого явления внутри прибора, однако эффективность их применения для рассматриваемого контура требует дополнительного анализа.

Другим негативным свойством маховиков является механический шум, создаваемый работой подшипникового узла ротора, а также его остаточным дебалансом. По оценкам, полученным при стендовых испытаниях, это может приводить к дрожанию изображения до 0.1 угл. с, что приведёт к снижению эффективности результатов научных наблюдений. Поэтому маховики будут установлены на платформе КА через специальные виброизолирующие устройства.

Ниже приводятся разработанные алгоритмы прецизионного контура и результаты моделирования.

4. Алгоритмы системы стабилизации и ориентации

Основная задача прецизионного контура – по информации измерительных приборов об угловом рассогласовании между стабилизируемой осью и заданным направлением осуществлять формирование управляющих сигналов, подаваемых на ИО, т.е. реализовать выбранный закон управления.

Предлагается использовать закон управления следующего вида:

$$\sigma = K_\varphi \varphi + K_\dot{\varphi} \dot{\varphi} + K_M M_B,$$

где φ – угловое рассогласование между заданным направлением и стабилизируемой осью КА;

$\dot{\varphi}$ – скорость изменения углового рассогласования;
 M_B – возмущающий момент;

K_φ , $K_\dot{\varphi}$, K_M – коэффициенты по углу, угловой скорости и моменту соответственно;

σ – сигнал управления исполнительными органами.

Для получения оценок углового рассогласования, угловой скорости КА и возмущающего момента в контуре используется наблюдатель Люэнбергера (Лобанов В.С. и др., 2013; Беляев Б.Б. и др., 2012).

При этом алгоритмически реализовано два варианта управления:

1. Информация об угловом рассогласовании поступает от гироприбора и корректируется по информации СДГ.

2. Информация об угловом рассогласовании поступает только от СДГ, гиросприбор выключен.

Корректировка информации гиросприбора необходима для компенсации дрейфа нулевого сигнала и совмещения гиринерциальной системы координат прибора (базис J) с заданной системой координат в инерциальном пространстве (базис I), построенной по информации СДГ.

Наблюдатель Люэнберга при получении информации гиросприбора об угловом отклонении КА можно представить в следующем виде:

- Априорная прогнозируемая оценка вектора состояния

$$M^{\text{анп}} = M_{\text{ИО}}(\sigma_i)/J + M_{\text{В}_{i-1}} \text{ по полному ускорению,}$$

$$\varphi_i^{\text{анп}} = \varphi_{i-1} + \omega_{i-1}T + M \frac{T^2}{2} \text{ по углу,}$$

$$\omega_i^{\text{анп}} = \omega_{i-1} + MT \text{ по угловой скорости,}$$

$M_{\text{В}_i}^{\text{анп}} = M_{\text{В}_{i-1}}$ по возмущающему угловому ускорению,

где T – такт получения информации гиросприбора об угловом отклонении КА от программного положения, равный такту БВУ;

$M_{\text{ИО}}(\sigma_i)$ – момент, создаваемый ИО по соответствующему каналу;

σ_i – сигнал управления маховиками на i -м такте;

J – главный осевой момент инерции КА по соответствующему каналу.

- Апостериорная оценка вектора состояния

$$\varphi_i = \varphi_i^{\text{анп}} + K_{F1}(\phi_i - \varphi_i^{\text{анп}}),$$

$$\omega_i = \omega_i^{\text{анп}} + K_{F2}(\phi_i - \varphi_i^{\text{анп}}),$$

$$M_{\text{В}_i} = M_{\text{В}_i}^{\text{анп}} + K_{F3}(\phi_i - \varphi_i^{\text{анп}}),$$

где ϕ_i – значение углового рассогласования между программным положением КА и его положением по информации гиросприбора на i -м такте получения информации;

K_{Fj} – коэффициенты усиления наблюдателя, $j=1, 2, 3$.

Значение $\phi_i=2\lambda_i$ определяется кватернионом Λ путем интегрирования вычислительным устройством БКУ кинематического уравнения движения КА в гиринерциальном пространстве (базисе J), которое можно записать как

$$\dot{\Lambda} = \frac{1}{2}\Lambda \otimes \varpi,$$

$$\varpi = \varpi_E + \delta\varpi + \Delta\varpi,$$

где ϖ – вектор угловой скорости КА, измеряемый гиросприбором;

Λ – кватернион рассогласования между базисом J и связанной системой координат КА (базисом E);

ϖ_E – вектор угловой скорости КА в связанной системе координат (базисе E);

$\delta\varpi$ – вектор «систематического ухода» гиросприбора в базисе E;

$\Delta\varpi$ – вектор случайных составляющих «ухода» гиросприбора, иначе говоря, шум измерений.

Для корректировки информации гиросприбора в кинематическое уравнение движения КА вводится смещение

$$\bar{u}_J = (\gamma \cdot \bar{\theta} - \delta\varpi) \otimes \Lambda,$$

где $\bar{\theta}$ – векторная часть кватерниона $1 + \bar{\theta}/2$, кватерниона рассогласования между инерциальной и гиринерциальными системами координат;

γ – постоянный коэффициент.

Для оценки $\bar{\theta}$ и $\delta\varpi$ используется информация СДГ, поступающая с тактом T_0 в наблюдатель Люэнберга следующего вида:

- априорная оценка

$$\theta_i^{\text{анп}} = -T_0 M_{EJ} \delta\varpi_{i-1};$$

$$\delta\varpi_i^{\text{анп}} = \delta\varpi_{i-1}$$

- апостериорная оценка

$$\theta_i = \theta_i^{\text{анп}} + B_1(\bar{n}_i - \bar{\lambda}_i),$$

$$\delta\varpi_i = \delta\varpi_i^{\text{анп}} + B_2(\bar{n}_i - \bar{\lambda}_i)$$

В этих уравнениях приняты следующие обозначения:

$$M_{EJ} = \begin{bmatrix} \lambda_0^2 + \lambda_1^2 - \lambda_2^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_1\lambda_2 - \lambda_0\lambda_3) & 2(\lambda_1\lambda_3 + \lambda_0\lambda_2) \\ 2(\lambda_1\lambda_2 + \lambda_0\lambda_3) & \lambda_0^2 - \lambda_1^2 + \lambda_2^2 - \lambda_3^2 & 2(\lambda_2\lambda_3 - \lambda_0\lambda_1) \\ 2(\lambda_1\lambda_3 - \lambda_0\lambda_2) & 2(\lambda_2\lambda_3 + \lambda_0\lambda_1) & \lambda_0^2 - \lambda_1^2 - \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \beta_1 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_1 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} \beta_2 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_2 \end{bmatrix},$$

где β_1, β_2 – постоянные коэффициенты наблюдателя;

$\bar{n}$ – векторная часть оценки кватерниона N положения КА в инерциальном базисе I по информации СДГ;

$\bar{\lambda}$ – векторная часть кватерниона положения КА в гиринерциальном базисе J по информации гиросприбора;

M_{EJ} – матрица перехода от системы координат КА (базиса E) к базису J.

