

**5 ЛЕТ****УСПЕШНОЙ НАУЧНОЙ РАБОТЫ  
ОРБИТАЛЬНОЙ АСТРОФИЗИЧЕСКОЙ  
ОБСЕРВАТОРИИ  
СПЕКТР-Р – РАДИОАСТРОН**

18 июля этого года в НПО имени С.А. Лавочкина, создавшем обсерваторию «СПЕКТР-Р», было проведено открытое заседание научно-технического совета.

Присутствовали учёные, инженеры, специалисты, причастные к реализации этого уникального проекта, и молодые сотрудники предприятия.

200 000 км.  
проекция КРТ-Гаркс (Австралия)  
200 000 км.  
**Радиоастрон и ГБТ (США)**  
Волна 1.3 см, пр. базы  
земных диаметров  
Ядро <14 мкс или 1.2 км  
Интенсивность ядра  
 $>3 \times 10^{13}$  К.

Заседание открыл исполняющий обязанности генерального директора НПО имени С.А. Лавочкина  
Сергей Антонович Лемешевский.

Поздравление генерального директора Государственной корпорации РОСКОСМОС зачитал её представитель Виктор Владимирович Ворон.

Об основных научных результатах исследования Вселенной космической обсерватории «РАДИОАСТРОН» прочитал лекцию научный руководитель проекта академик РАН

Николай Семёнович Кардашев.

С докладами также выступили  
Георгий Наумович Застенкер (ИКИ РАН) –

об основных результатах эксперимента ПЛАЗМА-Ф, проведённого на «РАДИОАСТРОНЕ»; Григорий Симонович Заславский (ИПМ имени М.В. Келдыша РАН) – о маневрировании КА «СПЕКТР-Р»;

Руслан Владимирович Комаев (НПО имени С.А. Лавочкина) – о создании космического радиотелескопа.

По завершении заседания его участники обменялись впечатлениями и планами на будущие проектные работы.



# КОСМОНАВТИКА И РАКЕТОСТРОЕНИЕ

**ВЕСТНИК**  
НПО имени С.А. ЛАВОЧКИНА  
2016 № 3 (33)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Редакционная статья.</b>	3
<b>Кардашев Н.С., Алакоз А.В. и др.</b>	
«РАДИОАСТРОН»: итоги выполнения научной программы исследований за 5 лет полёта .....	4
<b>Заславский Г.С., Захваткин М.В., Степаньянц В.А.,</b>	
Тучин А.Г., Шишов В.А.	
Баллистико-навигационное обеспечение управления полётом КА и выполнения научной программы проекта «РАДИОАСТРОН». 5 лет полёта.....	25
<b>Расторгуев А.С., Сачков М.Е., Заболотских М.В.</b>	
Галактическая астрономия в ультрафиолете .....	38
<b>Вибе Д.З.</b>	
Проблемы звездообразования по наблюдательным данным в УФ .....	47
<b>Макарова Л.Н., Макаров Д.И.</b>	
Перспективы проекта «ВКО-УФ» для задач звездообразования в карликовых галактиках .....	52
<b>Панчук В.Е., Клочкова В.Г., Сачков М.Е.</b>	
Экспериментальная спектроскопия в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра .....	60
<b>Сачков М.Е., Малков О.Ю.</b>	
Ультрафиолетовые астрономические ресурсы в Сети Интернет.....	67
<b>Ефанов В.В., Мартынов М.Б., Карчаев Х.Ж.</b>	
О научном потенциале НПО имени Семёна Алексеевича Лавочкина .....	73
<b>Мартынов М.Б., Меркулов П.В., Ломакин И.В., Вятлев П.А.,</b>	
<b>Платов И.В., Леун Е.В., Насыров А.Ф.</b>	
Перспективный российский проект «ЛАПЛАС-П» для исследований планетной системы Юпитера. Разработка проектных обликов космических аппаратов .....	77
<b>Казмерчук П.В.</b>	
Метод линеаризации в задачах оптимизации траекторий КА с малой тягой. Вычислительные аспекты .....	83
<b>Барабанов А.А., Милюков В.К., Москатиньев И.В.,</b>	
<b>Нестерин И.М., Сысоев В.К., Юдин А.Д.</b>	
Релятивистский гравитационный эксперимент на околоземной орбите: концепция, технология и конфигурация космической группировки .....	89
<b>Лаптев М.Ю., Ли Е.К., Нетребенко Р.В., Чулин А.Н.</b>	
Оценка погрешности ориентации и стабилизации космического аппарата на различных участках орбиты по результатам лётных испытаний .....	96
<b>Ерофеев А.И., Никифоров А.П., Попов Г.А., Суворов М.О.,</b>	
<b>Сырин С.А., Хартов С.А.</b>	
Разработка воздушного прямоточного электрореактивного двигателя для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов .....	104
<b>Загарских В.И., Кузин Е.Н., Ефанов В.В.</b>	
Детонационное предохранительно-пусковое устройство .....	111
<b>Кузнецов Д.А., Телепнев П.П., Ермаков В.Ю.</b>	
Подход к решению вопроса по прогнозу уровней возмущений для электромаховических исполнительных органов .....	116

### 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.laspace.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@LASPACE.RU

адрес в Интернете: <http://WWW.VESTNIK.LASPACE.RU>

главный редактор –

к.э.н. **С.А. Лемешевский**

заместитель главного редактора –

д.т.н., профессор **В.В. Ефанов**

### редакционная коллегия

чл. СХ СССР, России **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. Мошев**

д.т.н. **А.Е. Назаров**

д.т.н., профессор **К.М. Пичхадзе**

**А.В. Савченко**

### редакционный совет

председатель

к.э.н. **С.А. Лемешевский**

чл.-корр. РАН **О.М. Алифанов**

д.ф.-м.н., профессор **В.В. Асмус**

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**

академик **О.Г. Пенязьков**

НАН Беларуси **Г.А. Попов**

академик РАН **В.Е. Усачев**

д.т.н., профессор **В.С. Финченко**

д.т.н., профессор **В.В. Хартов**

д.т.н., профессор **Е.Н. Хохлачев**

чл.-корр. РАН **Б.М. Шустов**

академик **Я.С. Яцкiv**

журнал является  
рецензируемым изданием

### УЧРЕДИТЕЛЬ

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



16003

9 772075 694002 >

*chief editor –*
*c.sc. (ec.)*
**S.A. Lemeshevskiy**
*deputy chief editor –*
*d.eng., professor*
**V.V. Efanov**
**editorial board**
*member of*
*UA USSR, URA*
*d.eng.*
*c.sc. (ec.)*
*c.sc. (eng.)*
*c.sc. (eng.)*
*d.eng.*
*d.eng., professor*
**V.M. Davydov**
**K.A. Zanin**
**K.Z. Karchayev**
**M.B. Martynov**
**A.A. Moisheev**
**A.E. Nazarov**
**K.M. Pichkhadze**
**A.V. Savchenko**
**editorial council**
*chairman –*
*c.sc. (ec.)*
**S.A. Lemeshevskiy**
*corresponding*
*member RAN*
*doctor of physical and mathematical*
*sciences, professor*
*d.eng., professor*
*academician RAN*
*corresponding*
*member ANRT*
*d.eng., professor*
*academician RAN*
*d.eng., professor*
*d.eng., professor*
*academician NASB*
*academician RAN*
*d.eng., professor*
*d.eng.*
*d.eng., professor*
*d.eng., professor*
*corresponding*
*member RAN*
*academician NASU*
**O.M. Alifanov**
**V.V. Asmus**
**B.I. Glazov**
**L.M. Zelenyi**
**H.I. Ibadinov**
**A.A. Lyubomudrov**
**M.Y. Marov**
**Y.A. Matveev**
**V.Y. Meleshko**
**O.G. Penyazkov**
**G.A. Popov**
**V.E. Usachov**
**V.S. Finchenko**
**V.V. Khartov**
**E.N. Khokhlachev**
**B.M. Shustov**
**Ya.S. Yatskiv**
**t a b l e o f c o n t e n t s**

<b>Editorial article</b>	3
<b>Kardashev N.S., Alakoz A.V. et al</b>	
«RADIOASTRON» five years after launch: main science results	4
<b>Zaslavskiy G.S., Zakhvatkin M.V., Stepanyants V.A., Tuchin A.G., Shishov V.A.</b>	
Ballistics-navigation support of the spacecraft flight control and implementation of «RADIOASTRON» program scientific program. 5 years of flight	25
<b>Rastorguev A.S., Sachkov M.E., Zabolotskikh M.V.</b>	
Galactic Astronomy in UV	38
<b>Wiebe D.S.</b>	
Observations in UV band and problems of star formation studies	47
<b>Makarova L.N., Makarov D.I.</b>	
Prospects of the «WSO-UV» project for study of a star formation in nearby dwarf Galaxies	52
<b>Panchuk V.E., Klochkova V.G., Sachkov M.E.</b>	
Experimental UV-spectroscopy	60
<b>Sachkov M.E., Malkov O.Yu.</b>	
Web-resources for astronomical data in the ultraviolet	67
<b>Efanov V.V., Martynov M.B., Karchaev Kh.Zh.</b>	
About the scientific potential of Science and Production Association named after Semeon A. Lavochkin	73
<b>Martynov M.B., Merkulov P.V., Lomakin I.V., Vyatlev P.A., Platov I.V., Leun E.V., Nasryrov A.F.</b>	
«LAPLACE-P» an advanced Russian project aimed at Jupiter planetary system research. Development of spacecraft conceptual design	77
<b>Kazmerchuk P.V.</b>	
The Method of Linearization in optimization problems of low thrust spacecraft trajectories. Computational aspects	83
<b>Barabanov A.A., Milyukov V.K., Moskatiniev I.V., Nesterin I.M., Sysoev V.K., Yudin A.D.</b>	
Relativistic gravitational experiment in the Earth orbit: concept, technology and configuration of satellite constellation	89
<b>Laptev M.Yu., Li E.K., Netrebenko R.V., Chulin A.N.</b>	
Spacecraft attitude errors estimation by flight-test results in different flight phases	96
<b>Erofeev A.I., Nikiforov A.P., Popov G.A., Suvorov M.O., Syrin S.A., Khartov S.A.</b>	
Development of Air-Electrorocket Ramjet for Compensating of Low-Orbit Spacecrafts Aerodynamic Drag	104
<b>Zagarskih V.I., Kuzin E.N., Efanov V.V.</b>	
Detonating fuse-triggering device	111
<b>Kuznetsov D.A., Telepnev P.P., Ermakov V.Yu.</b>	
The approach to the issue of predicted perturbation levels for electric flywheel electric actuators	116

**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.laspace.ru>
- subscription index 37156 in catalogue «GAZETY I JOURNALY» (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@LASPACE.RU](mailto:VESTNIK@LASPACE.RU)

internet: <http://WWW.VESTNIK.LASPACE.RU>
**the journal is a reviewed publication**
**f o u n d e r**

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

## **Редакционная статья**

С незапамятных времён людей интересовал состав Вселенной, расположение звёзд и планет на небе, природа комет. Много столетий назад сооружались на Земле огромные астрономические оптические инструменты для наблюдения планет и Солнца. В середине XX века к оптической астрономии добавились инфракрасная, ультрафиолетовая, рентгеновская, гамма- и радиоастрономия. Возможности астрономической науки расширились при выходе исследовательской аппаратуры за пределы земной атмосферы. Первые внеатмосферные астрономические исследования были проведены в 1950-х годах с аэростатов, поднятых на высоту 20–40 км, что позволило ослабить влияние атмосферы на проведение наблюдений небесных объектов в более широком спектральном диапазоне (УФ и ИК).

Но истинно качественный скачок был совершен при выходе в космос. В нашей стране первый этап астрономических наблюдений выполнен на орбитальной станции «САЛЮТ» в июне 1971 года Г.Т. Добровольским, В.Н. Волковым и В.И. Пацаевым.

По длительности и результативности работы оптимальными являются автоматические космические обсерватории. Впервые в отечественной практике они были созданы в НПО имени С.А. Лавочкина – космическая обсерватория «АСТРОН»: в период 1983–1989 гг. – успешная работа в ультрафиолетовом спектре; «ГРАНАТ»: в период 1989–1998 г. – научные исследования в рентгеновском и гамма-диапазонах электромагнитного излучения.

Началом нового этапа развития национальной внеатмосферной астрономии является создание на предприятии космических обсерваторий серии «СПЕКТР». 18 июля 2011 года с космодрома Байконур была запущена радиоастрономическая обсерватория «СПЕКТР-Р – РАДИОАСТРОН» ракетой-носителем «ЗЕНИТ» с межорбитальным баксиром «ФРЕГАТ-СБ».

По этому проекту в НПО имени С.А. Лавочкина, помимо орбитальной платформы, создан и уникальный космический радиотелескоп с самой большой высокопрецизионной антенной, который обладает рекордными чувствительностью и угловым разрешением ( $3 \times 10^{-5}$  угловых секунд). Такое разрешение реализуется благодаря созданию интерферометра со сверхдлинной базой (350000 км) Земля – Космос. В результате наблюдений выявились многие интересные объекты: ядра активных галактик; нейтронные звёзды; области звездообразования и др.

В миссии «СПЕКТР-Р» осуществлён также весьма интересный плазменно-магнитный эксперимент. Его цель – непрерывное мониторирование параметров плазмы и энергичных частиц межпланетной среды (часть «космической погоды») и изучение высокочастотной турбулентности этих параметров путём измерений с уникально высоким временным разрешением. Важно отметить, что высокоапогейная орбита этого спутника даёт возможность для проведения длительных (семь суток) систематических измерений в межпланетной среде.

По Федеральной космической программе-2025 на предприятии создаются ещё две орбитальные астрофизические обсерватории. В 2017 году готовится к запуску в точку Лагранжа L2 (впервые в России) «СПЕКТР-РГ» с двумя рентгеновскими телескопами – российским ART-XC и немецким eRosita. Будут проведены обзор неба в режиме сканирования с высокими чувствительностью, угловым и энергетическим разрешением в рентгеновском диапазоне длин волн, детальные исследования в режиме трёхосной стабилизации отдельных отобранных областей неба и новых источников в рентгеновском диапазоне. «СПЕКТР-РГ» придёт на смену международной космической обсерватории «ИНТЕГРАЛ».

В среднесрочной перспективе – создание Всемирной космической обсерватории «УЛЬТРАФИОЛЕТ» – «СПЕКТР-УФ». В этом проекте наземный научный комплекс и наземный сегмент управления создаются совместно Россией и Испанией. Ультрафиолетовый телескоп разрабатывается Институтом астрономии РАН и НПО имени С.А. Лавочкина. Он предназначен для изучения различных объектов Вселенной в УФ-диапазоне спектра и станет единственным крупным инструментом для исследований в этом диапазоне длин волн после завершения работы телескопа имени Хаббла.

В настоящее время на предприятии ведётся также предпроектная проработка на отдалённую перспективу космических астрофизических обсерваторий «ГАММА-400» и «СПЕКТР-МИЛЛИМЕТРОН».

Описанные орбитальные обсерватории созданы в НПО имени С.А. Лавочкина на универсальной многофункциональной платформе «НАВИГАТОР», которая успешно работает в составе космических комплексов «СПЕКТР-Р», «ЭЛЕКТРО-Л» № 1, «ЭЛЕКТРО-Л» № 2 и является базовой для всех наших искусственных спутников Земли научного и социально-экономического назначения.

В ряде статей этого номера ведущими учёными представлены основные научные результаты астрофизических наблюдений «РАДИОАСТРОНА», а также приведены обоснования экспериментов планируемого аппарата «СПЕКТР-УФ».

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА

Н.С. Кардашев<sup>1</sup>,

N.S. Kardashev

В.Е. Бабышкин<sup>2</sup>,

V.E. Babyshkin

А.З. Воробьев<sup>2</sup>,

A.Z. Vorobyov

М. Джонсон<sup>9</sup>,

M. Johnson

А.П. Лобанов<sup>12</sup>,

A.P. Lobanov

А.С. Привезенцев<sup>2</sup>,

A.S. Privesenzev

А.М. Соболев<sup>16</sup>,

A.M. Sobolev

М.Е. Чурикова<sup>2</sup>,

M.E. Churikova

А.В. Алакоз<sup>1</sup>,

A.V. Alakoz

Н. Бартель<sup>4</sup>,

N. Bartel

К. Гвинн<sup>5</sup>,

C. Gwinn

Х. Имаи<sup>10</sup>,

H. Imai

В.А. Молодцов<sup>2</sup>,

V.A. Molodtsov

А.Г. Рудницкий<sup>1</sup>,

A.G. Rudnitski

В.А. Согласнов<sup>1</sup>,

V.A. Soglasnov

А.Е. Ширшаков<sup>2</sup>,

A.E. Shirshakov

А.С. Андрианов<sup>1</sup>,

A.S. Andrianov

О.С. Баяндина<sup>1</sup>,

O.S. Bayandina

Х.Л. Гомез<sup>6</sup>,

J.L. Gomez

Ю.Ю. Ковалев<sup>1</sup>,

Y.Y. Kovalev

Б.С. Новиков<sup>1</sup>,

B.S. Novikov

Г.М. Рудницкий<sup>13</sup>,

G.M. Rudnitski

К.В. Соколовский<sup>1</sup>,

K.V. Sokolovsky

В.И. Шишов<sup>15</sup>,

V.I. Shishov

М.И. Артюхов<sup>2</sup>,

M.I. Artyukhov

И.Е. Вальти<sup>1</sup>,

I.E. Val'tts

Г. Джованнини<sup>7</sup>,

G. Giovannini

С.Е. Куртц<sup>11</sup>,

S.E. Kurtz

А.В. Погодин<sup>2</sup>,

A.V. Pogodin

Т. Саволайнен<sup>14</sup>,

T. Savolainen

Е.Н. Филиппова<sup>2</sup>,

E.N. Filippova

Ф. Эдвардс<sup>17</sup>,

P. Edwards

В. Баан<sup>3</sup>,

W. Baan

П.А. Войцик<sup>1</sup>,

P.A. Voitsik

Д. Джонси<sup>8</sup>,

D. Jauncey

М.М. Лисаков<sup>1</sup>,

M.M. Lisakov

М.В. Попов<sup>1</sup>,

M.V. Popov

Т.И. Смирнова<sup>15</sup>,

T.I. Smirnova

В.В. Хартов<sup>2</sup>,

V.V. Khartov

<sup>1</sup> Астрокосмический центр Физического института имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Россия, г. Москва.