Рассмотрим алгоритм управления, когда информация об угловом рассогласовании φ в законе формирования управляющих сигналов, подаваемых на ИО, поступает только от СДГ, а гиросприбор выключен.

Для обеспечения прецизионности стабилизации необходимо, чтобы система стабилизации могла создавать импульсы управляющего момента как можно меньшей величины, следовательно, необходимо менять управляющий сигнал σ , подаваемый на ИО, внутри такта T_0 .

Управляющий сигнал σ , подаваемый на ИО, должен содержать компоненту, компенсирующую мо-

мент сопротивления движению маховиков и момент внешнего возмущения, действующего на КА. Эту компоненту можно считать практически неизменной в течение такта T_0 и даже в течение значительно большего времени.

Кроме того, управляющий сигнал должен содержать переменную компоненту, компенсирующую начальные условия по углу и угловой скорости КА на момент начала такта T_0 . Эта компонента должна меняться так, чтобы обеспечивалась возможность создания минимального импульса управляющего момента

$$\int M_{\text{упр}} dt = T \sigma_{\min}.$$

С учетом вышесказанного предложен следующий алгоритм стабилизации. Сначала определяется постоянная компонента, действующая в течение всего такта T_0 . Это осуществляется следующим образом:

$$\sigma_{\text{const}} = ENT \left\{ \frac{\sigma T}{T_0} \right\},$$

где $ENT \{ \dots \}$ – операция выделения целого части из числа заключенного в скобки.

Тогда переменная компонента определится как

$$\sigma_{\text{var}} = \sigma - \frac{\sigma_{\text{const}} T_0}{T}.$$

Что касается времени действия переменной компоненты, то принят вариант, когда в течение первых $m = ENT \{ \sigma_{\text{var}} \}$ тактов действует $\sigma = \sigma_{\text{const}} + \sigma_{\text{min}}$, а далее до конца такта T_0 действует $\sigma = \sigma_{\text{const}}$. При этом обеспечивается возможность создания минимального импульса управляющего момента.

Алгоритмическая реализация предлагаемого закона стабилизации приводит к следующей априорной прогнозированной оценке:

$$M_1^{\text{анп}} = M_{\text{ИО}} (\sigma_{\text{const}} + \sigma_{\text{min}}) / J + M_{B_{i-1}} \text{ при } t \leq nT_0,$$

$$M_2^{\text{анп}} = M_{\text{ИО}} (\sigma_{\text{const}}) / J + M_{B_{i-1}}$$

$$\text{при } nT_0 + mT \leq t \leq (n+1)T_0,$$

$$\varphi_i^{\text{анп}} = \varphi_{i-1} + \omega_{i-1} T m + M_1 \frac{T^2 m^2}{2} +$$

$$+ (\omega_{i-1} + M_1 T) (T_0 - T m) + M_2 \frac{(T_0 - T m)^2}{2} \text{ по углу,}$$

$$\omega_i^{\text{анп}} = \omega_{i-1} + M_1 T m + M_2 (T_0 - T m) \text{ по угловой скорости,}$$

где T_0 – такт получения информации СДГ об угловом отклонении КА от программного положения;

T – такт БЦВМ;

i – номер такта СДГ;

$M_{\text{ИО}}(\sigma)$ – момент, создаваемый ИО по соответствующему каналу, как функция от сигнала управления s на маховики;

M_1 – ускорение КА, создаваемое ИО по соответствующему каналу на первых m тактах БЦВМ (внутри такта СДГ);

M_2 – ускорение КА, создаваемое ИО по соответствующему каналу на остальных тактах БЦВМ (внутри такта СДГ);

M_B – ускорение создаваемое действием возмущающего момента на КА по соответствующему каналу;

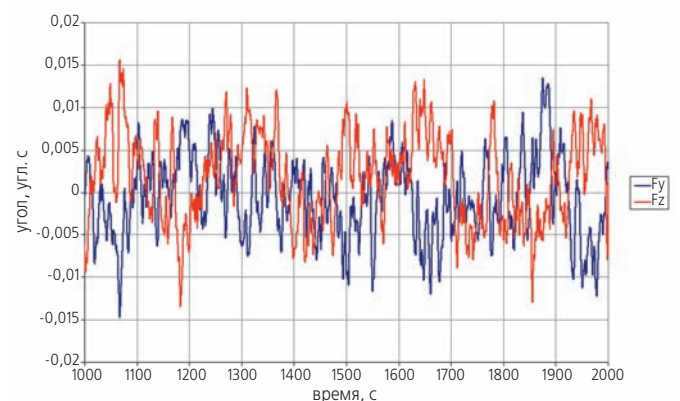
J – главный осевой момент инерции КА по соответствующему каналу.

Апостериорная оценка такая же, как в наблюдателе при работе с гиросприбором, но в этом случае ϕ_i – значение углового рассогласования между программным положением КА и его положением по информации СДГ на i -м такте получения информации.

В случае необходимости существенного повышения точности стабилизации возможно, помимо предложенных наблюдателей Льюенбергера, дополнительно использовать метод наименьших квадратов для оценки угловой скорости и углов отклонения КА (Беляев Б.Б. и др., 2013).

5. Результаты моделирования

Для проверки правильности разработанных алгоритмов было проведено численное моделирование управляемой динамики КА. Ниже приводятся некоторые полученные результаты. На рисунке 1 приведены графики изменения по времени угловых отклонений оси ОХ КА (совпадающей с визирной осью телескопа) от её программного положения в инерциальном пространстве.



рисунк 1. Угловые отклонения КА по каналам Y и Z при использовании гиросприбора в контуре управления

На рисунке 2 приведены графики изменения по времени угловых скоростей КА при стабилизации в прецизионном режиме.

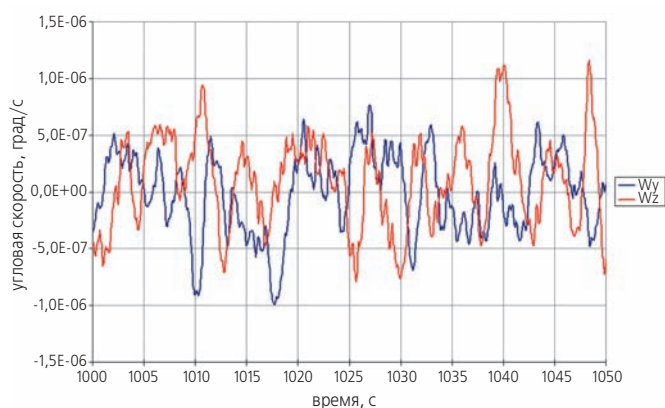


рисунок 2. Угловые скорости КА по каналам Y и Z при использовании гиросприбора в контуре управления

На рисунке 3 приведены графики изменения по времени угловых отклонений оси ОХ КА от её программного положения в инерциальном пространстве при использовании в контуре управления только информации СДГ.