Astro Space Center of P.N. Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

<sup>2</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

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

<sup>3</sup> Нидерландский радиоастрономический институт «АСТРОН» (ASTRON), Нидерланды, г. Двингелюо.

Netherlands Institute for Radio Astronomy (ASTRON), Netherlands, Dwingeloo.

<sup>4</sup> Департамент физики и астрономии Йоркского университета, Канада, г. Торонто.

Department of Physics and Astronomy, York University, Canada, Toronto.

<sup>5</sup> Калифорнийский университет в Санта-Барбара, США, Калифорния, г. Санта-Барбара.

University of California at Santa Barbara, USA, CA, Santa Barbara.

<sup>6</sup> Институт Астрофизики Андалусии, Испанский национальный исследовательский совет, Испания, Гранада, г. Апартадо.

Instituto de Astrofísica de Andalucía, CSIC, Spain, Granada, Apartado.

<sup>7</sup> Отделение физики и астрономии Болонского университета, Италия, г. Болонья. Институт радиоастрономии, Италия, г. Болонья.

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università degli Studi di Bologna, Italy, Bologna. INAF-Osservatorio di Radioastronomia, Italy, Bologna.

<sup>8</sup> Государственное Объединение Научных и Прикладных Исследований (CSIRO), астрономия и космические науки, Австралия, г. Эппинг. Исследовательская школа астрономии и астрофизики, Австралийский национальный университет, Австралия, г. Канберра.

CSIRO Astronomy and Space Sciences, Australia, Epping. Research School of Astronomy and Astrophysics, Australian National University, Australia, Canberra.

<sup>9</sup> Гарвард-Смитсоновский центр астрофизики, США, Массачусетс, г. Кембридж.

Harvard Smithsonian Center for Astrophysics, USA, MA, Cambridge.

## «RADIOASTRON» FIVE YEARS AFTER LAUNCH: MAIN SCIENCE RESULTS

А.С. Андрианов<sup>1</sup>,

A.S. Andrianov

О.С. Баяндина<sup>1</sup>,

O.S. Bayandina

Х.Л.

Гомез<sup>6</sup>,

J.L.

Гомез

Ю.Ю.

Ковалев<sup>1</sup>,

Y.Y.

Ковалев

Б.С.

Новиков<sup>1</sup>,

B.S.

Новиков

<sup>10</sup> Высшая школа науки и техники университета Кацосимы, Япония, г. Кацосима.

Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, Japan, Kagoshima.

<sup>11</sup> Центр радиоастрономии и астрофизики Национального автономного университета Мексики, Мексика, г. Морелия.

Centro de Radioastronomía y Astrofísica Universidad Nacional Autónoma de México, México, Morelia.

<sup>12</sup> Институт радиоастрономии имени Макса Планка, Германия, г. Бонн. Институт экспериментальной физики, Университет Гамбурга, Германия, г. Гамбург.

Max-Planck-Institute for Radio Astronomy, Germany, Bonn. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Germany, Hamburg.

<sup>13</sup> Государственный астрономический институт имени П.К. Штернберга МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, г. Москва.

Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Russia, Moscow.

<sup>14</sup> Университет Аалто, Радиообсерватория Метсахови, Финляндия, г. Кульмала. Университет Аалто (бывший Хельсинкский университет технологии), Финляндия, Хельсинки. Институт радиоастрономии им. Макса Планка, Германия, г. Бонн.

Aalto University Metsähovi Radio Observatory, Finland, Kylmälä. Aalto University Department of Radio Science and Engineering, Finland, Aalto. Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Germany, Bonn.

<sup>15</sup> Пущинская радиоастрономическая обсерватория Астрокосмического центра ФИАН, Россия, Московская область, г. Пущино.

Pushchino Radio Astronomy Observatory, Astro Space Center, Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow Oblast', Pushchino.

<sup>16</sup> ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Россия, г. Екатеринбург.

Ural Federal University, Russia, Ekaterinburg.

<sup>17</sup> Государственное Объединение Научных и Прикладных Исследований (CSIRO), астрономия и космические науки, Австралия, г. Эппинг.

CSIRO Astronomy and Space Science, Australia, Epping.

**Наземно-космический интерферометр «РАДИОАСТРОН» обеспечивает самое высокое угловое разрешение, достигнутое в настоящее время в астрономии. Детектирование интерферометрических откликов от квазаров с таким угловым разрешением на базах в 100–200 тыс. км указывает на яркостные температуры, превышающие комптоновский предел на два порядка величины. Поляриметрические измерения на наземно-космических базах выявили тонкую структуру, указывающую на реколлимационные ударные волны на масштабах 100–250 мкс дуги и спиральное магнитное поле у основания радиовыброса в BL Lacertae. Обнаружена субструктура диска рассеяния излучения пульсаров на базах интерферометра от 60000 до 250000 км. Эта субструктура образуется в результате действия межзвездного интерферометра эффективной базой около одной астрономической единицы и с эффективным угловым разрешением лучше одной микросекунды дуги. Измерены диаметры дисков рассеяния для нескольких пульсаров и получены оценки расстояния до рассеивающих экранов. Наземно-космические наблюдения источников мазерного излучения в линиях воды и гидроксила показали, что мазерные источники в областях звездообразования на базах, значительно превышающих диаметр Земли, остаются неразрешенными. Такие очень компактные и яркие детали с угловыми размерами 20–60 мкс соответствуют линейным размерам около 5–10 млн километров (несколько солнечных диаметров).**

**Ключевые слова:**  
**наземно-космический интерферометр;**  
**радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ);**  
**активные галактические ядра (АГЯ);**  
**квазары; пульсары; космические мазеры;**  
**межзвездное рассеяние.**

## Введение

Миссия «РАДИОАСТРОН» представляет собой наземно-космическую систему РСДБ (радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами), предназначенную для исследования структуры космических радиоисточников со сверхвысоким угловым разрешением, обеспечиваемым огромными базами интерферометра, достигающими значений порядка 360000 км. Наземно-космический интерферометр (НКИ) «РАДИОАСТРОН» состоит из 10-метрового космического радиотелескопа (КРТ), установленного на борту космического аппарата «СПЕКТР-Р», который обращается вокруг Земли по эллиптической орбите с периодом обращения около 9 дней. КРТ

*Earth-space interferometry with «RAADIOASTRON» provides the highest direct angular resolution ever achieved in astronomy at any wavelength. RadioAstron detections of quasars on interferometric baselines of 100000–200000 km suggest brightness temperatures exceeding the «inverse-Compton catastrophe» limit by two orders of magnitude. Polarimetric measurements with very long space-ground baselines have revealed a recollimation shock and a helical magnetic field in the core region of BL Lacertae. A substructure within scattering disks was discovered in observations of pulsars with the space-ground interferometer at large baseline projections (60000–250000 km). The substructure is produced by interstellar interferometer with the effective baseline of about one astronomical unit, and with effective angular resolution better than one microarcsecond. Angular diameters of scattering disks were measured for several distant pulsars, distances to effective scattering screens were estimated for these objects. Space-VLBI observations of the water and hydroxyl masers show that the bright details of the masers in galactic star-forming regions remain unresolved at baseline projections which considerably exceed the Earth diameter. Very compact and bright water maser features with the angular sizes of about 20–60 microarcseconds are registered in galactic star-forming regions. This corresponds to linear sizes of about 5–10 million km (several solar diameters).*

**Key words:**  
*space-ground interferometer;*  
*Very Long Baseline Interferometry (VLBI);*  
*active galactic nuclei (AGN);*  
*quasars; pulsars; cosmic masers;*  
*interstellar scattering.*

работает в четырёх диапазонах длин волн: 92, 18, 6.2 и 1.2–1.6 см. НКИ обеспечивает измерение угловых размеров радиоисточников с максимальным угловым разрешением в 7 микросекунд дуги на волне 1.3 см и на максимальной наземно-космической базе. «РАДИОАСТРОН» также позволяет получать изображения наиболее ярких источников при наблюдениях вблизи плоскости орбиты или вблизи прохождения перигея, где реализуются необходимые комбинации проекций наземно-космических баз. Основные параметры НКИ приводятся в таблице 1, (Кардашев Н.С. и др., 2013; Ковалев Ю.А. и др., 2014).

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА

В каждом частотном диапазоне имеются два поляризационных канала приёмника (LCP и RCP) с полосой регистрации сигнала шириной  $2 \times 16$  МГц (верхняя и нижняя субполосы). В диапазоне Р нижняя полоса не содержит полезного сигнала из-за влияния входного фильтра. В диапазоне С работоспособным оказался только один поляризационный канал с левой круговой поляризацией (LCP). Угловое разрешение НКИ указано для максимальной проекции базы на уровне ширины интерференционного лепестка. Чувствительность приведена по уровню среднеквадратического отклонения (1 сигма) для времени интегрирования 300 секунд в одной 16-МГц полосе с использованием 110-метрового радиотелескопа обсерватории Грин Бэнк в качестве наземного плеча интерферометра.

Миссия «РАДИОАСТРОН» выполняется под общим руководством Астрокосмического центра Физического института имени П.Н. Лебедева (АКЦФИАН) (*Кардашев Н.С. и др., 2013; Бургин М.С. и др., 2015*). Управление спутником «СПЕКТР-Р» осуществляется НПО имени С.А. Лавочкина (НПОЛ) (*Хартов В.В. и др., 2014*). Определение орбиты КА на основе большого объёма измерительной и телеметрической информации, а также необходимые вычисления для управления и обработки данных проводятся Баллистической группой Института прикладной математики имени М.В. Келдыша (*Захваткин М.В. и др., 2014; Заславский Г.С. и др., 2014*). Высокая точность восстановления орбиты подтверждена группой обзора ядер галактик проекта, а также независимыми РСДБ-методами (*Duev D.A. et al., 2015*). Приём научных данных производится двумя специализированными телеметрическими станциями – в Пущинской радиоастрономической обсерватории (ПРАО) (*Каневский Б.З. и др., 2014*) и обсерватории Грин Бэнк (США) (*Ford H.A. et al., 2014*).

Основной объём корреляции наблюдательных данных выполняется на программном корреляторе Центра обработки научных информаций (ЦОНИ) АКЦФИАН (*Андранинов А.С. и др., 2014*); в первичной обработке данных также участвуют корреляционные центры в Институте радиоастрономии Макса Планка (Бонн, Германия) (*Bruni G. et al., 2014*) и в Объединённом институте РСДБ (JIVE ERIC, Нидерланды).

Большое значение для осуществления миссии имеет участие крупных наземных радиотелескопов по всему миру. Это участие осуществляется на основе конкурсных заявок. Некоторые обсерватории выделяют наблюдательное время на своих радиотелескопах по специальным соглашениям.

Для координации разработки и выполнения научной программы миссии создан Международный координационный совет (RISC, RadioAstron International Science Council), который состоит из представителей АКЦФИАН, НПОЛ, сотрудников участвующих в наблюдениях обсерваторий и других представителей международной радиоастрономической общественности. На своих ежегодных встречах и телеконференциях RISC обсуждает вопросы организации и планирования научных экспериментов, возможные направления научных исследований, полученные результаты наблюдений в процессе работы миссии и другие вопросы.

Научная программа проекта «РАДИОАСТРОН» состоит из трёх основных частей: Ранняя научная программа (РНП), Ключевая научная программа (КНП) и Общее наблюдательное время (ОНВ). В результате выполнения РНП, которая закончилась в июне 2013 года, были исследованы все возможности НКИ и испытаны различные методы проведения исследований с НКИ, что открыло дорогу выполнению полноценной научной программы проекта с июля 2013 года. Результаты выполнения РНП были представлены в (*Кардашев Н.С. и др., 2014*). Все эксперименты с июля 2013 года проводятся на основе научных заявок. На открытый конкурс принимались заявки двух типов, «ключевая научная программа» (наиболее значимые и крупные проекты) и «общее наблюдательное время». Научная экспертиза поступивших заявок осуществляется международным научным советом экспертов «РАДИОАСТРОН» (RPEC) и результаты утверждаются руководителем проекта «РАДИОАСТРОН» академиком Н.С. Кардашевым.

В данной публикации мы приводим основные результаты выполнения научной программы миссии «РАДИОАСТРОН» к середине 2016 года. Эти достижения были включены в Национальный доклад по ФКИ для симпозиума КОСПАР-2016.

таблица 1 – Основные параметры НКИ (*Ковалев Ю.А. и др., 2014*).

диапазон, см	частотный интервал, МГц	угловое разрешение, мкс	эквивалентная плотность потока системы (SEFD), кЯн		чувствительность, мЯн
			LCP	RCP	
92 (P)	316–332	530	13.3	13.5	14
18 (L)	1636–1692	100	2.76	2.93	3
6.2 (C)	4804–4860	35	11.6	–	5
1.2–1.6 (K)	18372–25132	7	46.7	36.8	16

## 1. Выполнение научной программы

В рамках научной программы миссии изучаются, в основном, три группы космических объектов: квазары – ядра далеких галактик, пульсары – нейтронные звёзды нашей галактики, мазеры – области образования звёзд и планет в нашей галактике и в других галактиках. Наземное плечо интерферометра обеспечивают более 30 радиотелескопов России (Квазар – КВО и Калязин), Украины (Евпатория – до начала 2014 года), Австралии, Великобритании, Германии, Индии, Испании, Италии, Нидерландов, Польши, Швеции, Финляндии, Китая, Южной Кореи, ЮАР, США, Японии и др. Получены успешные результаты по всем научным направлениям. Реализовано рекордное угловое разрешение, составляющее около 10 микросекунд дуги. Публикации могут быть найдены на сайте проекта по следующему адресу: URL: <http://www.asc.rssi.ru/radioastron/publications/publ.html>.

## 2. Основные научные результаты исследований внегалактических объектов

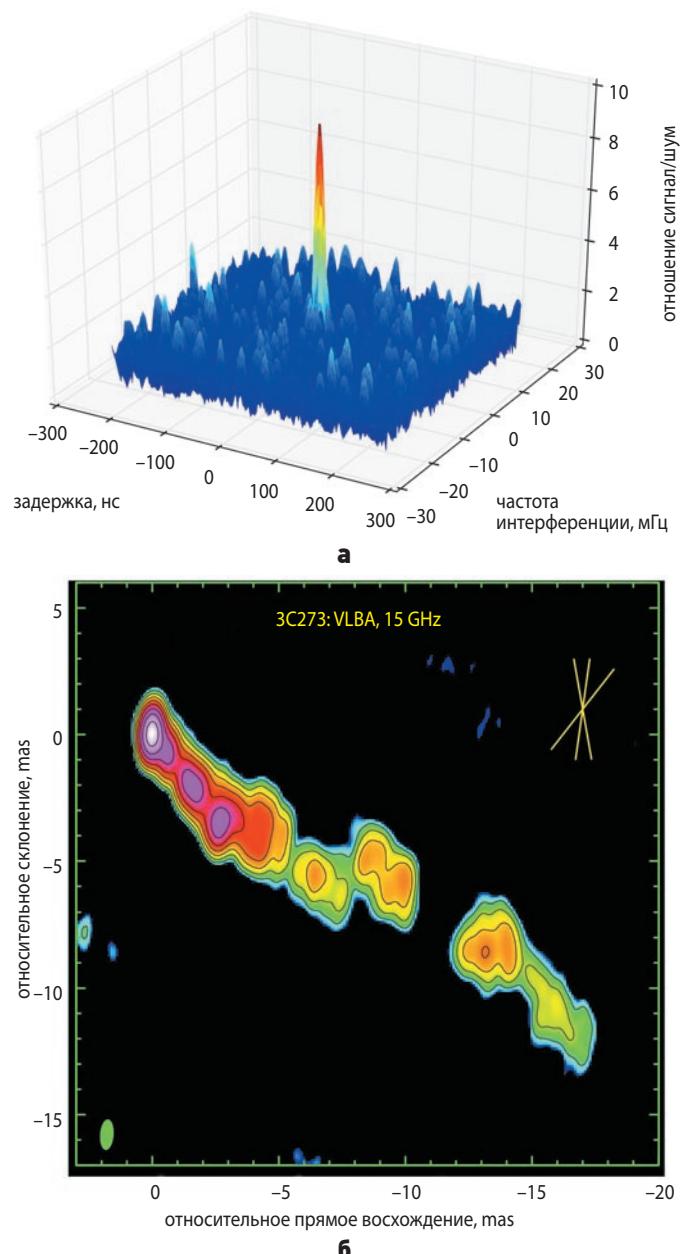
### 2.1. Наблюдения квазара 3C273 с «РАДИОАСТРОН»: вызов пределу яркостной температуры

Энергетические потери на обратный Комpton-эффект накладывают верхний предел на яркостную температуру излучающей плазмы около  $10^{11.5}$  К. Релятивистское усиление излучения может увеличивать наблюдаемую яркостную температуру, но не намного выше значения  $10^{12.5}$  К.