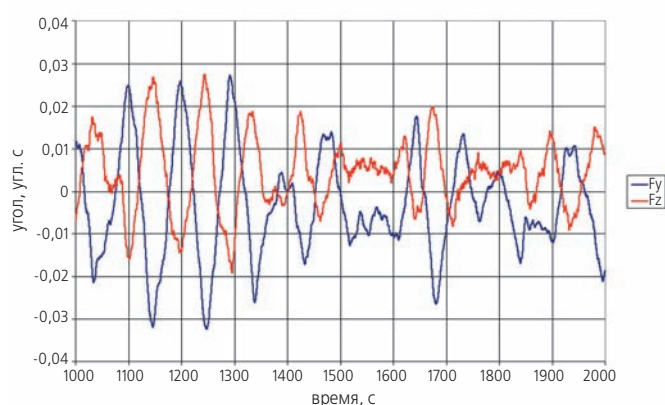


рисунок 3. Угловые отклонения КА по каналам Y и Z при использовании СДГ в контуре управления

На рисунке 4 приведены графики изменения по времени угловых скоростей КА при стабилизации в прецизионном режиме.

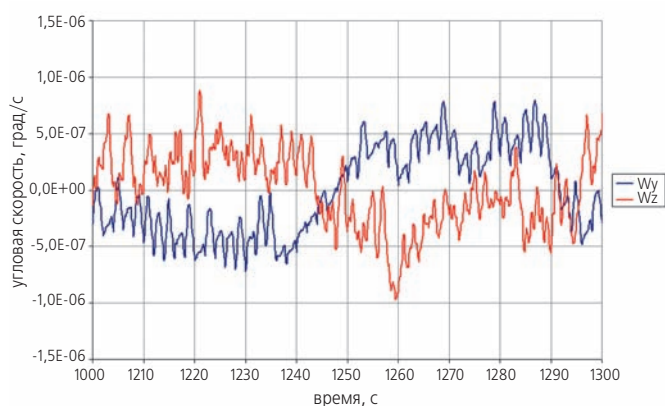


рисунок 4. Угловые скорости КА по каналам Y и Z при использовании СДГ в контуре управления

На рисунке 5 приведены графики изменения углового отклонения КА по одному каналу управления при работе в контуре модели СДГ и одновременной регистрации этого же углового отклонения макетом ДГ на стенде.

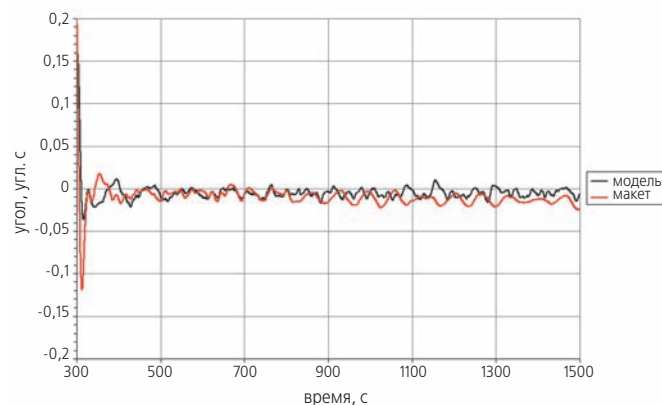


рисунок 5. Угловое отклонение по информации модели СДГ и макета

Следующим этапом отработки прецизионного контура стал стенд полунатурного моделирования. Стенд был создан с целью отработки контура с реальным прибором СДГ, представленным одним ДГ и блоком БОД. В контуре используется математическая модель КА (в виде динамического звена контура), запись «нулевого» сигнала прибора КИНД34-064, алгоритмы стабилизации.

Замыкание контура осуществляется в оптическом тракте ДГ, на чувствительный элемент которого проецируется изображение звезд, отображаемых на ЖК-мониторе, совершающих движение в соответствии с движением КА.

список литературы

Беляев Б.Б., Добрица Б.Т., Розин П.Е. Метод повышения точности оценки вектора состояния при управлении угловым движением космического аппарата в режиме стабилизации // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 5 (21). С. 11-15.

Беляев Б.Б., Тарасенко Н.В., Тарасенко П.А. Способ прецизионного наведения космического ультрафиолетового телескопа // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 30-33.

Лобанов В.С., Тарасенко Н.В., Шульга Д.Н., Зборщенко В.Н. и др. Перспективные астроинерциальные системы управления астрофизических космических аппаратов // Гироскопия и навигация. 2013. № 3 (82). С. 73-84.

Статья поступила в редакцию 02.10.2014 г.

СИСТЕМА ДАТЧИКОВ ГИДА ТЕЛЕСКОПА Т-170М. РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНОЙ ОТРАБОТКИ

T-170M TELESCOPE FINE GUIDANCE SENSORS' SYSTEM. RESULTS OF GROUND VERIFICATION

Г.А. Аванесов¹,
профессор, доктор технических наук,
genrikh-avanesov@yandex.ru;
G.A. Avanesov

Е.В. Белинская¹,
evbelinskaya@yandex.ru;
E.V. Belinskaya

С.В. Воронков¹,
кандидат технических наук,
servor@nserv.iki.rssi.ru;
S.V. Voronkov

Н.А. Строилов¹,
n.stroilov@gmail.com;
N.A. Stroilov

И.Ю. Катасонов¹,
ikatasonov@gmail.com;
I.Yu. Katasonov

А.В. Никитин¹,
кандидат технических наук,
andvnik935@yandex.ru;
A.V. Nikitin

А.С. Шугаров²,
shugarov@inasan.ru;
A.S. Shugarov

Дано описание системы датчиков гида (СДГ) телескопа Т-170М. Рассмотрен состав СДГ, основные технические характеристики и режимы работы. Описаны лабораторные средства отладки программно-алгоритмического обеспечения. Приведены результаты наземной отработки СДГ в ИКИ РАН и на телескопе ЦЕЙСС-1000 САО РАН.

Ключевые слова: система датчиков гида; наведение; программно-алгоритмическое обеспечение; звездный каталог.

A description of T-170M telescope fine guidance sensors' system is presented. The fine guidance sensors' system composition is reviewed as well as main technical characteristics and operational modes. Laboratory aids for programs-and-algorithms debugging are described. The results of the fine guidance sensors' system ground verification at IKI RAN and on the telescope ZEISS-1000 by SAO RAN are overviewed.

Key words: fine guidance sensors' system; guidance; programming-algorithm assurance; star catalogue.

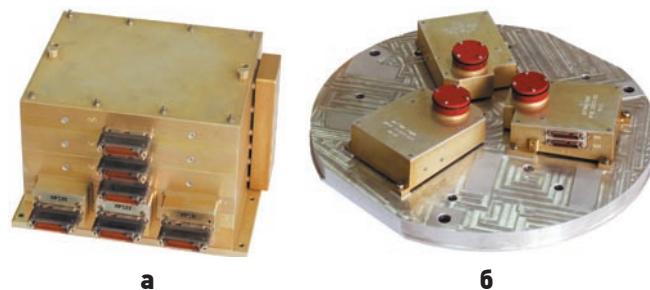
1. Общие сведения о СДГ

Системы наведения и гидирования являются важными частями любого телескопа. Они обеспечивают прецизионные измерения ориентации телескопа, при которой наблюдаемый объект находится в поле зрения научного прибора (спектрографа, камеры, сенсора или др.).

Институт космических исследований Российской Академии наук ведет разработку системы датчиков гида телескопа Т-170М, которая предназначена для решения задач точного наведения телескопа на объект наблюдения с точностью не хуже десятых долей угловой секунды (Чулков И.В., 2014).

Система датчиков гида включает в себя блок обработки данных (БОД) и три датчика гида (ДГ) (рисунок 1). Датчики монтируются в оптико-механическом отсеке под главным зеркалом телескопа, крепятся на корпусе блока спектрографов вблизи его входных диафрагм. БОД устанавливается на приборную панель внешнего расположения и соединяется кабелями с датчиками гида и системами космического аппарата.

Основные характеристики разрабатываемой СДГ перечислены в таблице 1.



а – блок обработки данных; **б** – три датчика гида, установленные на имитаторе посадочного места.

рисунок 1. Технологический образец СДГ

Основными функциональными режимами работы СДГ являются: «Локализация», «Передача изображения» и «Наведение» (Аванесов Г.А. и др., 2013).

Режим «Локализация» обеспечивает передачу в бортовой комплекс управления (БКУ) массива координат энергетических центров объектов на ПЗС-матрицах датчиков гида.

Режим «Передача изображения» осуществляет пересылку полученных с датчиков гида кадров с целью

¹ ФГБУН Институт космических исследований РАН, Россия, г. Москва.
Space Research Institute of RAN, Russia, Moscow.

² ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

таблица 1 – Основные характеристики СДГ

количество датчиков гида	3
энергопотребление, Вт:	
- при одном работающем ДГ	≤ 20
- при двух работающих ДГ	≤ 30
- при трех работающих ДГ	≤ 40
длина кабелей между БОД и ДГ, м	4
вероятность безотказной работы	$\geq 0,95$
срок службы, лет	10
рабочий диапазон угловых скоростей, град/с	$2 \cdot 10^{-5} \dots 10^{-4}$
точность определения углов отклонения:	
- вокруг оси перпендикулярной линии визирования (σ), угл. с	0,01
- вокруг линии визирования (σ), угл. с	5
единица младшего разряда, угл. с	0,005
частота обновления информации, Гц	0,5
поле зрения каждого ДГ, угл. мин	3×3
предельная регистрируемая звездная величина	+17
интерфейс обмена БОД-БКУ	МПИ ГОСТ Р 52070-2003

дальнейшей их трансляции на Землю через бортовой радиокомплекс.

Режим «Наведение» – основной режим работы СДГ – обеспечивает распознавание зарегистрированных изображений звезд, выдачу целеуказаний для совмещения направления на расчетную точку наведения с направлением на щель спектрографа или центр камер поля, слежение за перемещением гидируемых звезд в полях зрения ДГ и расчет параметров ориентации. Выходной информацией СДГ при работе в режиме «Наведение» являются три угла отклонения осей системы координат (СК) СДГ относительно требуемой ориентации во второй экваториальной системе координат (2ЭСК), а также параметры ориентации осей СК СДГ относительно осей 2ЭСК.

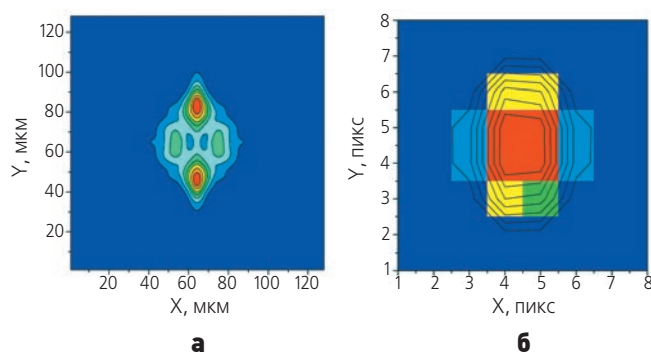
Работа датчиков гида осуществляется по группе звезд в оптическом диапазоне. В качестве приемников излучения СДГ используются ПЗС-матрицы «СФЕРА-1000». Изображения гидируемых звезд формируются оптикой телескопа без дополнительных оптических элементов. Число задействованных датчиков гида в текущем сеансе работы зависит от астрообстановки в области наблюдения и передается из БКУ в БОД перед началом работы СДГ.

2. Наземная отработка. Результаты математического моделирования

Одним из наиболее важных вопросов является качество изображений звезд на ПЗС-матрицах ДГ, которые будут получены при работе на космическом телескопе. С учетом малого размера поля зрения каждого ДГ и необходимости работать по всей не-

бесной сфере к СДГ предъявляются довольно жесткие требования по регистрации слабых звезд. Анализ звездной обстановки на разных галактических широтах показывает, что для выполнения своей целевой задачи СДГ должна быть способна регистрировать и обрабатывать звезды до 17-й звездной величины в полосе Ru (длина волны от 550 до 850 нм). В связи с этим одной из важных задач для разработчиков СДГ являлась оценка фотометрических характеристик СДГ, которая в силу отсутствия реальной оптической системы телескопа Т-170М, выполнялась путем математического моделирования и анализа результатов натурных съемок звезд на наземных телескопах.

В ходе работы было смоделировано четыре группы изображений: от простых звезд в виде трехмерных гауссиан второго порядка до сложных изображений, учитывающих аберрации оптической системы телескопа Т-170М, ошибки установки датчиков гида на посадочных местах и ошибки установки кристалла ПЗС-матрицы внутри корпуса датчика гида. Пример смоделированного изображения приведен на рисунке 2.



рисунки 2. Смоделированное изображение (а) и оцифрованное изображение звезды (б)

По смоделированным изображениям были получены оценки: качества изображений звезд на ПЗС-матрицах ДГ; влияния ошибок установки датчиков и ПЗС-матриц на качество изображений; влияния формы изображения звезды на точность определения координат ее энергетического центра и точность определения ориентации СДГ.

Анализ результатов моделирования показал, что допустимое отклонение ПЗС-матрицы датчика гида от номинального положения вдоль оптической оси (дефокусировка), при котором СДГ будет обеспечивать необходимую точность работы, составляет ± 150 мкм. При этом СДГ в составе телескопа Т-170М при времени экспонирования 1 секунда будет регистрировать звезды до 17-й звездной величины с отношением сигнал/шум не менее 25.

На основе результатов моделирования были оценены точностные характеристики СДГ, при анализе которых отдельно оценивалась погрешность определения ориентации СК СДГ относительно осей 2ЭСК (абсолютная ориентация) и погрешность определения изменения

углового положения СК СДГ на заданном интервале времени (относительная ориентация). В первом случае на результаты определения ориентации существенное влияние будут оказывать ошибки Мастер-каталога, обусловленные неточным знанием координат звезд в 2ЭСК. Во втором случае влияние таких ошибок будет исключено, так как СДГ не использует данные рабочих звездных каталогов при определении параметров относительного углового движения.

Другими факторами, влияющими на итоговую точность работы СДГ, являются: ошибки определения координат взвешенных центров изображений звезд на ПЗС, ошибки определения направления на звезду в СК СДГ, ошибки определения геометрических параметров СДГ, ошибки, связанные с неравномерностью чувствительности пикселей ПЗС-матрицы, нелинейностью АЦП и т.п.