Были выполнены наблюдения квазара 3C273 на проекциях баз, достигающих 171000 км, которые обнаруживают наличие структуры на масштабах до 26 микросекунд дуги (2.7 световых месяца) с яркостной температурой более  $10^{13}$  К. Полученные результаты иллюстрируются на рисунке 1. Эти измерения бросают вызов нашему современному пониманию нетеплового непрерывного излучения в окрестностях сверхмассивных чёрных дыр и требуют намного более высоких скоростей струи, чем наблюдаемые. Другие возможные объяснения включают в себя непрерывное реускорение плазмы на расстоянии несколько парсек от центральной машины, излучение релятивистских протонов и пр. (в Kovalev Y.Y. et al., 2016).

Помимо 3C273 проводятся измерения яркостных температур многих других источников в рамках обзора ядер активных галактик. На наземно-космических базах на сегодняшний день успешно продетектировано 160 квазаров. Значения измеренных яркостных температур простираются до  $10^{14}$  К и даже выше. Этот результат противоречит возможности существования в ядрах данных объектов равенства между плотностью энергии релятивистских частиц и магнитного поля. Он заставляет переосмыслить наше понимание

механизма излучения ядер квазаров, а также значительно исправляет предыдущие и современные результаты РСДБ обзоров активных галактик, проводимые на наземных радиоинтерферометрах.



**рисунок 1. а** – отклик интерферометра «РАДИОАСТРОН» (Космический Радиотелескоп – ГВТ) на частоте 22 ГГц по наблюдениям квазара 3С 273 2 февраля 2013 года с длиной проекции базы 7.6 Гλ. Отношение амплитуды интерферометрического отклика к средней амплитуде шума показано как функция остаточных задержек (в наносекундах и миллигерацах). Вероятность ложного детектирования составляет величину меньше  $10^{-6}$ ; **б** – карта распределения яркости по VLBA наблюдениям квазара 3С 273 на 15 ГГц на эпоху 10 февраля 2013 года с пиком интенсивности 3.2 Ян/луч, уровнем шума 1.4 мЯн/луч, размером диаграммы направленности (зелёный эллипс внизу слева)  $1.21 \times 0.53$  мс дуги. Контуры равной интенсивности проведены с шагом  $\times 2$  и начинаются с уровня 0.25% от пикового значения. Жёлтые линии показывают интервал позиционных углов наземно-космических баз с «РАДИОАСТРОНом», реализуемых в наблюдениях:  $10^\circ, -8^\circ, -38^\circ$

## **2.2. Экстремальные яркостные температуры и рефракционное рассеяние субструктур в 3C273 с «РАДИОАСТРОН»**

Выше, мы обсуждали обнаружение «РАДИОАСТРОНом» классического квазара 3C273 на интерференционных базах до 171000 км, которые предполагают яркостные температуры, превышающие ожидаемые пределы «катастрофы обратного комптон-эффекта» на два порядка величины. Нами показано, что на 18 см эти оценки, скорее всего, возникают вследствие существования рефракционной субструктуры, вызванной рассеянием в межзвёздной среде. Рассеивающие свойства использованы для оценки истинной яркостной температуры, составившей  $7 \times 10^{12}$  К. Эта яркостная температура примерно в 15 раз ниже оценок, полученных без учёта субструктуры. Такая температура согласуется с ожидаемыми теоретическими пределами. При наблюдениях на длине волны 6 см субструктура существенно влияет на измеренные значения, но при этом дает яркостную температуру, сравнимую со значениями, получаемыми в моделях, не учитывающих субструктуру. На длине волны 1.3 см субструктура не оказывает влияния на получаемые чрезвычайно высокие яркостные температуры, составляющие примерно  $10^{13}$ – $10^{14}$  К.

В итоге наши результаты предполагают, что яркостная температура 3C273 растет с частотой, достигая максимума вблизи 20 ГГц, совпадающей с частотой завала спектра. Мы также обнаружили, что для предполагаемого гауссова источника оценка рефракционной субструктуры на одиночной сверхдлинной базе определяет абсолютный минимум яркостной температуры, если рассеивающие свойства вдоль заданного луча зрения известны, и что этот минимум точно аппроксимирует видимую яркостную температуру для широкого интервала значений плотности потока излучения. Подробности приведены в (Johnson V.D. et al., 2016).

## **2.3. РСДБ-картирование поляризованного радиоизлучения далекого квазара 0642+449 на частоте 1.6 ГГц**

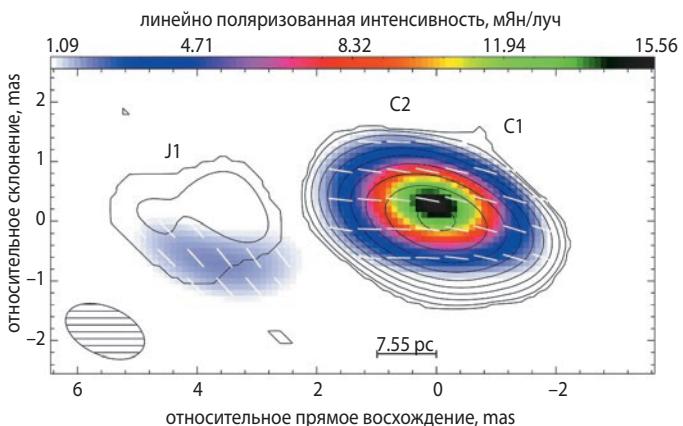
Поляризация радиоизлучения внегалактических выбросов на субмиллисекундных угловых масштабах содержит важную информацию для понимания структуры магнитного поля внутренних областей струй и ближайших окрестностей сверх массивных чёрных дыр в центрах активных галактик. Космические РСДБ-наблюдения дают уникальную возможность для поляриметрического картографирования с субмиллисекундным угловым разрешением и изучения свойств магнитного поля в активных ядрах

галактик на масштабах менее 104 гравитационных радиусов.

Космические РСДБ-наблюдения квазара TXS 0642+449 (OH 471) с большим красным смещением, выполненные на длине волны 18 см (частота 1.6 ГГц) в рамках ранней научной программы миссии «РАДИОАСТРОН», были использованы для тестирования работы орбитального космического радиотелескопа в поляриметрическом режиме наблюдений с целью разработки методологии проведения полностоксовой поляриметрии с космическим РСДБ на частоте 1.6 ГГц и изучения поляризованного излучения наблюдаемого объекта на субмиллисекундных масштабах.

Установлено, что амплитуда инструментальной поляризации КРТ на 18 см составляет не более 9%, отражая высокую надёжность поляризационного картографирования с «РАДИОАСТРОНом» на данной длине волны. Этот результат (Lobanov A.P. et al., 2015) также подтверждается на основе статистического анализа данных обзора ядер активных галактик в проекте «РАДИОАСТРОН» (Пашенко И.Н. и др., 2015).

Получено поляризационное изображение 0642+449 с разрешением 0.8 мс дуги: четырёхкратное улучшение в сравнении с наземными РСДБ наблюдениями на той же длине волны, рисунок 2. Изображение показывает компактную структуру типа ядро-выброс с низким ( $\approx 2\%$ ) уровнем поляризации и преимущественно поперечным магнитным полем в ядерной области. Обнаружена сложная структура ядерной области, с двумя яркими деталями, возможно, соответствующими основанию выброса и сильной реколлимационной волне. Максимальная яркостная температура в основании струи составила  $4 \times 10^{13}$  К. Результаты опубликованы в статье (Lobanov A.P. et al., 2015).



**рисунок 2.** Карта распределения полного (контуры) и линейно-поляризованного (цветные полутона) потока радиоизлучения от квазара 0642+449 на длине волны 18 см. Векторы белого цвета указывают ориентацию электрического вектора линейно-поляризованного излучения

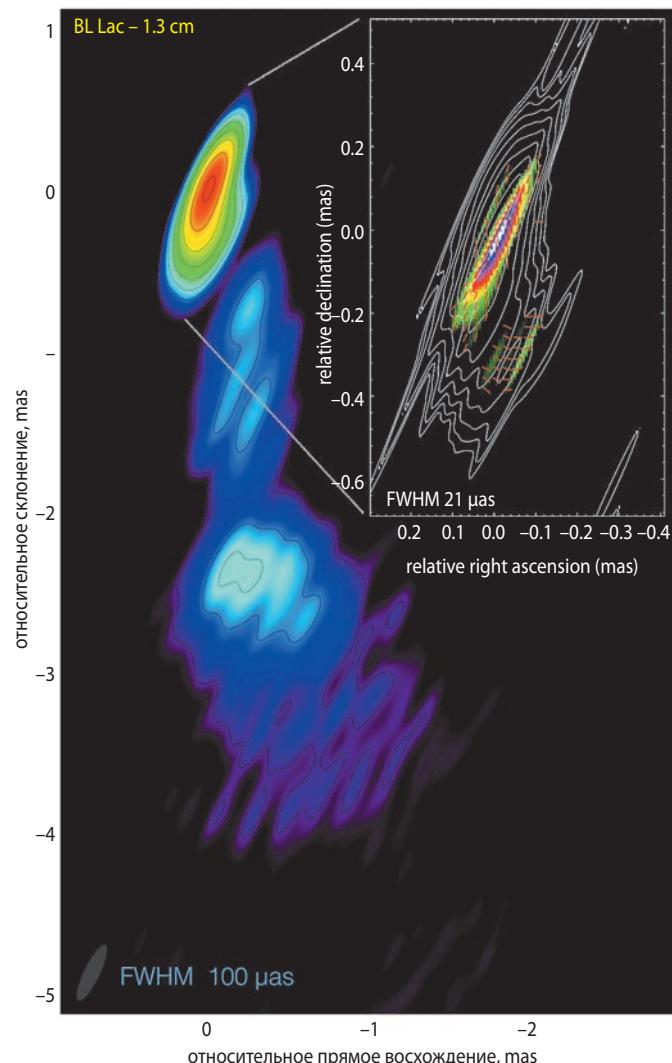
## 2.4. Первое в истории изображение активной галактики с экстремальным угловым разрешением, полученное как в полной интенсивности, так и в линейной поляризации на длине волны 1.3 см

Российский космический радиотелескоп «СПЕКТР-Р» совместно с 15 наземными радиотелескопами из России (сеть «КВАЗАР – КВО»), Европы и США, во время наблюдений активного ядра галактики в созвездии Ящерицы, объекта BL Lacertae, получил изображения с самым высоким в истории астрономии угловым разрешением. Удалось восстановить особенности структуры джетов – гигантских, длиной до нескольких световых лет, струй вещества, которые выбрасывает сверхмассивная чёрная дыра в центре этой галактики, и восстановить структуру магнитного поля.

В ходе сеанса наблюдений BL Lacertae, проведённого на самой короткой длине волны интерферометра (1.3 см), было достигнуто рекордное угловое разрешение – 21 микросекунда дуги (рисунок 3). Объект – блазар со сверхмассивной чёрной дырой в центре. Чёрная дыра окружена диском плазмы, разогретой до температур в миллиарды градусов. Мощные магнитные поля и высокие температуры формируют джеты. Теоретические модели предсказывали, что из-за вращения чёрной дыры и аккреционного диска линии магнитного поля должны формировать спиральные структуры, которые, в свою очередь, ускоряют поток вещества в джетах. Нам удалось увидеть эти спиральные структуры магнитного поля, а также зоны ударной волны в области формирования джета, что позволило лучше понять, как работают эти самые мощные во Вселенной источники излучения. Ядро галактики оказалось экстремально горячим. Если бы мы попытались воспроизвести эти физические условия на Земле, то получили бы зону с температурой более триллиона градусов. Данные результаты опубликованы в работе (Gomez J.L. et al., 2016).

## 2.5. Многочастотное картографирование джета в далеком квазаре 0836+710

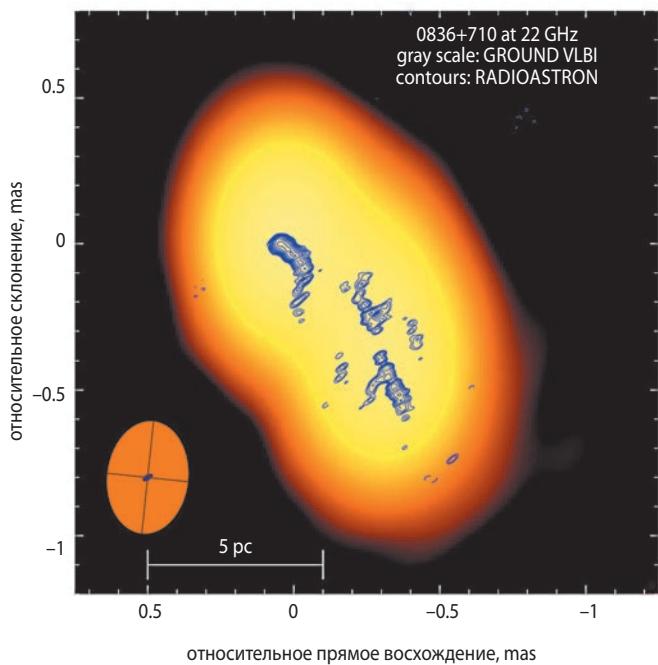
Радиоисточник S5 B0836+710 является мощным слабополяризованным квазаром, обнаруженным на красном смещении 2.17, которое соответствует фотометрическому расстоянию 16.9 Гпк. В нём наблюдается мощный, протяжённый и односторонний джет на масштабах парсеков и килопарсеков. Морфология источника указывает на наличие в нём плазменной неустойчивости. Изображения джета, полученные с помощью «РАДИОАСТРОНа» на 18, 6 и 1.3 см, демонстрируют сложную и скрученную структуру, которая не наблюдалась в предшествующих обзоях на наземных РСДБ-сетях. На изображениях, полученных на наземно-космических базах на 22 ГГц



**рисунок 3.** Поляриметрические РСДБ-изображения объекта BL Lac, полученные с помощью «РАДИОАСТРОНа» 10–11 ноября 2013 года на длине волны 1.3 см, восстановленные с разным взвешиванием данных функции видимости. Так называемое естественное взвешивание позволяет получить карту с меньшим разрешением, но более чувствительную к протяжённым областям (полная интенсивность – цвет и чёрные контуры, диаграмма направленности имеет размер 100 микросекунд дуги). Карта, полученная при «сверходнородном» взвешивании, приведена во вставке в правом верхнем углу (полная интенсивность – белые контуры, линейно поляризованный поток – цвет, позиционный угол электрического вектора – красные полоски, диаграмма направленности – 21 микросекунда дуги)

(рисунок 4), виден прерывистый выброс с явными признаками эффектов поперечного разрешения и поперечной асимметрии струи, которые могут быть интерпретированы как доказательства важного эффекта уярчения к краям и/или результат распространения по струе плазменной нестабильности. Рисунок 4 хорошо иллюстрирует преимущества детального наземно-космического РСДБ-изображения в сравнении с изображением, полученным на наземных базах. Результаты будут опубликованы в журнале «Astronomy and Astrophysics».

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА



**рисунок 4.** Изображение 0836+710, полученное с помощью «РАДИОАСТРОНа» на частоте 22 ГГц (контуры), наложенное на изображение, полученное на наземных базах (цвет)

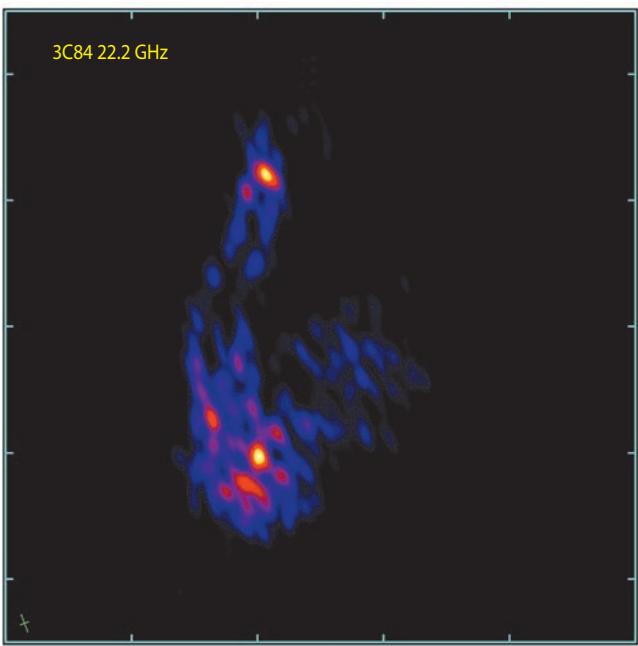
### 2.6. Тонкая структура изображения близкой галактики 3C84, полученная с рекордным линейным разрешением

В рамках выполнения Ключевой научной программы по изучению близких галактик было успешно получено изображение радиоисточника 3C84 в гигантской эллиптической галактике NGC1275 с высочайшим угловым разрешением. Галактика находится на расстоянии в 75 мегапарсек; угловой размер в 1 миллисекунду дуги соответствует всего 0.3 парсека. Благодаря этому объект является одним из лучших кандидатов для исследования джета вблизи центральной сверхмассивной чёрной дыры с высочайшим уровнем пространственной детализации. Полученные результаты позволяют лучше понять процессы формирования струйных радиовыбросов в агломерациях.