Оценка указанных ошибок осуществлялась на основе результатов моделирования, натурных съемок звезд на наземных телескопах, с использованием анализа данных звездных датчиков семейства БОКЗ-М. При расчетах принималось, что в суммарном поле зрения СДГ находятся три звезды (в разных датчиках гида), а среднеквадратическая ошибка шума СДГ считалась равной 7 градациям АЦП ($43\epsilon^\circ$). Кроме того, оценивалась зависимость суммарной ошибки от звездной величины наблюдаемых звезд: рассматривался вариант работы СДГ по звездам 16-й звездной величины, и вариант работы по слабым звездам на пределе чувствительности СДГ – 17-й звездной величины.

Результаты расчетов ошибок определения параметров абсолютной и относительной ориентации СДГ приведены в таблице 2.

Согласно техническому заданию на СДГ, при наличии в полях зрения работающих ДГ не менее трех звезд до 16-й звездной величины ошибка определения углов отклонения не должна превышать 0,01 угл. с вокруг осей ОХ, ОУ (σ_{xy}) и 5 угл. с вокруг оси ОZ (σ_z) СК СДГ. Как следует из полученных результатов, это требование выполняется в случае определения углов отклонения текущего положения собственной системы координат от ее предыдущего положения. При определении параметров абсолютной ориентации СК СДГ ошибки будут возрастать за счет влияния ошибок Мастер-каталога. Приведенные в таблице 2 значения ошибок рассчитаны исходя из предположения, что в среднем по небесной сфере ошибки Мастер-каталога составят не более 0,1 угл. с. Вопрос о достижимой точности знания координат каталожных звезд остается открытым и требует участия специалистов ИНАСАН.

3. Наземная отработка.
Результаты экспериментов

Важным аспектом является проведение наземной отработки СДГ с целью отладки ее программно-алгоритмического обеспечения. Для этого используются специально разработанные стендовые комплексы либо выполняются натурные съемки звездного неба.

Традиционно в ИКИ РАН для задач автономных проверок оптикоэлектронных приборов используются статические имитаторы и динамические стенды (Воронков С.В. и др., 2011). Для СДГ были разработаны имитаторы звездного неба (ИЗН-ДГ) (рисунок 3), позволяющие имитировать в поле зрения каждого датчика изображения от одного до четырех точечных источников.



рисунок 3. Датчик гида с установленным на него ИЗН-ДГ

ИЗН ДГ выполняет роль защитной крышки датчика гида, предохраняя ПЗС-матрицу и электронику ДГ от загрязнений. Кроме того, с использованием ИЗН ДГ проводят проверки оптического тракта датчика гида и проверки функционирования СДГ в процессе автономной отработки в ИКИ РАН, а также при комплексных испытаниях в НПОЛ.

Другим средством для проведения автономной отладки программного обеспечения СДГ является стенд динамических испытаний (рисунок 4).

Стенд построен на базе планшетного компьютера с экраном высокого разрешения. Разработанное в ИКИ РАН программное обеспечение позволяет моделировать на экране участки небесной сферы и перемещать их по заданному закону. При этом используются реальные звездные каталоги, представляющие собой выборку из Мастер-каталога. Датчики гида установлены на имитаторе посадочного места в фо-

таблица 2 – Суммарные ошибки определения ориентации СДГ

звездная величина	ошибки определения абсолютной ориентации, угл. с		ошибки определения относительной ориентации угл. с	
16	0,0567	16,086	0,009	2,580
17	0,057	16,155	0,010	2,977

кальной плоскости объектива, который используется вместо оптической системы телескопа для проецирования изображений звезд с экрана планшета на ПЗС-матрицы датчиков гида. Таким образом, на стенде имеется возможность моделирования полноценной работы СДГ в условиях, близких к реальным, что позволяет разработчикам СДГ отлаживать программно-алгоритмическое обеспечение.

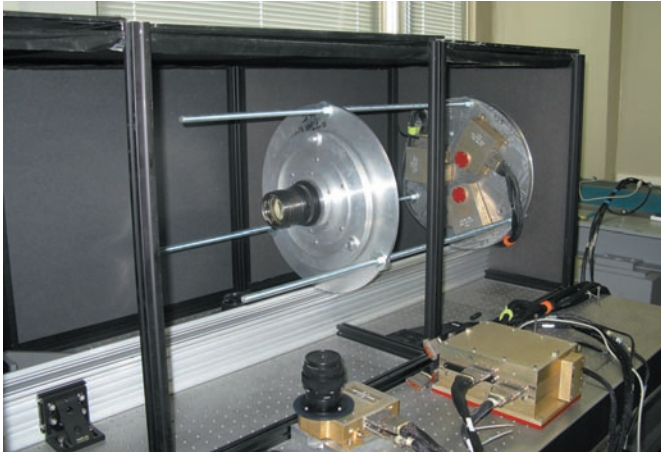


рисунок 4. Отработка СДГ на стенде динамических испытаний

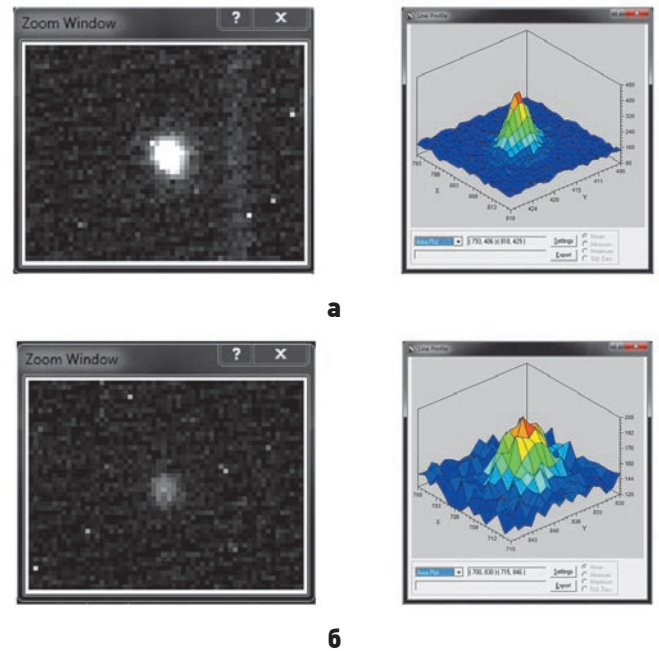
Тем не менее, полноценная проверка программно-алгоритмического обеспечения невозможна без натурных испытаний. Как показала практика, наиболее подходящим вариантом является проведение съемок звезд на телескопе ЦЕЙСС-1000 Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН. Указанный телескоп имеет оптическую схему, аналогичную схеме телескопа Т-170М, и близкие значения диаметра зеркала и фокусного расстояния. В ходе экспериментальных работ на телескопе с технологическим образцом СДГ в 2012 и 2014 гг. (рисунок 5) ставились задачи оценки фотометрических характеристик СДГ, отработки программно-алгоритмического обеспечения и процедуры калибровки СДГ.

Оценка фотометрических характеристик СДГ проводилась путем регистрации звезд различной яркости, их отождествления в звездном каталоге и сравнения измеренных интегральных яркостей изображений звезд на кадрах ДГ с теоретически рассчитанными значениями.

При фокусировке телескопа анализировалась форма изображения звезды на ПЗС-матрице ДГ и контролировалось значение ширины на полувысоте (FWHM). На рисунке 6 приведены примеры изображений звезд, полученные при оптимальной фокусировке при времени экспонирования 10 секунд. Указанное время экспонирования было выбрано исходя из требований наблюдения звезд до 16–17-й звездных величин при обеспечении отношения сигнал/шум не менее 15.



рисунок 5. Технологический образец СДГ на телескопе ЦЕЙСС-1000



а – Звезда $m=15,1$; $C/Ш=64$; $FWHM=5,0$ пикселей (1,3 угл. с);
б – Звезда $m=16,7$; $C/Ш=15$; $FWHM=4,5$ пикселя (1,1 угл. с).

рисунок 6. Примеры изображений звезд на ПЗС-матрицах ДГ

Из рисунка 6 видно, что достигнутые значения FWHM звезд не превышают 1,5 угл. с. Для примера, на телескопе Т-170М ожидаемое значение FWHM составит около 0,7 угл. с. Анализ интегральных яркостей изображений звезд, зарегистрированных ДГ, показывает, что в космосе при отсутствии атмосферы СДГ на телескопе с диаметром зеркала 170 см будет

уверенно регистрировать звезды до 17–18-й звездной величины при времени экспонирования 1 секунда.

В процессе отработки программно-алгоритмического обеспечения СДГ на телескопе ЦЕЙСС-1000 ставились задачи проверки работоспособности СДГ в режиме «Наведение». Реализация этого режима требует проведения предварительных калибровочных работ, основной целью которых является формирование системы координат СДГ. При этом происходит определение пространственного положения плоскостей трех ПЗС-матриц датчиков гида относительно друг друга и относительно задней узловой точки телескопа. Калибровка выполняется по богатым участкам звездного неба путем обработки изображений, полученных с каждого датчика гида при стабилизации телескопа. Изображения передаются в БКУ (или в контрольно-испытательную аппаратуру при наземных экспериментах), где выполняется их обработка с помощью специального программного обеспечения.

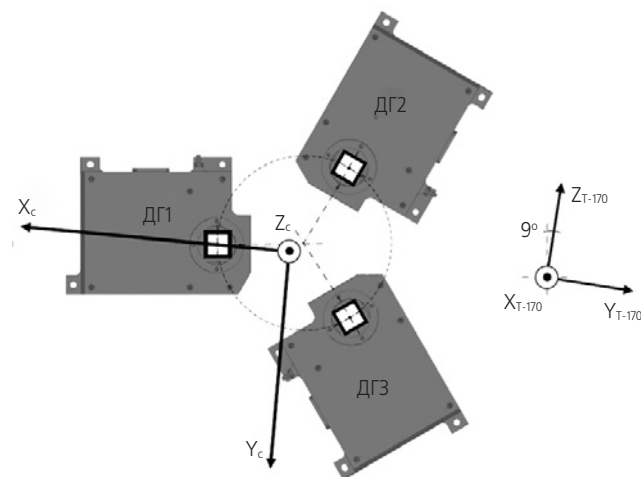


рисунок 7. Система координат СДГ

Система координат СДГ (рисунок 7) определяется следующим образом. Начало СК СДГ лежит в точке пересечения перпендикуляра, опущенного из задней узловой точки оптической системы телескопа на плоскость, проходящую через центры ПЗС-матриц трех ДГ. Ось $O_c Z_c$ направлена по нормали к плоскости, проходящей через центры ПЗС-матриц трех ДГ в сторону задней узловой точки оптической системы телескопа. Ось $O_c X_c$ направлена из основания перпендикуляра к центру матрицы ДГ № 1. Ось $O_c Y_c$ дополняет систему координат до правой.

Для проведения калибровки требуется навести телескоп на заранее выбранный участок неба с большим количеством звезд и стабилизировать его. После этого необходимо получить в единый момент времени изображение с каждого датчика гида, отождествить локализованные на изображениях объекты в звездном каталоге и рассчитать параметры взаимной ориентации трех датчиков гида. В результате будут определены шестнадцать параметров, описывающих СК СДГ:

- координаты центров каждой ПЗС-матрицы ($(X_0, Y_0) \times 3$ ДГ);
- три угла наклона каждой ПЗС-матрицы ($(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z) \times 3$ ДГ);
- общее фокусное расстояние (f).

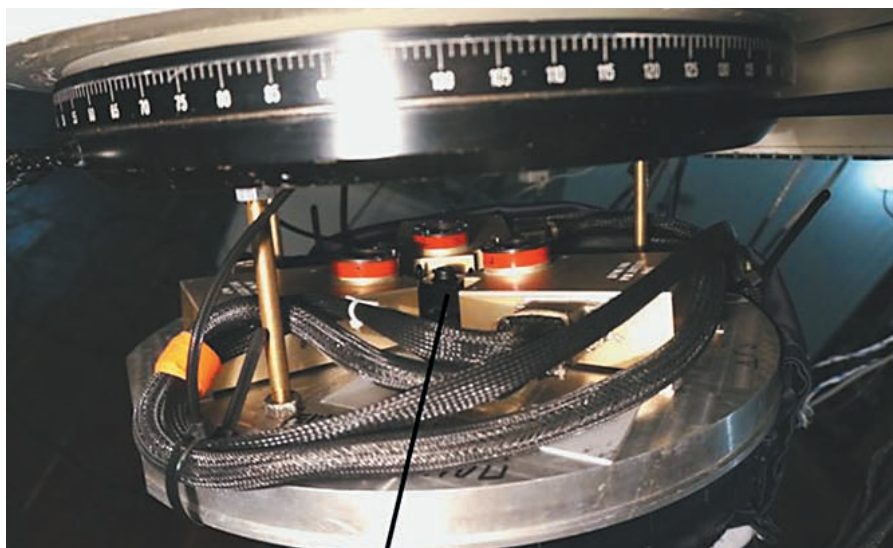
Рассчитанные параметры должны быть переданы в БОД и будут использованы программным обеспечением СДГ при штатной работе в режиме «Наведение». Калибровка СДГ должна обязательно выполняться на первом этапе полета, а также периодически в процессе функционирования телескопа в космосе.

При проведении эксперимента на телескопе ЦЕЙСС-1000 была отработана процедура калибровки, по результатам которой сформулированы основные требования к условиям проведения калибровки в космосе:

- калибровка должна проводиться, когда в полях зрения ДГ находятся звезды со звездными величинами от 13 до 16;
- минимально необходимое число звезд в поле зрения каждого ДГ – 4;
- максимально допустимое число звезд в поле зрения каждого ДГ – 35;
- звезды должны быть по возможности равномерно распределены в полях зрения ДГ.