Картографирование на частотах 5 и 22 ГГц было проведено с наземной решёткой из 25 телескопов, включая Европейскую РСДБ-сеть вместе с Российской «Квазар – КВО», Калязин, Корейскую РСДБ-сеть, Американские телескопы GBT, VLBA, фазированную VLA. Сигнал наземно-космического интерферометра успешно зарегистрирован для интервала проекций баз интерферометра от 0.2 до примерно 7 диаметров Земли в обоих диапазонах. Полученное изображение представлено на рисунке 5.

Центральная область 3C84 имеет сложную структуру на масштабах субмиллисекунд дуги. Выделяется яркое пятно сверху (Север) – это ядро галактики,

а также деталь снизу (Юг) – она движется с субсветовой скоростью по искривленной траектории. Изображение демонстрирует субструктурку этих областей с уникальной детализацией. Впервые ясно проявился контр-джет (выброс в направлении Севера) на масштабах субпарсеков. Джет и контр-джет разрешены поперек, угловое разрешение карты составляет примерно 50 микросекунд дуги или 500 радиусов Шварцшильда.



**рисунок 5.** Карта близкой галактики 3C84, полученная в полной интенсивности на 22 ГГц на наземно-космическом интерферометре «РАДИОАСТРОН» с экстремальным разрешением. Диаграмма направленности интерферометра указана в левом нижнем углу с размерами 150×70 микросекунд дуги. Видимое изображение с Севера на Юг (сверху вниз) занимает в проекции размер в 1.2 парсека

Полученные данные о структуре струи в её основании позволяют подробно изучать процесс формирования джета в районе центральной сверхмассивной чёрной дыры и аккреционного диска. Можно видеть упреждение к краям для джета и контр-джета, это важный уникальный результат для понимания природы выброса. Он указывает на стратификацию течения плазмы – эффект, крайне редко видимый в прямых наблюдениях. На Юге в конце джета выделяется пятно, его яркость оказалась экстремальной для такого далекого расстояния от центральной машины галактики. В результате учёные зарегистрировали и изучили эффективный разогрев релятивистской плазмы за счёт взаимодействия с окружающей средой на фронте ударной волны. Данные результаты будут опубликованы в статьях *Giovannini G. et al.* и *Savolainen et al.*

## 2.7. Наблюдения PKS 1954-388 и детектирование его излучения «РАДИОАСТРОНом» на базе 80000

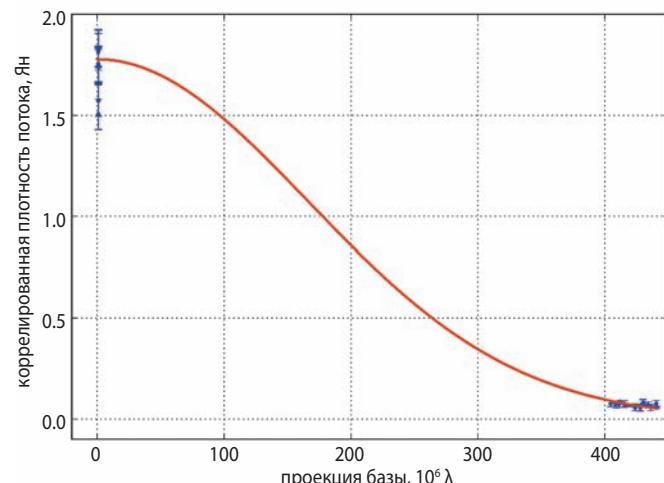
В рамках обзора активных ядер галактик с «РАДИОАСТРОНом» было получено значимое детектирование сигнала на проекции базы 6.2 диаметра Земли, которое соответствует яркостной температуре  $5.9 \times 10^{12}$  К, значительно превышающей предел Компоновской катастрофы. Это указывает на наличие доплеровского уярчения излучения и значительное превышение плотности энергии релятивистских частиц над магнитным полем.

Наблюдения были выполнены 23 августа 2012 года на частоте 1.66 ГГц с Австралийскими радиотелескопами Паркс и Мопра. Отметим, что приёмник космического телескопа на 1.66 ГГц был разработан в отделении радиофизики Государственного Объединения Научных и Прикладных Исследований (CSIRO, Австралия) и произведён в «British Aerospace Australia». Результаты многодиапазонного исследования в радио-, УФ-, рентген- и гамма-диапазонах были успешно интерпретированы в рамках однозонной синхрокомптонной модели (см. подробнее *Edwards et al.* (PASA, в печати)). Поведение коррелированного потока с увеличением проекции базы показано на рисунке 6.

## 3. Научные результаты исследования пульсаров

### 3.1. Зондирование межзвёздной плазмы гигантскими импульсами пульсара в Крабовидной туманности

Гигантские импульсы (ГИ) пульсара в Крабовидной туманности (B0531+21) наблюдались в проекте «РАДИОАСТРОН» в рамках исследования эффектов рассеяния радиоизлучения на межзвёздной среде. С 2011 по 2015 годы включительно было проведено девять наблюдений. Список всех наблюдений пульсара в Крабовидной туманности представлен в таблице 2. При этом впервые для радиоинтерферометрических наблюдений гигантских импульсов пульсара в Крабовидной туманности были получены интерференционные отклики на наземно-космических базах вплоть до 150000 км, в наблюдениях совместно с космическим радиотелескопом миссии «РАДИОАСТРОН». Пример интерференционных лепестков даётся на рисунке 7. Максимальная плотность потока регистрировавшихся гигантских импульсов достигала значения 100000 Ян. Для каждой эпохи наблюдений были измерены параметры рассеяния: время рассеяния, полоса декорреляции, угловой размер кружка рассеяния, радиус дифракционного пятна, расстояние до эффективно рассеивающего экрана, а также анализировались



**рисунок 6.** Результаты измерений коррелированной плотности потока на неземных и наземно-космических базах при наблюдениях квазара PKS 1954–388 на телескопах Паркс, Мопра, «РАДИОАСТРОН» на длине волны 18 см представлены синим цветом. Красная кривая является результатом подгонки в рамках предположения о гауссовом распределении интенсивности излучающего компонента

структурные функции фазы в зависимости от времени. Измерение параметров проводилось в предположении теории одиночного тонкого эффективного рассеивающего экрана. Все результаты измерений приводятся в таблице 3.

Для каждого наблюдения наши оценки расстояния до рассеивающего экрана дают различные значения. Во время самого первого сеанса наблюдений (RAFS01) расстояние до экрана соответствовало случаю равномерно распределенного рассеивающего вещества на луче зрения. В другое время было видно, что рассеяние доминировало в областях, близких к Крабовидной туманности.

Ранее проводившиеся исследования уже показывали наличие такого двухкомпонентного рассеяния – рассеяние в области, близкой к Крабовидной туманности, и протяжённая составляющая, обусловленная межзвёздной плазмой. Так, в работе Р. Каруппусами (*Karuppusamy R. et al., 2010*) было показано, что в течение шести часов наблюдений были выявлены заметные изменения в картине рассеяния для пульсара в Крабовидной туманности и доминирующая область рассеяния находилась в её окрестностях.

Было выполнено моделирование распространения гигантских импульсов с заданной структурой через рассеивающую среду с характерной полосой декорреляции. Такой подход позволил рассмотреть влияние характерной структуры ГИ на измерение полосы декорреляции и на структуру функции видности. Наблюдаемые квазирегулярные структуры в функции видности для индивидуальных гигантских импульсов указывают на присутствие в структуре этих импульсов сильных неразрешенных всплесков

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА

на частоте 1668 МГц. Подобные всплески ранее наблюдались только на частотах выше 5 ГГц – в той области частот, где они не замываются рассеянием. Таким образом, РСДБ-наблюдения гигантских импульсов от пульсара в Крабовидной туманности позволяют сделать заключение о наличии в этих импульсах на частоте 1668 МГц тонкой структуры с присутствием неразрешённых пиков длительностью менее 30 нс и с яркостной температурой  $T_b > 10^{38}$  К. На основании этого можно сделать вывод, что такие неразрешённые компоненты со столь высокими значениями яркостной температуры будут распространяться в магнитосфере пульсара как сильные электромагнитные волны, ускоряя частицы плазмы, в результате чего образуются новые детали в профиле пульсара HFIP, HFC1, HFC2, обнаруженные Хэнкинсом (*Hankins T.H. et al., 2015*).

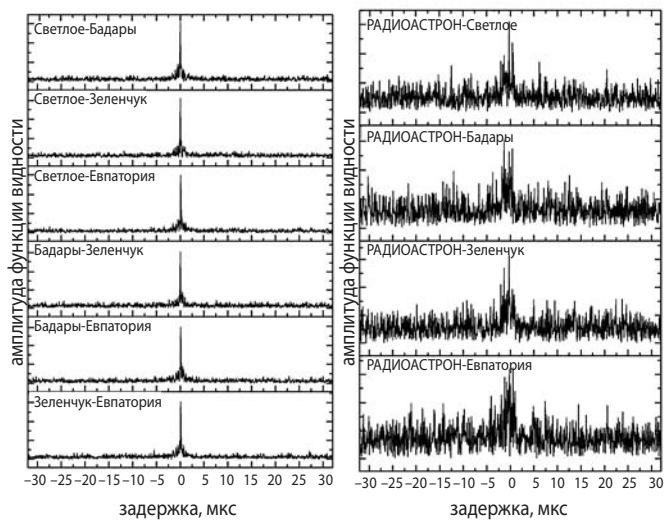
Результаты этих исследований опубликованы в статье F/U/ Рудницкого с соавторами (*Рудницкий А.Г., Каруппусами Р., Попов М.В., Согласнов В.А., 2016*).

**таблица 2** – Таблица наблюдений пульсара B0531+21, проводившихся в рамках научной программы миссии «РАДИОАСТРОН» в период с 2011 по 2015 годы

код сеанса	дата	время	T, часы	$\lambda$ , см	D, км	$N_{GRT}$
RAFS01	14.11.2011	23:00–00:00	1.0	18	46000	4
RAES04A	02.03.2012	13:00–17:00	4.0	18	145000	8
RAES04B	06.03.2012	13:30–17:30	4.0	18	128000	8
RAES04D	23.10.2012	07:00–09:00	2.0	18	113000	7
RAKS02AD	27.10.2013	06:00–09:00	3.0	18	150000	4
RAKS02AE	02.11.2013	19:30–08:40	12.0	92	57000	5
RAGS10A	10.01.2015	22:00–04:00	6.0	18	153000	5
RAGS10B	28.01.2015	21:00–03:00	6.0	18/92	140000	10
RAGS10C	15.02.2015	20:00–02:00	6.0	92	107000	2

**таблица 3** – Таблица измеренных параметров рассеяния для пульсара B0531+21. В первом столбце указано кодовое обозначение эксперимента, во втором – время рассеяния, в третьем – угловой диаметр кружка рассеяния, в четвертом – полоса декорреляции, в пятом – доля расстояния от наблюдателя до рассеивающего экрана, в последнем – количество обнаруженных гигантских импульсов

код наблюдения	$\tau_{SC}$ , мс	$\Theta$ , mas	$\Delta v$ , кГц	$\alpha$	кол-во ГИ
RAFS01	$0.9 \pm 0.1$	$1.3 \pm 0.2$	$116.3 \pm 24.5$	$0.36 \pm 0.08$	98
RAES04A	$5.8 \pm 0.3$	$0.6 \pm 0.1$	$55.2 \pm 5.9$	$0.94 \pm 0.02$	1202
RAES04B	$5.5 \pm 0.7$	$0.5 \pm 0.1$	$41.2 \pm 7.9$	$0.96 \pm 0.03$	1034
RAES04D	$5.1 \pm 0.5$	$1.2 \pm 0.1$	$40.7 \pm 4.6$	$0.79 \pm 0.03$	929
RAKS02AD	$2.2 \pm 0.3$	$1.2 \pm 0.1$	$78.1 \pm 7.9$	$0.61 \pm 0.06$	453
RAKS02AE	$2340 \pm 23$	$14.0 \pm 1.4$	–	$0.92 \pm 0.07$	579
RAGS10A	$1.4 \pm 0.2$	$0.4 \pm 0.1$	$161.1 \pm 3.4$	$0.91 \pm 0.05$	1807
RAGS10B	$1.5 \pm 0.1$	$0.5 \pm 0.1$	$70.2 \pm 8.3$	$0.85 \pm 0.04$	627
RAGS10C	–	–	–	–	–

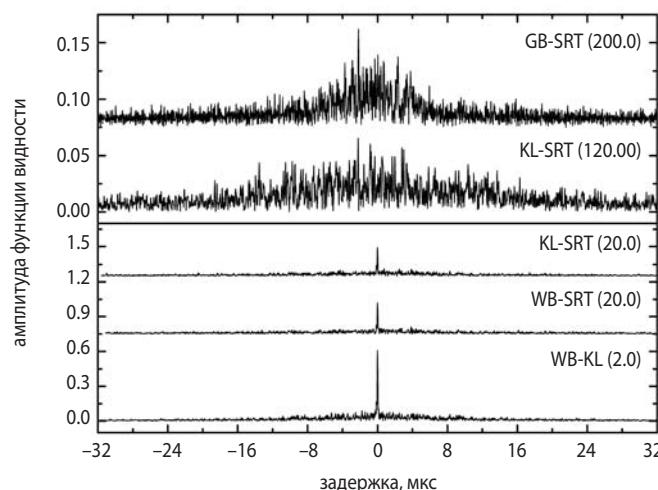


**рисунок 7.** Кросскорреляционные функции индивидуального ГИ для различных баз, сеанс RAFS01, импульс: 23:21:03.74, длина волны: 18 см. Слева представлены только наземные базы, справа – только наземно-космические. На наземно-космических базах проявляется субструктура кружка рассеяния

### 3.2. Распределение неоднородностей межзвёздной плазмы в направлении удалённых пульсаров

Радиоизлучение от космических источников подвергается рассеянию на неоднородностях межзвёздной плазмы. Наиболее наглядно эффекты рассеяния проявляются для компактных источников, к которым относятся пульсары. Именно с открытием пульсаров проявления рассеяния радиоволн на неоднородностях межзвёздной плазмы были изучены теоретически и экспериментально. Основные эффекты рассеяния радиоволн следующие: увеличение измеренного углового размера источника  $\tau_{sc}$ , увеличение длительности импульса пульсара  $\Theta_{sc}$ , модуляция интенсивности радиоизлучения по частоте и времени с характерными масштабами  $\Delta\nu_d$  и  $\Delta t_{sc}$ .

Одновременные измерения перечисленных выше параметров для выбранного объекта в течение достаточно большого интервала времени ( $T > \Delta t_{sc}$ ) и в достаточно широкой полосе частот ( $B_v > \Delta\nu_d$ ) позволяют получить информацию о структуре неоднородностей межзвёздной плазмы в направлении данного объекта. Преимущества в изучении эффектов рассеяния дают интерферометрические наблюдения со сверхдлинными базами (РСДБ) – только в таких наблюдениях можно непосредственно измерить угол рассеяния  $\Theta_h$ . Новые возможности в этом направлении обеспечивает наземно-космический интерферометр «РАДИОАСТРОН», который позволяет реализовать высокое угловое разрешение до 1 миллисекунды дуги в метровом диапазоне длин волн (92 см) и до 0.2 миллисекунд дуги – в дециметровом диапазоне (18 см).



**рисунок 8.** Эволюция структуры функции видности при увеличении проекции базы интерферометра для пульсара B0329+54 в диапазоне 92 см (324 МГц). Рядом с каждой кривой указана комбинация радиотелескопов и величина проекции базы в миллионах длин волн (Мλ). Для проекции базы, больших 30 Мλ, центральный пик функции видности исчезает и проявляется структура кружка рассеяния. Две верхние кривые показаны с десятикратным увеличением

Интерференционный отклик для выбранной пары телескопов, который принято также называть функцией видности, получается из набора комплексных кросс-спектров путём последовательного преобразования Фурье, сначала по частоте (обратное преобразование Фурье), а затем по времени (прямое преобразование) на временном интервале интегрирования  $\Delta T$ . Функция видности анализируется на диаграмме задержка – частота интерференции  $V_{AB}(\tau, f)$ .