Режим «Наведение» включает в себя подрежимы «Отождествление» и «Слежение». В подрежиме «Отождествление» СДГ проводит экспонирование всеми задействованными датчиками гида, считывание кадров размером 1024×1024 , локализацию звездоподобных объектов на кадрах. Одновременно с этим СДГ автоматически принимает вторые кадры с каждого ДГ и повторяет процедуру их обработки. На следующем шаге выполняется сравнение координат объектов на первом и втором кадре каждого датчика гида с целью отсеивания помех и определения тех объектов, которые могут являться звездами. Координаты таких объектов пересчитываются в СК СДГ с использованием результатов калибровки и поступают на вход процедуры отождествления в рабочем звездном каталоге. При удачном отождествлении рассчитываются параметры ориентации СК СДГ относительно осей 2ЭСК, а также углы отклонения осей СК СДГ от требуемого направления. Время нахождения СДГ в подрежиме «Отождествление» может достигать 12–15 секунд в случае использования трех датчиков гида.

После успешного завершения подрежима «Отождествление» СДГ автоматически переходит в подрежим «Слежение», находясь в котором осуществляет экспонирование работающими ДГ, построчное считывание и обработку «фрагментов» – элементов на ПЗС-матрице, расположенных вокруг прогнозируемых положений гидрируемых звезд (звезд, которые были распознаны в звездном каталоге). Уточнение параметров углового положения СК СДГ относительно предыдущего положения осуществляется пу-



имитатор научного прибора



изображение с имитатора научного прибора

рисунок 8. Отработка процедуры наведения телескопа ЦЕЙСС-1000 на объект наблюдения по информации от СДГ

тем сравнения координат одних и тех же гидируемых звезд на соседних кадрах. Обновление информации об угловом положении СК СДГ в подрежиме «Слежение» происходит один раз в две секунды.

При эксперименте на телескопе ЦЕЙСС-1000 был отработан режим «Наведение» и подтверждена работоспособность СДГ в следующих условиях:

- по разному количеству гидируемых звезд. В частности, было показано, что СДГ способна определять параметры ориентации при наличии в поле зрения каждого из трех работающих ДГ одной звезды;
- по разному числу используемых ДГ;
- при работе в режиме стабилизации (когда телескоп находился в режиме часового ведения), а также при работе с угловыми скоростями до 0,25 угл. с/с.

Для отработки процедуры наведения телескопа по информации, получаемой от СДГ, использовалась камера SONY коммерческого назначения в качестве имитатора научного прибора (рисунок 8). При этом выполнялся следующий порядок действий:

- телескоп наводился в некую область небесной сферы таким образом, чтобы в центре камеры регистрировалась яркая звезда;
- СДГ определяла параметры ориентации СК СДГ относительно 2ЭСК; полученные данные сравнивались с углами, по которым был наведен телескоп. Таким образом, осуществлялась привязка СК телескопа к СК СДГ;
- выбиралась яркая звезда в другой части небесной сферы, ее координаты задавались в качестве координат расчетной точки наведения для СДГ;
- осуществлялась переориентация телескопа на выбранную звезду, СДГ определяла параметры ориентации и рассчитывала отклонения от требуемого направления;

- на основе указанных данных выполнялся дополнительный поворот телескопа и регистрировалось изображение с камеры. Подтверждением окончания процедуры наведения являлось изображение, полученное с камеры (см. правую часть рисунка 8).

В результате проведенных работ были подтверждены основные технические характеристики СДГ. Разработанное и отлаженное программно-алгоритмическое обеспечение используется в образце СДГ для КДИ при проведении конструкторско-доводочных испытаний.

Изготовление летного образца СДГ и проведение его ПСИ запланировано на 2015 год.

список литературы

Аванесов Г.А., Белинская Е.В., Воронков С.В., Строилов Н.А. и др. Использование системы датчиков гида в задачах наведения и стабилизации телескопа Т-170М проекта «СПЕКТР-УФ» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. № 4. С. 16-23.

Воронков С.В., Дунаев Б.С., Никитин А.В., Шамис В.А. Средства наземной отладки астроприборов в составе комплексных стендов: сб. трудов 3-й Всероссийской конференции «Современные проблемы ориентации и навигации космических аппаратов», 13–16 сентября 2010, Россия, Таруса / Под ред. Г.А. Аванесова. М.: ИКИ РАН. 2011. С. 207-214.

Чулков И.В., Ануфрейчик К.В., Коновалов А.А., Тимонин Д.Г. и др. Служебный комплекс телескопа Т-170М // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 104-107.

Статья поступила в редакцию 02.10.2014 г.

ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ для ПУБЛИКАЦИИ в ЖУРНАЛЕ

1. К публикации в журнале «Вестник «НПО им. С.А. Лавочкина» принимаются статьи, отвечающие критериям ВАК РФ по научной новизне и апробации представленных результатов натурными экспериментами (испытаниями), летной эксплуатацией или патентами на изобретения (полезные модели).

2. Статьи из других организаций направляются в адрес ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» с сопроводительным письмом на имя генерального директора. К статье необходимо приложить оформленный акт экспертизы, заключение комиссии по экспортному контролю и рецензию.

3. Между авторами статей и редакцией журнала заключается лицензионный договор о передаче неисключительных прав.

4. Статья должна быть подписана всеми авторами. Объем статьи не должен превышать 15 страниц текста и 8 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы.

5. Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным в следующей последовательности:

- индекс УДК (слева);
- инициалы и фамилии авторов, ученое звание и ученая степень каждого из авторов, должность, место работы (полное название организации, страна, город), контактная информация (e-mail), название статьи, краткая аннотация (5–7 строк), ключевые слова (5–6 слов) на русском языке и на английском языке;
- основной текст;
- список литературы.

6. Рукопись статьи предоставляется в одном экземпляре, напечатанном на принтере на одной стороне стандартного листа формата **A4**.

7. Набирать текст необходимо в **MS Word 2003**, используя стандартные шрифты **Times New Roman**, размер – **14**, интервал – **полтора**. Поля со всех сторон – **25 мм**.

8. Для набора формул следует использовать встроенный редактор формул **Microsoft Equation 3.0**. Формулы набираются **латинским** алфавитом, размер шрифта **11**. Нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

9. Все используемые буквенные обозначения и аббревиатуры должны быть расшифрованы. Размерность величин должна соответствовать системе СИ.

10. Элементы списка литературы должны содержать фамилии и инициалы авторов, полное название работы. Для книг указывается место издания, издательство, год издания, количество страниц. Для статей – название журнала или сборника, год выпуска, том, номер, номера первой и последней страниц.

11. Рисунки и графики оформляются в **цветном** изображении, должны быть четкими и не требовать перерисовки. Шрифт текста в иллюстративном материале **Arial Reg**, со **строчных букв** (кроме названий и имен).

12. Таблицы должны быть пронумерованы, иметь краткое наименование, межстрочный интервал в наименовании таблицы одинарный, выравнивание по ширине страницы. Текст в таблице печатается со строчных букв, без полужирного начертания.

13. К статье следует приложить диск с файлами:

- сформированной статьи;
- рисунков, графиков (выполняются в форматах **jpeg** или **tiff** с разрешением не менее 300 dpi и размером не более формата A4);
- фотографий авторов (размер фотографий не менее 10×15);
- сведений об авторах.