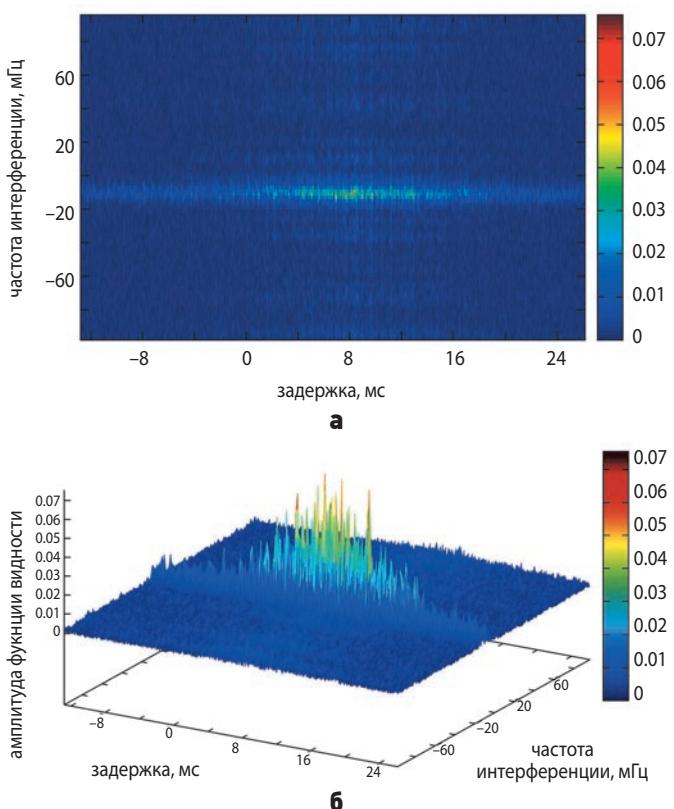
Для точечного источника, такого, как пульсар, подверженного рассеянию, модуль функции видности, определенный для достаточно большой базы интерферометра, разрешающей кружок рассеяния, представляет собой пятно увеличенной амплитуды с размерами:  $\Delta f = 1/(2\pi\Delta t_{sc})$  и  $\Delta\tau = 1/(2\pi\Delta\nu_d)$  на диаграмме частота интерференции – задержка соответственно. Именно такой вид был продемонстрирован в результате анализа наблюдений пульсара B0329+54 на базах наземно-космического интерферометра, достигавших 235000 км. На меньших базах интерферометра, когда оба радиотелескопа находятся в пределах одного дифракционного пятна, функция видности имеет пик в начале координат (при правильной компенсации частоты интерференции и задержки); амплитуда этого пика уменьшается с увеличением базы, что и позволяет измерить размеры кружка рассеяния. Вид интерференционного отклика на больших наземно-космических базах показан на рисунке 9, а центральное сечение пятна по координате временная задержка приводится на рисунке 8 для разных проекций базы интерферометра; самая верхняя кривая на рисунке 8 представляет собой сечение рисунка 9. Подробности исследования рассеяния по результатам наблюдений пульсара B0329+54 опубликованы в (Gwin C.R. et al., 2016).

Пульсар B1933+16 одновременно наблюдался в двух частотных диапазонах в течение полутора часов 1 августа 2013 года. В связи с особенностями работы КРТ на частоте 316 МГц наблюдения проводились в правой круговой поляризации только в верхней субполосе, а на частоте 1668 МГц – левой круговой поляризации в обеих субполосах. На 92 см наблюдения происходили совместно с системой апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT) и 25-метровой антенной американской решетки телескопов VLBA (Санта-Крус), а на 18 см работала 300-м антенна в Аресибо и два 32-метровых телескопа в Торуни и в Светлом.

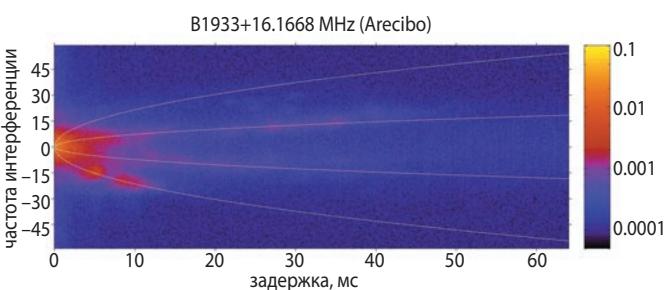
Диаметр кружка рассеяния на 316 МГц получился равным  $\Theta_h = 12.3 \pm 0.6$  миллисекунд дуги, что хорошо согласуется с ранними измерениями Гвина ( $15.2 \pm 1.3$  миллисекунды дуги), а на 1668 МГц –  $\Theta_h = 0.84 \pm 0.04$  миллисекунд дуги.

На рисунке 10 показан вторичный спектр на частоте 1668 МГц, полученный посредством двумерного преобразования Фурье от динамического спектра.

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА



**рисунок 9.** Диаграмма задержка – частота интерференции для 500-секундного скана наблюдения 29 ноября 2012 года (пульсар B0329+54) в правом поляризационном канале, база «РАДИОАСТРОН» – Грин Бэнк

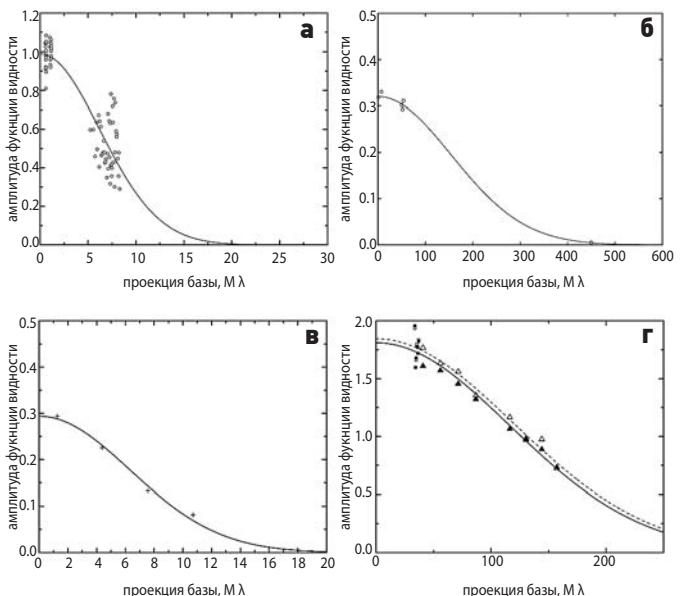


**рисунок 10.** Вторичный спектр для пульсара B1933+16 на частоте 1668 МГц. Параболические дуги указывают на наличие двух эффективных рассеивающих экранов на расстоянии 1.3 и 3.1 кпк от наблюдателя

Кроме большого центрального пятна, можно заметить отдельные структуры, которые выстраиваются вдоль параболических дуг с вершиной в центре вторичного спектра. Такие дуги были впервые обнаружены и исследованы в работах Стайнбринга с соавторами (*Stinebring D.R. et al., 2001*). По форме парабол можно независимо от предыдущих оценок определить положение одного или нескольких (по числу дуг) рассеивающих экранов, как это было предложено в (*Hill A.S. et al., 2003*).

Таким образом, с использованием наземно-космического интерферометра «РАДИОАСТРОН»

и ряда наземных интерферометров мы исследовали распределение неоднородностей межзвездной плазмы в направлении четырех удаленных пульсаров B0329+54, B1641-45, B1749-28 и B1933+16, расположенных вблизи плоскости Млечного пути, радиоизлучение которых подвергается сильному рассеянию. По поведению нормированной амплитуды функции видности в зависимости от величины проекции базы этих интерферометров были измерены углы рассеяния для всех пульсаров (рисунок 11). Также был измерен временной масштаб уширения рассеянного импульса на неоднородностях межзвездной плазмы по зависимости амплитуды функции видности  $V(\tau)$  от величины запаздывания, или по форме хвостовой части среднего профиля импульса. Сравнение угла рассеяния и временного масштаба уширения рассеянного импульса в модели тонкого экрана позволило локализовать положение такого экрана на луче зрения от наблюдателя до пульсара.



**рисунок 11.** Зависимость амплитуды функции видности от величины проекции базы. Ось X оцифрована в миллионах длин волн. Пульсар B1641-45 (**а**) – сплошная линия соответствует диаметру кружка рассеяния в 27 миллисекунд дуги. Использованы только наземные проекции базы. Пульсар B1749-28 (**б**). Пульсар B1933+16 (**в**, **г**) – зависимость амплитуды функции видности от величины проекции базы на частоте (**в**) 316 МГц на базе Вестерборк – «РАДИОАСТРОН» и (**г**) 1668 МГц на базах Аресибо – «РАДИОАСТРОН» (треугольники) и Аресибо – Светлое (кружки). Закрашенные значки и сплошная линия соответствуют верхней субполосе, незакрашенные значки и пунктирная линия – нижней

Следует отметить, что ни для одного пульсара не подходит модель равномерного распределения рассеивающей плазмы на луче зрения. Выявленные рассеивающие экраны отождествляются с реальными объектами.

тами, находящимися на луче зрения к этим пульсарам G339.1-04 (PSR B1641-45) и G0.55-0.85 (PSR B1749-28). Кроме того, по кривизне параболических дуг на частоте 1668 МГц было выявлено два экрана на расстояниях 1.3 кпк и 3.1 кпк, второй из них можно считать согласующимся с определениями по углам рассеяния. Выполненные исследования структуры межзвёздной плазмы путем анализа РСДБ-наблюдений пульсаров, проведенных с наземно-космическим интерферометром «РАДИОАСТРОН», выявили конкретные слои, ответственные за основной вклад в рассеяние радиоволн, и эти слои находятся вблизи спиральных рукавов Галактики. Результаты измерений и вычислений приводятся в таблице 4. Таблица содержит название пульсара, число каналов коррелятора ( $N_{ch}$ ), шаг сэмплирования коррелятора ( $\delta t$ ), время интегрирования ( $\Delta T$ ), характерное время мерцаний ( $\Delta t_{sc}$ ), ширину полосы декорреляции в спектре ( $\Delta v_d$ ), время рассеяния ( $\tau_{sc}$ ), угловой диаметр кружка рассеяния ( $\Theta_H$ ), галактические координаты пульсара ( $l, b$ ), расстояние до пульсара (D) и расстояние до рассеивающего экрана ( $d$ ).

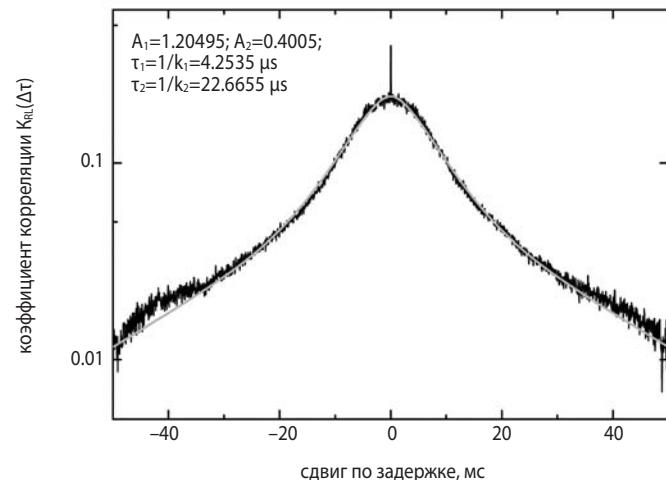
### 3.3. Статистические свойства субструктур диска рассеяния для пульсара B0329+54

Выполнен анализ статистических свойств субструктуры, обнаруженной в диске рассеяния излучения от пульсара B0329+54 на частоте 324 МГц на наземно-космическом интерферометре «РАДИОАСТРОН». Наблюдения этого пульсара были проведены в ноябре 2012 года в течение четырёх последовательных дней – 26, 27, 28 и 29 ноября; длительность сеанса каждый день составила по 1 часу. Проекция базы интерферометра изменялась от 60000 до 235000 км. В качестве наземного плеча интерферометра работал 110-метровый радиотелескоп обсерватории Грин-Бэнк (США). Кружок рассеяния был разрешен

на всех базах, т.е. интерферометрический отклик (функция видности) не содержит компактной детали (см. рисунки 8–9).

Был проведён анализ сечения интерференционного отклика по координате «временная задержка». Структура этого сечения представляет собой случайные вариации по амплитуде и фазе. В качестве статистической характеристики функции видности мы использовали кросскорреляционную функцию (ККФ) между модулями функции видности, полученными в каналах приемника с разными поляризациями (LCP и RCP). Эта функция  $K_{RL}(\Delta\tau)$  сглаживает глубокую модуляцию амплитуды самой функции видности. Пример средней ККФ приведён на рисунке 12. Из рисунка видно, что имеется два временных масштаба в форме ККФ. Для объяснения такой структуры была получена теоретическая формула, основанная на предположении, что передаточная функция среды содержит два экспоненциальных компонента

$$G(\tau)=A_1 k_1 \exp(-k_1 \tau) + A_2 k_2 \exp(-k_2 \tau).$$

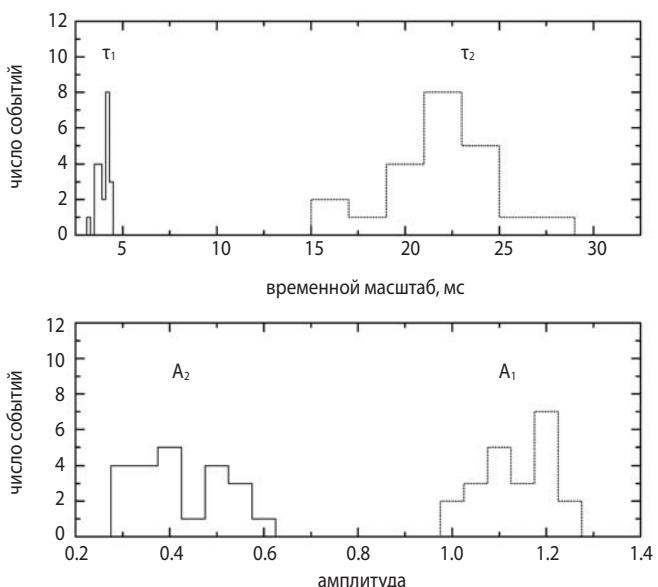


**рисунок 12.** Аппроксимация средней ККФ функции видности двумя экспоненциальными функциями

**таблица 4** – Вычисленные параметры рассеяния

пульсар	$N_{ch}$	$\delta t$ , с	$\Delta T$ , с	$\Delta t_{sc}$ , с	$\Delta v_d$ , кГц	$\tau_{sc}$ , мкс	$\Theta_H$ , мас	$l, b$ , °	D, кпк	d, кпк
B1641-45	16384	0.45	115	0.20 (0.05)	0.062 (0.002)	2600 (100)	27 (5)	339.2, -0.2	4.9	3.0
B1749-28	256	5.62	225	220 (20)	410 (100)	310 (0.040)	0.5 (0.2)	1.54, -0.96	1.3	0.95
B1933+16	8192	0.35	250	–	0.25 (0.15)	600 (400)	12.3 (0.6)	52.4, -2.1	3.7	2.6
B1933+16	2048	0.35	250	41.6 (0.5)	50.4 (1.1)	3.2 (0.1)	0.84 (0.04)	52.4, -2.1	3.7	2.7 [1.3; 3.1]
B0329+54	2048	0.71	70	102 (8)	7.0 (0.8)	12 (2)	4.8 (0.8)	145, -1.2	1.0	0.5

# «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА



**рисунок 13.** Распределение измеренных параметров: времени рассеяния и относительного вклада для двухкомпонентной модели рассеяния радиоизлучения пульсара B0329+54 в диапазоне 92 см

Сплошной серой линией на рисунке 12 показана кривая для нашей теоретической формулы, примененной к аппроксимации реальной ККФ. Такая аппроксимация была выполнена для всех наблюдательных 10-минутных сканов. Рисунок 13 показывает распределение измеренных параметров: амплитуды  $A$  и постоянной времени  $\tau=1/k$ . Оказалось, что в передаточной функции среды имеется два временных масштаба 4.1 мкс и 23 мкс с отношением амплитуд  $A_1/A_2=0.38$ . Эти значения не зависят заметным образом от величины проекции базы при почти четырехкратном изменении.

Возможным объяснением присутствия двух временных масштабов в АКФ может служить модель анизотропного рассеяния. Для этой модели полученное нами отношение постоянных времени  $k_2/k_1=5.5$  даёт для отношения углов рассеяния  $\theta_2/\theta_1=7.4$ , а отношение амплитуд должно составить величину  $A_1/A_2=0.40$ , что весьма близко к полученному экспериментальному значению. Однако в течение четырёх дней вектор проекции базы изменялся в пространстве на значительный угол (около 60 градусов), и это должно было сказаться на соотношении амплитуд и постоянных времени, чего не наблюдалось.

Другим объяснением могут служить упорядоченные структуры, наблюдаемые во вторичных динамических спектрах пульсаров (см. рисунок 10). Предполагается, что эти структуры (параболические арки) возникают в результате интерференции между субструктурами диска рассеяния, образовавшимися путём рефракции на тонких слоях межзвёздной плазмы. Эти сложные структуры существуют в широком диапазоне пространственных масштабов, что может давать два масштаба в АКФ. Однако, во вторичном спектре для

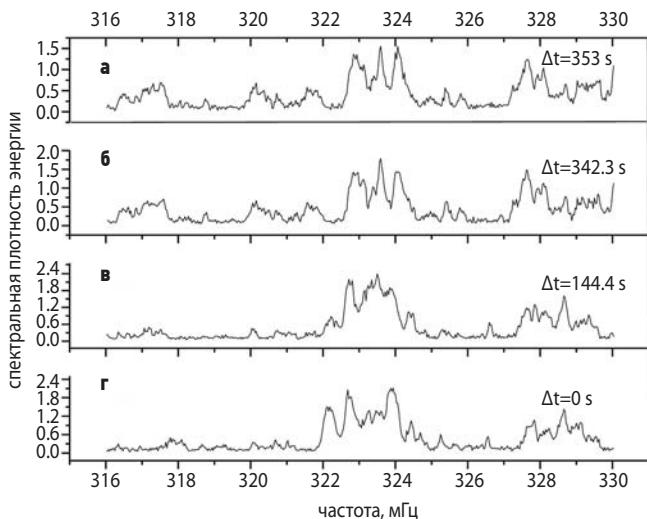
исследуемого пульсара B0329+54, мы не заметили никаких признаков параболических арок. Необходимы дополнительные наблюдения для этого и других ярких пульсаров, чтобы разрешить загадку двойной структуры АКФ. Такие наблюдения запланированы в дополнительной программе научных исследований проекта «РАДИОАСТРОН» на 2016–2018 годы.

## 3.4. Исследования близкой межзвёздной турбулентной плазмы

Для разделения влияния ближней и дальней среды на рассеяние радиоизлучения пульсаров необходимо наличие высокого пространственного разрешения, которое в наших наблюдениях обеспечивает наземно-космический интерферометр «РАДИОАСТРОН». Приводимые в данном разделе результаты основаны на наблюдениях мерцаний пульсара PSR B1919+21 на частоте 324 МГц. PSR B1919+21 – это сильный пульсар с галактическими координатами: широта 55° и долгота 3.5°, мера дисперсии DM=12.43 пк/см<sup>3</sup>. Расстояние до пульсара было оценено исходя из модели Кордеса и Лазио в 1 кпк (Cordes J.M. et al., 2003). По наблюдениям собственного движения пульсара в (Zou W.Z. et al., 2005) были получены его скорости по двум координатам:  $\mu_\alpha=17\pm4$  миллисекунд дуги /год и  $\mu_\beta=32\pm6$  миллисекунд дуги /год.

В наблюдениях принимали участие 10-метровый космический радиотелескоп «РАДИОАСТРОН», 110-метровый телескоп в Грин-Бэнке (GBT) и система апертурного синтеза в Вестерборке (WSRT). Регистрировалась полоса частот 316–332 МГц с одноразрядной оцифровкой для данных с космического аппарата и двухбитовой оцифровкой для наземных телескопов. Первичная обработка проводилась на корреляторе АКЦ ФИАН (Андреев А.С. и др., 2014) с использованием некогерентной компенсации дисперсии сигнала в полосе приёмника. Данные были прокоррелированы с использованием 512 частотных каналов в двух выбранных окнах: на импульсе и вне импульса пульсара длительностью по 40 мс (3% периода пульсара,  $P=1.337$  с). Импульсное окно было центрировано к максимуму среднего профиля, а внеимпульсное выбиралось на расстоянии 0.5  $P$  от предыдущего окна. База космического интерферометра составляла 60000 км.

На рисунке 14 приведены радиоспектры индивидуальных сильных импульсов с разнесением по времени (время растет снизу вверх) в секундах. В этих спектрах отчетливо видны дифракционные искажения, вызванные рассеянием радиоволн. Эти искажения имеют два частотных масштаба: мелкая структура с масштабом порядка 400 кГц и крупномасштабная порядка 1500 кГц. При малом разнесении по времени (11 с, рисунки 14а и 14б) тонкая структура сохраняется, а на интервале 200 с (рисунки 14б и 14г) изменяется. Крупная структура сохраняет свою форму.



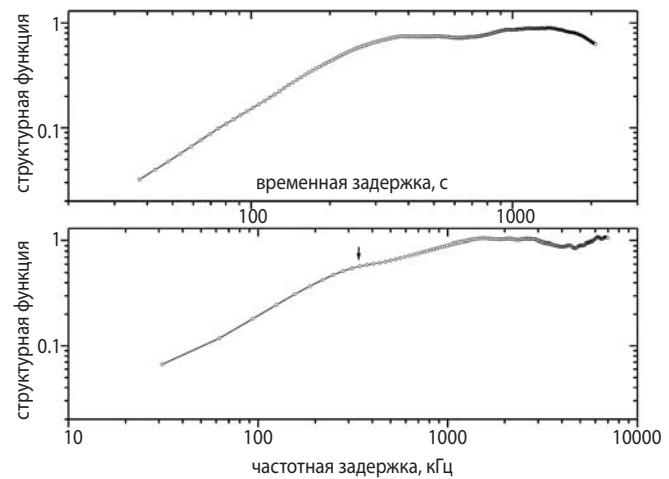
**рисунок 14.** Спектры индивидуальных импульсов пульсара, разнесенные по времени на указанное число секунд от нижнего спектра

Корреляционный анализ динамических спектров дает нам характерные временные  $t_{dif}$  и частотные  $f_{dif}$  масштабы мерцаний. Мы получили масштабы:  $f_{1,dif}=330$  кГц и  $f_{1,dif}=700$  кГц (полуширина на уровне 1/2 соответствующей функции) и амплитуды 0.84 и 0.15 для мелкой и крупной структур соответственно. Эти структуры обусловлены рассеянием излучения на дальнем и ближнем слоях межзвёздной плазмы.

Анализ пространственной функции когерентности для космической базы (RA-GB) позволил оценить угол рассеяния в плоскости наблюдателя:  $\Theta_{scat}=0.7$  миллисекунды дуги. Анализ частотно-временной корреляционной функции для слабых мерцаний дал оценку угла рефракции в направлении пульсара:  $\Theta_{ref}=120$  угловых мс и расстояния до призмы,  $Z_{prism}<1.3$  пк.

Полезные результаты были получены путем анализа структурных функций  $SF(b, \Delta f, \Delta t)$ . На рисунке 15 показаны средние временная (вверху) и частотная (внизу) структурные функции (SF) для наземной базы, приведенные в двойном логарифмическом масштабе. Стрелкой отмечен излом в частотной структурной функции. Наклоны временной и частотной SF различаются примерно в два раза (для масштабов до 250 кГц):  $\beta_1=0.9\pm0.03$  для частотной и  $\beta_2=1.73\pm0.02$  для временной функций. Такое соотношение между частотными и временными структурными функциями соответствует дифракционной модели формирования частотной структуры. Показатель степени для спектра флуктуаций плотности неоднородностей связан с показателем SF( $t$ ) соотношением  $n=\beta_2+2=3.73$ .

На рисунке 16 приведены средние частотные структурные функции для наземной (квадраты) и космической (кружки) баз при нулевом временном сдвиге. Видно, что уровни, на которые выходят SF, различаются примерно на 0.2, что соответствует относитель-



**рисунок 15.** Средние временная (вверху) и частотная (внизу) структурные функции (SF) для базы Грин Бэнк-Вестерборк (GB-WB), приведённые в двойном логарифмическом масштабе. Стрелкой отмечен сдвиг (300 кГц), при котором происходит излом в частотной структурной функции

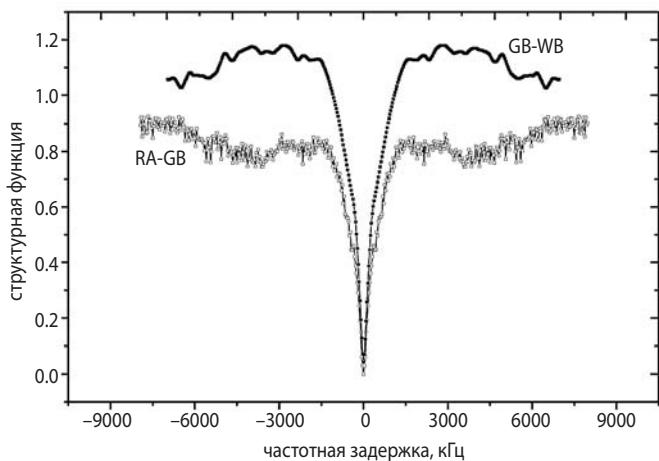
ному вкладу двух частотных масштабов в структуре спектров мерцаний. Соотношение их амплитуд согласуется с фитингом суммы двух компонент в среднюю частотную корреляционную функцию для наземной базы. Для космической базы излома в структурной функции нет, она описывает мелкомасштабную часть спектров с относительной амплитудой 0.8.

Таким образом, анализ частотно-временных и структурных функций позволил оценить пространственное распределение межзвёздной плазмы на луче зрения. Было показано, что наблюдения хорошо согласуются с наличием двух экранов в этом направлении: один находится на расстоянии порядка 440 пк от наблюдателя, он вносит основной вклад в мерцания пульсара (дифракционные), а также определяет мелкомасштабную структуру в спектрах импульсов; второй – ближний, на расстоянии всего 0.13 пк, связанный со слабыми мерцаниями (крупномасштабная структура). Френелевский масштаб равен  $2.5 \cdot 10^9$  см. Кроме того, за ближним экраном находится призма, которая приводит к дрейфу дифракционной картины со скоростью 1.5 МГц/1000 с. Мы оценили угол рефракции как  $\Theta_{ref}=120$  угловых мс и получили верхнюю оценку для расстояния до призмы:  $Z_{prism}<1.3$  пк. Анализ пространственной функции когерентности для космической базы (RA-GB) позволил оценить угол рассеяния в плоскости наблюдателя:  $\Theta_{scat}=0.7$  угловых мс. Анализ временной и частотной структурных функций дал значение показателя степени флуктуаций электронной плотности межзвёздной плазмы,  $n=3.73$ .

В целом, модель среды качественно повторяет модель среды, использованную нами ранее для интерпретации данных наблюдений мерцаний пульсара

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА

B0950+08 (Смирнова Т.И. и др., 2014). Однако, в нашем случае расстояние до фазового экрана 1 значительно больше, характерный угол рассеяния  $\Theta_{scat}$  также значительно больше, поэтому мерцания пульсара 1919+21 являются сильными (насыщенными).



**рисунок 16.** Нормированные частотные структурные функции для наземной (GB-WB) и космической баз (RA-GB)

### 4. Исследование космических водяных мазеров на частоте 22 ГГц в проекте «РАДИОАСТРОН»

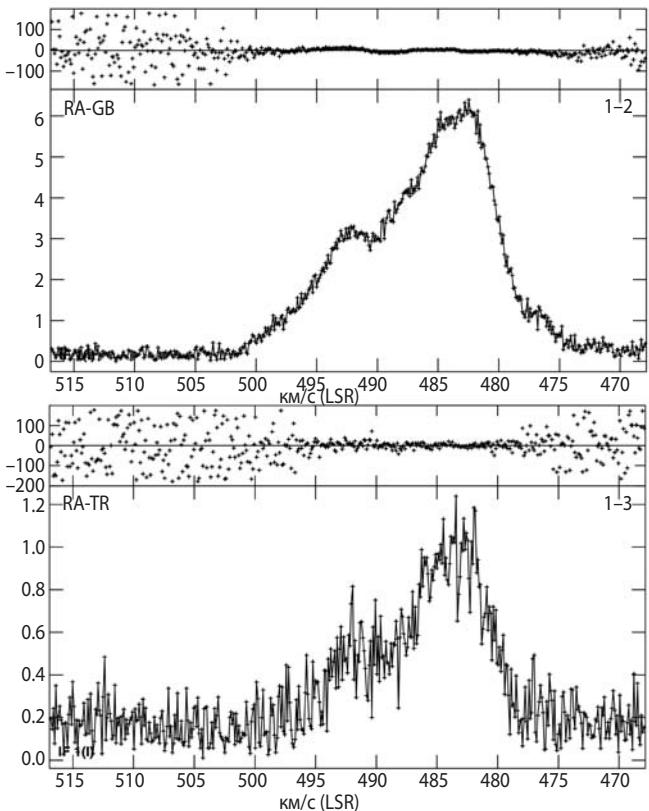
#### 4.1. Первые внегалактические мазеры, зарегистрированные на базах больше диаметра Земли: NGC4258 и NGC3079

Галактика NGC4258 (Мессье 106), находящаяся на расстоянии примерно 24 млн. световых лет в направлении созвездия Гончих Псов, является прототипом галактик, в которых наблюдается мазерное излучение в линии молекулы воды от газового аккреционного диска вокруг сверхмассивной чёрной дыры в центре. Это излучение наблюдается в виде многочисленных компактных деталей большой светимости, по расположению и движению которых можно исследовать структуру диска, определить расстояние до галактики.

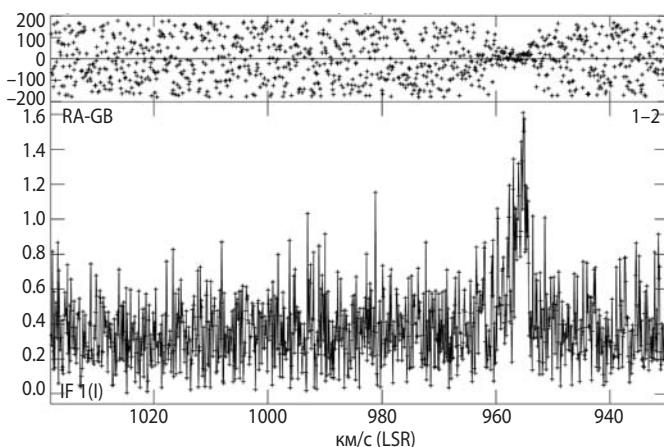
Накачка таких мазеров может черпать энергию из рентгеновского излучения центральной части галактики. Наличие большого числа наблюдаемых компонент объясняется неустойчивостями и турбулентностью в диске. Интерферометрический отклик от компактных мазерных деталей был зарегистрирован в 2014 году на наземно-космических базах между КРТ проекта «РАДИОАСТРОН» и двумя наземными станциями: 110-метровым радиотелескопом в Грин-Бэнке (США) и 32-метровым телескопом в Торуне (Польша). Проекция базы интерферометра в этих наблюдениях достигала примерно двух диаметров Земли, что соответствует угловому разрешению около 110 микросекунд дуги (рисунок 17).

Второй мегамазер, зарегистрированный на наземно-космическом интерферометре «РАДИОАСТРОН», находится в галактике NGC3079 (примерно 52–65 млн. световых лет в направлении созвездия Большой Медведицы). Наблюдения NGC 3079 в ноябре 2014 года с проекцией базы около 2.3 диаметра Земли (что соответствует угловому разрешению около 95 микросекунд дуги) привели к обнаружению излучения компактных мазерных деталей (рисунок 18).

Успешная регистрация внегалактических мазеров открыла возможность проведения исследований объектов за пределами нашей Галактики методом космической интерферометрии. Этот метод позволяет многократно увеличить угловое разрешение, необходимое для определения точных положений мазеров и исследования движений газа в околовядерных дисках других галактик, что чрезвычайно важно для измерения расстояний и изучения структуры Вселенной.



**рисунок 17.** Кросскорреляционный спектр мегамазерного излучения NGC4258, полученный между 10-метровым КРТ и наземными телескопами: 110-метровым радиотелескопом в Грин-Бэнке (вверху) и 32-метровым радиотелескопом в Торуне (внизу). Упорядоченное поведение фазы (верхняя часть рисунка) указывает на диапазон скоростей, в котором зарегистрирован отклик интерферометра. В области, где интерферометрический сигнал от мазерных компонент отсутствует или теряется в шумах, фаза изменяется хаотически между соседними каналами. По осям отложены: амплитуда коррелированного сигнала в относительных единицах и фаза в градусах в зависимости от скорости спектральной детали в км/с относительно локального стандарта покоя



**рисунок 18.** Кросскорреляционный спектр мегамазерного излучения NGC3079, полученный между 10-метровым КРТ и 110-метровым радиотелескопом в Грин-Бэнке 14 ноября 2014 года, максимальная проекция базы составила 2.3 диаметра Земли (обозначения осей аналогичны рисунку 17)

#### 4.2. Мазеры в областях звездообразования: Orion KL, W49 N, W3 (OH)

В рамках ключевой научной программы «РАДИОАСТРОН» было обнаружено излучение от очень компактной детали водяного мазера, связанного с ближайшей к нам областью образования массивных звёзд Orion KL. Она расположена на расстоянии около 1370 световых лет от Солнца и является частью комплекса молекулярных облаков в созвездии Ориона. В этом источнике протекают активные процессы звездообразования, сопровождаемые мощным мазерным излучением. Компактная мазерная деталь связана со струйным истечением из аккрецирующегося молодого звёздного объекта. Оценки показывают, что яркостная температура мазерного излучения в этом объекте может превышать  $10^{15}$  К.

Коррелированный сигнал был получен в двух экспериментах в ноябре–декабре 2013 года на базе между космическим радиотелескопом «СПЕКТР-Р» и наземными радиотелескопами в Йебесе (Испания, 40-м), Торуне (Польша, 32-м) и 26-м телескопом около Йоханнесбурга (ЮАР). Проекция базы интерферометра во время наблюдений достигала ~3.5 диаметра Земли, размеры радиоинтерферометрических лепестков – ~63 микросекунды дуги. На расстоянии Orion KL это соответствует линейному размеру примерно в 0.03 астрономической единицы (около трёх диаметров Солнца).

27 апреля 2015 года были проведены новые наблюдения одного из наиболее удаленных источников мазерного излучения в линии водяного пара в Галактике – области звездообразования W49 N, находящейся на расстоянии около 36 тысяч световых лет в спиральном рукаве Персея. Совместно с космическим телескопом в эксперименте принимали участие

несколько наземных телескопов, сигнал на наземно-космической базе был обнаружен двумя наиболее чувствительными наземными антеннами из принявших участие в наблюдениях: 100-метровом телескопе в Эффельсберге (Германия) и 43-метровом телескопе в Йебесе (Испания). Проекция базы интерферометра во время наблюдений достигала ~9.7 диаметров Земли, угловое разрешение составляло рекордные для наблюдений мазеров водяного пара ~23 микросекунды дуги.