В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), ученое звание, ученую степень, аспирант или соискатель ученой степени, домашний и рабочий телефоны (с кодом города), мобильный (предпочтительней), адрес электронной почты.

Консультации по правильному оформлению подаваемых материалов Вы можете получить у сотрудников редакции по тел.: 8 (495) 575-55-63.

издатель

ОРДЕНА ЛЕНИНА, ДВАЖДЫ ОРДЕНОВ ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФГУП «НПО имени С.А. ЛАВОЧКИНА»

редактор В.В. Ефанов

технический редактор А.В. Савченко

корректоры М.С. Винниченко, Н.В. Пригородова

верстка А.Ю. Титова

художественное оформление журнала, обложек, оригинал-макета –
«НПОЛ – ГРАФИК ДИЗАЙН»

подписано в печать 20.11.2014. формат 60×84/8.

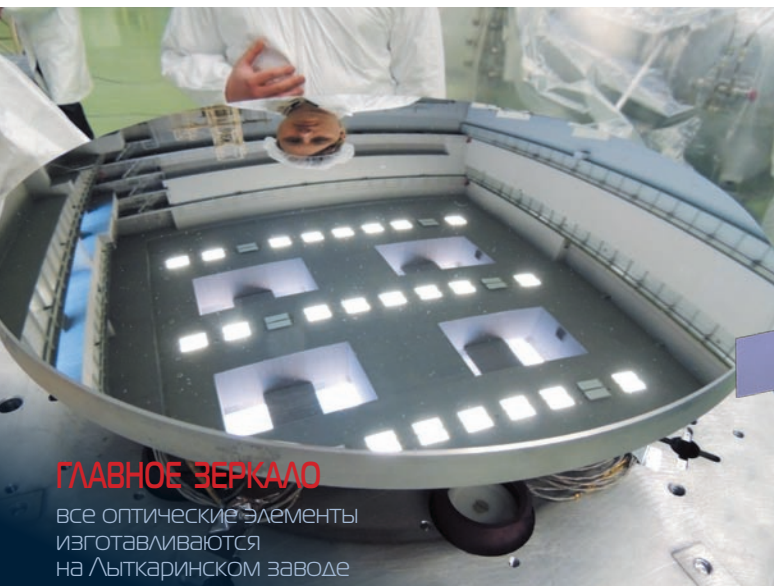
бумага офсетная. печать офсетная. объем 14 печ. л. тираж 700 экз.

отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Полстар» (МАИ),
Волоколамское ш., д. 4, Москва А-80, ГСП-3, 125993

расширенное заседание
научно-технического совета
научно-производственного объединения
имени С.А. Лавочкина
18 ноября 2014 года

100 лет со дня рождения
главного конструктора автоматических
космических аппаратов
для фундаментальных научных исследований
Луны и планет Солнечной системы
Георгия Николаевича Бабакина





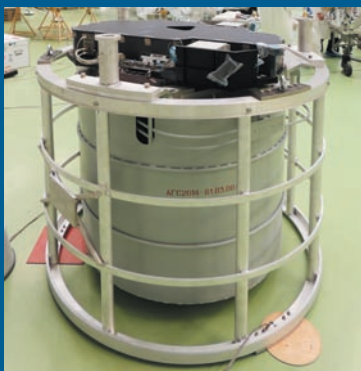
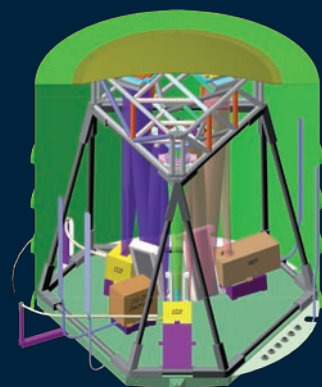
ГЛАВНОЕ ЗЕРКАЛО

все оптические элементы изготавливаются на Лыткаринском заводе

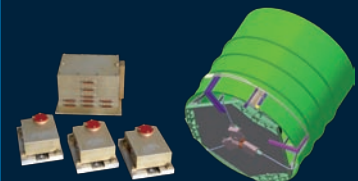
БЛОК СПЕКТРОГРАФОВ

включает три канала:

- два эшелюных спектрографа высокого разрешения, охватывающего диапазоны ультрафиолета 110–176 нм и 174–310 нм
- спектрограф с длинной щелью, работающий в диапазоне 110–310 нм с низким спектральным разрешением и пространственным разрешением 1 угл. с.



ДАТЧИКИ ГИДА

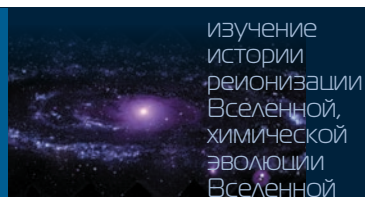


система датчиков предназначена для обеспечения точного наведения и стабилизации телескопа (0,03 угл. с.) на исследуемый объект



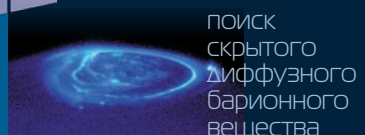
КОСМИЧЕСКИЙ ТЕЛЕСКОП Т-170М

создается в России



изучение истории реионизации Вселенной, химической эволюции Вселенной

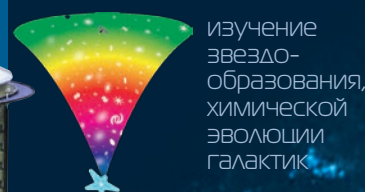
БАЗОВАЯ НАУЧНАЯ ПРОГРАММА



поиск скрытого диффузного барионного вещества



изучение перетекания вещества в тесных двойных звездах



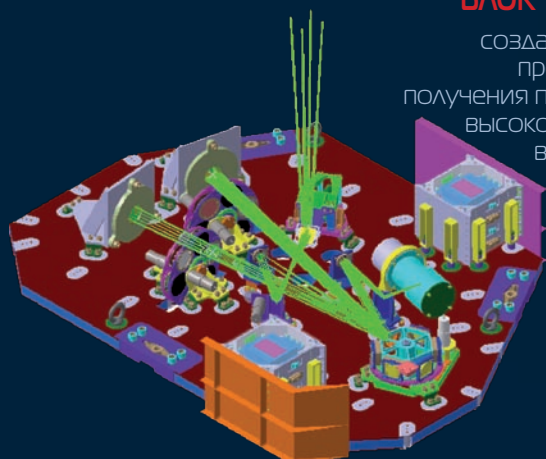
изучение звездообразования, химической эволюции галактик

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

- оптическая схема Ричи – Кретьена
- диаметр главного зеркала – 170 см
- фокусное расстояние – 1700 см
- поле зрения – 30 угл. мин

БЛОК КАМЕР ПОЛЯ

создается в Испании
предназначен для получения прямых снимков высокого разрешения в УФ-диапазоне и полевой бесшелевой спектроскопии низкого разрешения



НАУЧНАЯ АППАРАТУРА «КОНУС-УФ»

предназначена для исследования космических гамма-всплесков и активности мягких гамма-репитеров в энергетическом диапазоне от 10 кэВ до 10 мэВ