В результате переобработки данных экспериментов ранней научной программы с использованием улучшенных алгоритмов был обнаружен интерферометрический отклик в сеансе 2012 года в направлении на комплекс ярких водяных мазеров в направлении W3 (OH).

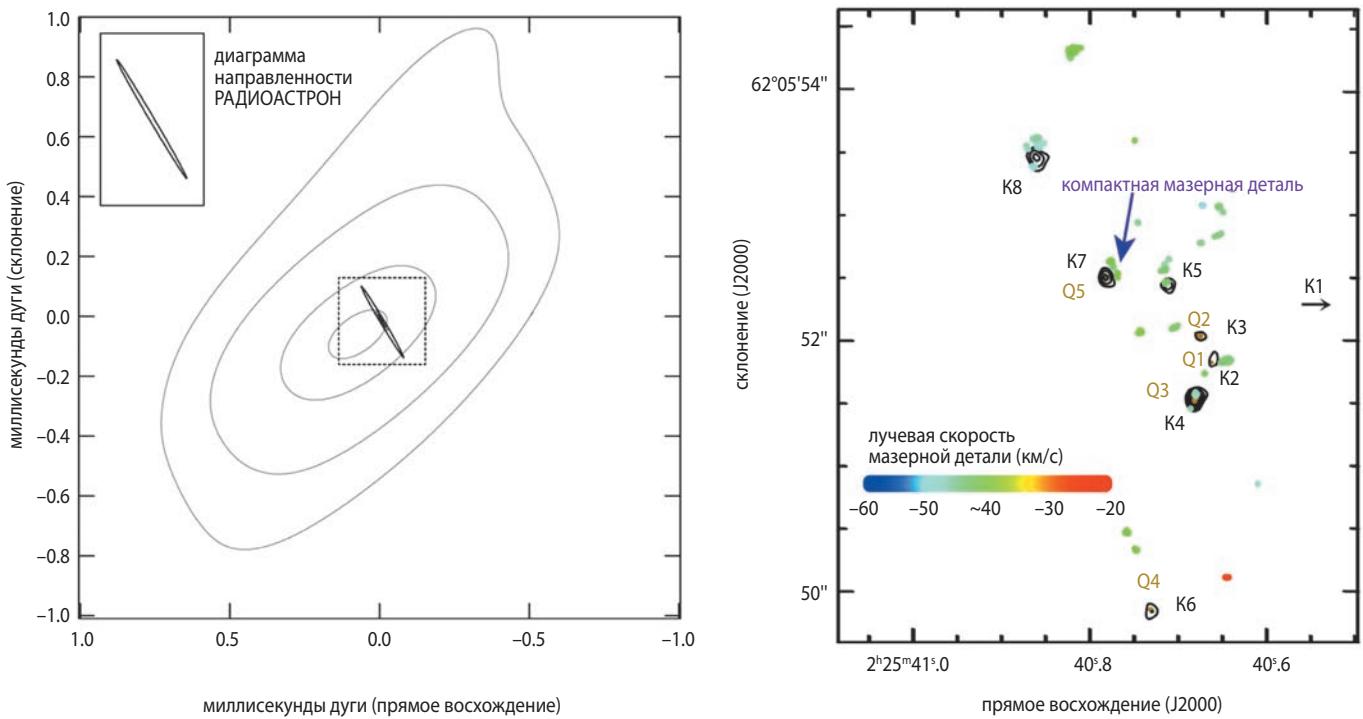
Коррелированный сигнал был зарегистрирован на проекциях базы до 3.8 диаметров Земли между КРТ и наземными антеннами в Эффельсберге и Йебесе, размеры радио-интерферометрических лепестков составляли ~58 микросекунд дуги.

Такие наблюдения позволяют получить оценки яркостных температур и размеров мазерных источников.

#### 4.3. Картографирование водяных мазеров

Представлены результаты картографирования водяных мазеров в области звездообразования W3 IRS5 на наземно-космическом интерферометре «РАДИОАСТРОН» в рамках одной из ключевых научных программ проекта. Наблюдения состоялись 17 октября 2013 года. Совместно с «РАДИОАСТРОНом» в эксперименте принимали участие Европейская РСДБ сеть (EVN), включая российские телескопы системы «Квазар – КВО». Значимый интерференционный сигнал получен до проекции базы в ~6 диаметров Земли. Это позволило достичь углового разрешения в 36 микросекунд дуги. Изображение самой яркой компоненты мазера в W3 IRS5 представлено на рисунке 19, слева. Изображение мазерного пятна, построенное по данным наземных телескопов (серые контуры), имеет протяжённую структуру, за исключением очень компактной детали (чёрные контуры), видимой вплоть до 6 диаметров Земли. Анализ данных «РАДИОАСТРОНа» и японского интерферометра VERA (частное сообщение Х. Имаи) позволил отождествить положение компактных деталей мазера, наблюдавшихся на наземно-космических базах (рисунок 19, справа). Это даёт возможность исследовать структуру и физические характеристики этой области звездообразования и уточнить механизм накачки. В 2015 году в рамках проекта «РАДИОАСТРОН» проведено повторное картографирование мазеров  $\text{H}_2\text{O}$  в этой области звездообразования во

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА



**рисунок 19.** W3 IRS5, слева: контурное изображение самого яркого мазерного пятна в линии H<sub>2</sub>O, зарегистрированного на наземно-космических базах (данные получены во время совместного с европейской РСДБ-сетью, включая станции «Квазар – КВО», сеанса 17 октября 2013 года). Синтезированная диаграмма направленности наземно-космического интерферометра показана в верхнем левом углу изображения. Справа – карта распределения мазерных деталей в W3 IRS5, полученная в наблюдениях японского интерферометра VERA (данные X. Иmai). Коричневые и чёрные контуры показывают распределение яркости 7-мм и 13-мм континуумного излучения. Положение самой яркой из компактных деталей, обнаруженных на «РАДИОАСТРОНе», показано стрелкой

время совместной сессии с участием космического радиотелескопа и наземной сети телескопов EVN с целью получения положения компактных деталей, их размеров, форм и сравнения с данными картографирования 2013 года.

За время работы интерферометра было проведено более 135 наблюдательных сессий, во время которых наблюдалась 19 (7 успешно) мазеров в областях звездообразования в нашей Галактике, 8 мазеров (0 успешно) в оболочках звёзд поздних типов и 4 (2 успешно) внегалактических источника мазерного излучения (всего 31 объект, 10 успешно). В 24 сессиях зарегистрировано мазерное излучение на проекциях баз, заметно превышающих диаметр Земли.

### 4.4. Тонкая пространственная структура мазера H<sub>2</sub>O в глобуле IC 1396 N: диск или джеты?

Глобула IC 1396 N, расположенная на расстоянии 750 пк, была выбрана для исследования со сверхвысоким разрешением. В этой области наблюдается активное образование звёзд промежуточных масс и обнаружены несколько молодых звёздных объектов и молекулярных выбросов. В направлении наиболее яркого молодого звёздного объекта IRAS 21391+5802 (460L<sub>0</sub>) наблюдается сильный мазер H<sub>2</sub>O, монито-

ринг которого выполняется на протяжении более чем 20 лет. Ранее были выполнены несколько интерферометрических исследований мазера H<sub>2</sub>O и получены его изображения с разрешениями 0.5–100 мс. На основе анализа карт мазера предложена модель прецессирующего диска, тем не менее, интерпретация основных данных остается неоднозначной (*Slysh V.I. et al.*, 1999). Ождалось, что наблюдения с более высокими разрешениями (в 3–30 раз), нежели в предыдущих исследованиях, позволят прояснить кинематику и динамику источника.

В 2014 году выполнены пять сессий наблюдений IC 1396 N с космическим телескопом «РАДИОАСТРОН» и сетью наземных телескопов (таблица 5).

В этих наблюдениях источник показал сильную переменность: в июле (во время сессии с самой короткой наземно-космической базой ~2.3 диаметров Земли, угловое разрешение 0.1 мс) максимальная плотность потока от источника, измеренная на одиночном телескопе, составила 5 Ян, а в декабре (в сессии с проекцией наземно-космической базы около 5.1 диаметров Земли, угловое разрешение 0.03 мс) – 51 Ян. Спектр, полученный во второй сессии наблюдений (b) с наилучшим покрытием uv-плоскости, приведён на рисунке 20а.

**таблица 5** – Параметры сессий наблюдений IC 1396 N

код наблюдения	дата	длительность сессии, часы	проекции наземно-космических баз (диаметров Земли)	телескопы, участвовавшие в наблюдениях	плотность потока, измеренная на одиночной антенне, Ян
a	07.2014	3	2.5	Ys, Nt, Sr, Tr, Kl, RA	5
b	10.2014	4	3.8	Ys, Kl, Ef, Tr, RA	12
c	11.2014	1	5.9	Ef, Tr, Kl, Sv, RA	20
d	12.2014	1	5.1	Ef, Sr, Kl, RA	51
e	12.2014	1	3.8	Sr, Tr, Sv, Zc, RA	28

Интерферометрический отклик от источника не был получен на наземно-космических базах. Отсутствие детектирования сигнала на проекциях баз более 2.5 диаметров Земли указывает на нижний предел – размер мазера  $L > 0.3$  а.е. и на верхний предел – яркостная температура  $6.25 \times 10^{12}$  К.

Позиции и потоки мазерных деталей были получены из карт, построенных методом частоты интерференционных лепестков по данным наблюдений на наземных базах. Получена карта мазера H<sub>2</sub>O, указывающая на наличие мощного выброса вещества из протозвёздного объекта. Обнаружены вытянутые по прямой линии четыре новые группы пятен (2–5, центральная часть спектра). При этом группы 2 и 5 совпадают пространственно, а группы 3 и 4 не наблюдались в 1996 году и, возможно, являются джетами, которые сформировались в период 18 лет между наблюдениями 1996 и 2014 годы (рисунок 20б). Сопоставление положений групп деталей 1, 4 и 3, 6 (2014 год) с деталями, наблюдавшимися ранее в 1996 году, а также наличие линейной зависимости скорости от расстояний может означать, что данные группы организованы в два протопланетных кольца (рисунок 20в).

Правильная структура (деталей соответствующих центральной части спектра), которая наблюдалась в 1996 году и интерпретировалась ранее как кеплеровский диск (*Slysh V.I. et al.*, 1999), также детектируется в наблюдениях 2014 года, но имеет меньший поток. Другими словами, на протяжении 18 лет пространственная структура мазера, которой соответствует центральная часть спектра с интервалом скорости примерно 1.5 км/с, сохраняется в масштабе менее 20 миллисекунд дуги, что на расстоянии 750 пк соответствует линейному размеру около 15 а.е.

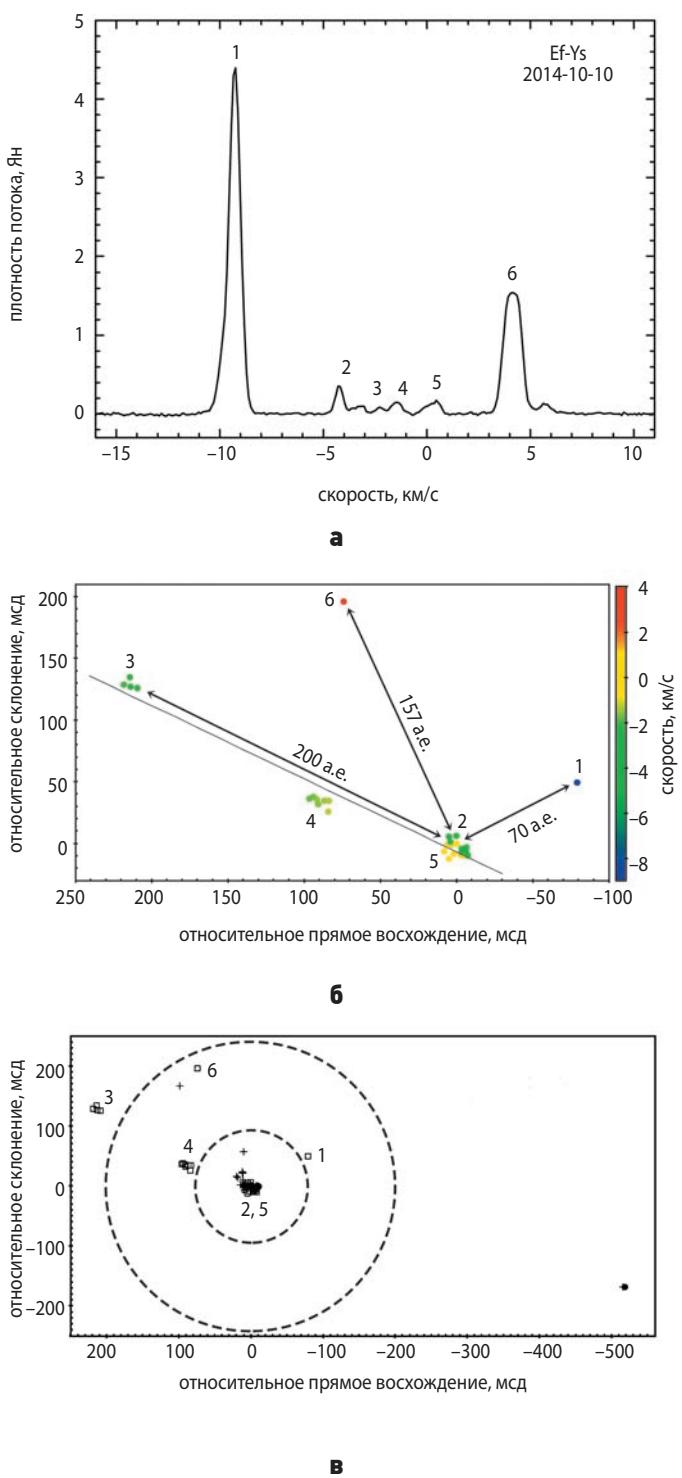
## заключение

Исследование объектов Вселенной с рекордным угловым разрешением позволило научным группам проекта «РАДИОАСТРОН» получить ряд важных научных результатов. Коротко суммируем некоторые из них.

1. Анализ результатов наблюдений квазара 3C273, выполненных на 18, 6 и 1.3 см на проекциях баз, достигающих 171000 км, позволил обнаружить наличие структуры в ядре квазара на масштабах до 26 микросекунд дуги (2.7 световых месяца). Ее яркость оценена на уровне, превышающем  $10^{13}$  К. Аналогичные результаты обнаруживаются для большого количества ядер активных галактик в проводимом обзоре. Это противоречит возможности существования в ядрах данных объектов равенства между плотностью энергии релятивистских частиц и магнитного поля. Полученные экстремальные величины яркости заставляют нас переосмыслить понимание механизма нетеплового излучения ядер квазаров, а также значительно корректируют предыдущие и современные результаты РСДБ-обзоров активных галактик, проводимые на наземных радиоинтерферометрах. Кроме этого, мы сообщаем об открытии эффекта субструктурой рефракционного рассеяния излучения этого квазара на длине волны 18 см.

2. Космические РСДБ-наблюдения квазара TXS 0642+449 (OH 471) с высоким красным смещением, выполненные на длине волны 18 см (частота 1.6 ГГц) в рамках ранней научной программы миссии «РАДИОАСТРОН», были использованы для тестирования работы орбитального КРТ в поляриметрическом режиме наблюдений с целью разработки методологии проведения полностоксовой поляриметрии с космическим РСДБ на частоте 1.6 ГГц и изучения поляризованного излучения наблюдаемого объекта на субмиллисекундных масштабах. Установлено, что амплитуда инструментальной поляризация КРТ на 18 см составляет не более 9%, отражая высокую надёжность поляризационного картографирования с «РАДИОАСТРОНом» на данной длине волны. Получено поляризационное изображение 0642+449 с разрешением 0.8 мсек дуги. Изображение показывает компактную структуру типа ядро-выброс с низким ( $\approx 2\%$ ) уровнем поляризации и преимущественно поперечным магнитным полем в ядерной области. Обнаружена сложная структура ядерной области, с двумя яркими деталями, возможно, соответствующими основанию выброса и сильной реколимационной волне.

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА



**рисунок 20.** **а** – кросскорреляционный спектр (Стокс I), полученный во второй сессии наблюдений 2014 году (наземная база). Цифры над спектральными деталями соответствуют номерам мазерных групп; **б** – новые мазерные пятна – возможные джеты. Карта компонентов мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в IC 1396 N, полученная в данных наблюдениях (наземная база); **в** – возможные протопланетные кольца. Комбинированная карта компонентов мазера  $\text{H}_2\text{O}$  в IC 1396 N, полученных:

- в данных наблюдениях (наземная база) – квадраты;
- в наблюдениях 1996 г. (*Slysh V.I. et al.*, 1999) – чёрные кружки;
- в наблюдениях 1996 г. (*Patel N.A. et al.*, 2000) – крестики

3. Российский КРТ «СПЕКТР-Р» совместно с 15 наземными радиотелескопами из России (сеть «Квазар – КВО»), Европы и США, во время наблюдений активного ядра галактики в созвездии Ящерицы получил изображения на длине волны 1.3 см с самым высоким в истории астрономии угловым разрешением (21 микросекунда дуги). Эти измерения позволили выявить особенности структуры джетов – гигантских струй вещества, которые выбрасывает сверхмассивная чёрная дыра в центре этой галактики, обнаружить в ядре ударную волну и восстановить спиральную структуру магнитного поля.

4. Было проведено картографирование близкой радиогалактики 3C84 на частотах 5 и 22 ГГц. Сигнал наземно-космического интерферометра успешно зарегистрирован для интервала проекций баз интерферометра от 0.2 до примерно 7 диаметров Земли в обоих диапазонах. Впервые удалось явно увидеть контр-джет (выброс на Север) на масштабах субпарсеков. Джет и контр-джет разрешены поперек, угловое разрешение карты составляет примерно 50 микросекунд дуги или 500 радиусов Шварцшильда. Детали в структуре струи у её основания позволяют подробно изучать процесс формирования джета в районе центральной сверхмассивной чёрной дыры и аккреционного диска. Можно видеть уярчение к краям для джета и контр-джета, это важный уникальный результат для понимания природы выброса. Он указывает на стратификацию течения плазмы – эффект, крайне редко видимый в прямых наблюдениях. Заметим, что аналогичный результат виден и при наблюдениях «РАДИОАСТРОНом» струи в квазаре 0836+710. На расстоянии более парсека от ядра 3C84 выделяется пятно, его яркость оказалась экстремальной для такого далекого расстояния от центральной машины галактики. Возможно зарегистрирован эффективный разогрев релятивистской плазмы за счёт взаимодействия с окружающей средой на фронте ударной волны.

5. На максимальных базах интерферометра (50000–250000 км) обнаружена и исследована субструктура диска рассеяния радиоизлучения пульсаров. Такая субструктура обусловлена действием межзвёздного интерферометра с эффективной базой около одной астрономической единицы и с эффективным угловым разрешением лучше миллионной доли угловой секунды. Было показано другими исследователями, что действие этого интерферометра распространяется и на другие радиоисточники (не только пульсары) и позволяет детектировать в этих источниках сверхкомпактные детали структуры. Так, например, был обнаружен компактный источник в центре нашей Галактики.

6. Угловой диаметр кружка рассеяния был измерен для нескольких пульсаров благодаря высокой

разрешающей силе наземно-космического интерферометра «РАДИОАСТРОН». Для этих пульсаров получены оценки локализации рассеивающих слоев межзвездной плазмы; положение этих слоев коррелирует со спиральной структурой Галактики или с конкретными галактическими туманностями.

7. С помощью разработанного нами метода анализа параметров структурных функций мерцаний радиоизлучения пульсаров в спектральной и во временной областях на наземных и наземно-космических базах выявлены близкие к Солнечной системе слои плазмы, которые ранее постулировались для объяснения быстрой переменности компактных внегалактических источников: активных галактических ядер и квазаров.

8 Измеренные параметры корреляционной функции интерферометрического отклика указывают на наличие двух временных шкал в функции отклика среды, что, в свою очередь, свидетельствует о неизотропной структуре неоднородностей межзвездной плазмы, по-видимому, обусловленной влиянием магнитного поля.

9. Наблюдения мазеров воды и гидроксила с помощью «РАДИОАСТРОНа» показали, что яркие детали в галактических областях звездообразования не полностью разрешаются даже на проекциях баз, значительно превышающих диаметр Земли. Рекордное угловое разрешение для мазерных наблюдений на текущий момент, полученное при наблюдениях водяного мазера в W49N, составляет 23 микросекунды дуги (соответствует проекции базы в 9.7 диаметра Земли).

10. Очень компактные мазерные детали с угловыми размерами в 20–60 микросекунд дуги обнаружены в нескольких областях звездообразования. Это соответствует линейным размерам в 5–10 млн. километров (несколько солнечных диаметров). В ряде источников обнаружены множественные компоненты сверхмалого размера, что закладывает основу для исследования внутренней кинематики областей звездообразования.

11. Оценки наблюдаемых яркостных температур лежат в диапазоне от нескольких единиц  $\times 10^{12}$  до  $10^{16}$  К. При этом в наблюдавшихся источниках на космических базах наблюдается существенная потеря потока. Это свидетельствует о том, что в окрестностях сверхкомпактных компонент присутствуют более протяженные области мазерного излучения, дающие значительный вклад в общий поток.

Проект «РАДИОАСТРОН» осуществляется АКЦ ФИАН и НПО имени С.А. Лавочкина по контракту с Российским космическим агентством совместно с многими научно-техническими организациями в России и других странах. Представленные результаты частично основаны на наблюдениях, выполненных

на радиотелескопах ИПА РАН. Представленные исследования частично основаны на результатах наблюдений радиотелескопа РТ-70 Евпатория (Украина), проведенных радиоастрономическим институтом Национальной Академии наук Украины по контракту с Государственным космическим агентством Украины и Национальным центром управления и испытаний космических средств при технической поддержке АКЦ ФИАН. Результаты оптических позиционных измерений КА «Спектр-Р» глобальной сетью телескопов МАСТЕР (*Lipunov V. et al.*, 2010), коллaborацией ISON и Коуровской обсерваторией использовались для высокоточного восстановления орбиты аппарата в дополнение к стандартным средствам миссии. Результаты частично получены на основе наблюдений со 100-м телескопом института Радиоастрономии общества Макса Планка (MPIfR) в Эффельберге, с телескопами Медичина, Ното, Сардиния, управляемых INAF. Европейская РСДБ сеть является совместным проектом независимых Европейских, Африканских, Азиатских и Североамериканских радиоастрономических институтов. Национальная радиоастрономическая обсерватория США является средством национального научного фонда США и управляется согласно контракта с Associated Universities, Inc. Обсерватория Аресибо управляется SRI International согласно контракта с национальным научным фондом США (AST-1100968), совместно с Ana G. Mendez-Universidad Metropolitana и Universities Space Research Association. Телескопы Австралийской РСДБ-решётки являются частью Australia Telescope National Facility, которая финансируется Commonwealth of Australia и управляется CSIRO.

*Представленные научные исследования частично поддержаны Программой фундаментальных исследований Президиума РАН П-7, подпрограмма «Переходные и взрывные процессы в астрофизике», грантом РФФИ 13-02-12103.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Андианов А.С., Гирин И.А., Жаров В.Е., Костенко В.И. и др. Корреляционная обработка данных наземно-космического интерферометра «РАДИОАСТРОН» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3, С. 55-59.

Бургин М.С., Войцук П.А., Кутъкин А.М., Лисаков М.М. и др. Управление и контроль функционирования бортового комплекса научной аппаратуры космического радиотелескопа // Космические исследования. 2015. 53. С. 199-206.

Заславский Г.С., Степаньянц В.А., Тучин А.Г., Погодин А.В. и др. Коррекция траектории движения космического аппарата «СПЕКТР-Р» // Космические исследования. 2014. 52. С. 387-398.

## «РАДИОАСТРОН»: ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЗА 5 ЛЕТ ПОЛЁТА

Захваткин М.В., Пономарев Ю.Н., Степаньянц В.А., Тучин А.Г. и др. Навигационное обеспечение научной миссии «РАДИОАСТРОН» // Космические исследования. 2014. 52. С. 376-386.

Каневский Б.З., Смирнов А.И., Сазанков С.В., Белогусов К.Г. и др. Наземная станция слежения. Проект «РАДИОАСТРОН» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 47-54.

Кардашев Н.С., Алакоз А.В., Ковалев Ю.Ю., Попов М.В. и др. «РАДИОАСТРОН»: итоги выполнения ранней научной программы исследований объектов Вселенной со сверхвысоким угловым разрешением // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 4-11.

Кардашев Н.С., Хартов В.В., Абрамов В.В., Авдеев В.Ю. и др. «РАДИОАСТРОН» – телескоп размером 300000 км: основные параметры и первые результаты наблюдений // Астрономический Журнал. 2013. 90. С. 179-222.

Ковалев Ю.А., Васильков В.И., Попов М.В., Согласнов В.А. и др. Проект «РАДИОАСТРОН». Измерения и анализ основных параметров космического телескопа в полете в 2011–2013 гг. // Космические исследования. 2014. 52. С. 430-439.

Пашенко И.Н., Ковалев Ю.Ю., Войцук П.А. Первая оценка величины инструментальной поляризации космического радиотелескопа «РАДИОАСТРОН» по результатам ранней научной программы наблюдений активных ядер галактик // Космические исследования. 2015. 53. С. 214-224.

Рудницкий А.Г., Каруппусами Р., Попов М.В., Согласнов В.А. Исследование космической плазмы по данным РСДБ-наблюдений гигантских импульсов пульсара B0531+21 в проекте «РАДИОАСТРОН» // Астрономический Журнал. 2016. 93. С. 167-176.

Хартов В.В., Ширшаков А.Е., Артиухов М.И., Казакевич Ю.В. и др. Особенности управления миссией «РАДИОАСТРОН» // Космические исследования. 2014. 52. С. 360-365.

Bruni G., Anderson J.M., Alef W., Lobanov A. et al. Space-VLBI with RADIOASTRON: new Correlator Capabilities at MPIfR // 2014. Proceedings of Science, EVN 2014. id. 119.

Cordes J.M., Lazio T.J.W. NE2001. II. Using Radio Propagation Data to Construct a Model for the Galactic Distribution of Free Electrons // Astrophys/0301598. 2003. P. 1-41.

Duev D.A., Zakhvatkin D.A., Stepanyants V.A., Calves G.M. et al. RADIOASTRON as a Target and as an Instrument: Enhancing the Space VLBI Mission's Scientific Output // Astronomy & Astrophysics. 2015. 573. id. 99.

Ford H.A., Anderson R., Belousov K., Brandt J.J. et al. The RADIOASTRON Green Bank Earth Station // Proceedings of the SPIE. 2014. 9145. id. 91450B. 11 p.

Gomez J.L., Lobanov A.P., Bruni G., Kovalev Y.Y. et al. Probing the Innermost Regions of AGN Jets and Their

Magnetic Fields with RADIOASTRON. I. Imaging BL Lacertae at 21 Microarcsecond Resolution // Astrophysical Journal. 2016. 817. id. 96.

Gwinn C.R., Popov M.V., Bartel N., Andrianov A.S. et al. PSR B0329+54: Statistics of Substructure Discovered within the Scattering Disk on RADIOASTRON Baselines of up to 235,000 km // Astrophysical Journal. 2016. 822. id. 96.

Hankins T.H., Jones G., Eilek J.A. The Crab Pulsar at Centimeter Wavelengths. I. Ensemble Characteristics // Astrophysical Journal. 2015. 802, issue 2. id. 130.

Hill A.S., Stinebring D.R., Barnor H.A., Berwick D.E. et al. I. Frequency Dependence // Astrophysical Journal. 2003. 599. P. 457-464.

Johnson M.D., Kovalev Y.Y., Gwinn C.R., Gurvits L.I. et al. Extreme Brightness Temperatures and Refractive Substructure in 3C273 with RADIOASTRON // Astrophysical Journal Letters. 2016. 820. P. L10.

Karuppusamy R., Stappers B.W., van Straten W. Giant pulses from the Crab pulsar. A wide-band study // Astronomy & Astrophysics. 2010. 515. A36.

Kovalev Y.Y., Kardashev N.S., Kellermann K.I., Lobanov A.P. et al. RADIOASTRON Observations of the Quasar 3C273: a Challenge to the Brightness Temperature Limit // Astrophysical Journal Letters. 2016. 820. P. L9.

Lipunov V., Kornilov V., Gorbovskoy E. et al. Master Robotic Net // Advances in Astronomy. 2010. 349. P. 171-175

Lobanov A.P., Gomez J.L., Bruni G., Kovalev, Y.Y. et al. RADIOASTRON Space VLBI Imaging of Polarized Radio Emission in the High-Redshift Quasar 0642+449 at 1.6 GHz // Astronomy & Astrophysics. 2015. 583. id. 100.

Patel N.A., Greenhill L.J., Herrnstein J., Zhang Q. et al. Proper Motion of Water Masers Associated with IRAS 21391+5802: Bipolar Outflow and an AU-Scale Dusty Circumstellar Shell // Astrophysical Journal. 2000. 538. P. 268-274.

Slysh V.I., Val'tts I.E., Migenes V., Fomalont E. et al. Protoplanetary Disk and/or Bipolar Outflow Traced by H<sub>2</sub>O Masers in IC 1396N // Astrophysical Journal. 1999. 526. P. 236-241.

Smirnova T.V., Shishov V.I., Popov M.V., Gwinn C.R., Anderson J.M. et al. RADIOASTRON Studies of the Nearby, Turbulent Interstellar Plasma with the Longest Space-Ground Interferometric Baselines // Astrophysical Journal. 2014. 786. id. 115.

Stinebring D.R., McLaughlin M.A., Becker K.M., Espinoza Goodman J.E. et al. Faint Scattering Around Pulsars: Probing the Interstellar Medium on Solar System Size Scales // Astrophysical Journal. 2001. 549. P. L97-L100.

Zou W.Z., Hobbs G., Wang N., Manchester R.N. et al. Timing measurements and proper motions of 74 pulsars using the Nanshan radio telescope // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 2005. 362. P. 1189-1198.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016 г.

# БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН». ПЯТЬ ЛЕТ ПОЛЁТА

Г.С. Заславский<sup>1</sup>,  
кандидат физико-математических  
наук, [zaslav@kiam1.rssi.ru](mailto:zaslav@kiam1.rssi.ru);  
G.S. Zaslavskiy

А.Г. Тучин<sup>1</sup>,  
доктор физико-математических  
наук, [tag@kiam1.rssi.ru](mailto>tag@kiam1.rssi.ru);  
A.G. Tuchin

М.В. Захваткин<sup>1</sup>,  
кандидат физико-математических  
наук, [zmaxus@gmail.com](mailto:zmaxus@gmail.com);  
M.V. Zakhvatkin

В.А. Шишов<sup>1</sup>,  
кандидат физико-математических  
наук, [shishov@kiam1.rssi.ru](mailto:shishov@kiam1.rssi.ru);  
V.A. Shishov

*В статье рассматривается баллистико-навигационное обеспечение в проекте «РАДИОАСТРОН». В этом проекте космический радиотелескоп, установленный на борту космического аппарата «СПЕКТР-Р», совместно с наземными радиотелескопами позволяет проводить наблюдения радиоисточников с очень высоким угловым разрешением. Рассмотрены вопросы выполнения наземных траекторных измерений, навигационного обеспечения управления полётом и обеспечения научных экспериментов, а также коррекции траектории движения.*

*Ключевые слова:*  
космический аппарат;  
«СПЕКТР-Р»; «РАДИОАСТРОН»;  
баллистика; навигация.

## введение

18 июля 2015 года исполнилось пять лет со дня запуска космического радиотелескопа (КРТ) в составе космического аппарата (КА) «СПЕКТР-Р» на высокоапогейную орбиту искусственного спутника Земли. В проекте «РАДИОАСТРОН» КРТ совместно с наземными радиотелескопами представляет собой наземно-космический радиointерферометр, позволяющий проводить наблюдения радиоисточников с очень высоким угловым разрешением (Кардашев Н.С. и др., 2014).

В ходе полёта КА «СПЕКТР-Р» баллистический центр (БЦ) Института прикладной математики имени М.В. Келдыша РАН (ИПМ) выполнил работы, необходимые для его навигационного и баллистического обеспечения, функционирования наземных систем управления полётом и выполнения научной программы полёта, включая:

# BALLISTICS-NAVIGATION SUPPORT OF THE SPACECRAFT FLIGHT CONTROL AND IMPLEMENTATION OF «RADIOASTRON» PROGRAM SCIENTIFIC PROGRAM. 5 YEARS OF FLIGHT

В.А. Степаньянц<sup>1</sup>,  
кандидат физико-математических  
наук, [vic-stepan@rambler.ru](mailto:vic-stepan@rambler.ru);  
V.A. Stepanyants

*The article presents ballistic-navigation support for «RADIOASTRON» program. In the frame of this program the space radio telescope accommodated onboard of «SPEKTR-R» spacecraft jointly with ground radio telescopes allow observations of radio sources with very high angular resolution. Issues of performance of ground trajectory measurements, navigation support of flight control, scientific experiments support as well as correction of motion trajectories are considered.*

*Key words:*  
spacecraft;  
«SPEKTR-R»; «RADIOASTRON»;  
ballistics; navigation.

- определение по данным поступающих измерений текущих параметров движения КА;
- анализ выполнения необходимых условий полёта и расчёт параметров коррекции траектории;
- долгосрочное прогнозирование, необходимое для планирования научных экспериментов;
- расчёт начальных условий для закладки навигационной информации на борт аппарата;
- выдачу целеуказаний для наземных станций наблюдения;
- повторную обработку траекторных измерений с использованием данных телеметрии («реконструкцию орбиты»), необходимую для обеспечения повышенной точности при выполнении научной программы.

<sup>1</sup> ИПМ имени М.В. Келдыша РАН, Россия, Москва.

# БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН». ПЯТЬ ЛЕТ ПОЛЁТА

В настоящее время проведена обработка и анализ различных видов поступивших в БЦ ИПМ измерений КА, в том числе:

- радиотехнических измерений наклонной дальности и радиальной скорости полученных наземными станциями «Клён-Д» (антенна П-2500) в Уссурийске – 376 сеансов и «Кобальт» (антенна ТНА-1500) в Медвежьих Озёрах – 711 сеансов;
- беззапросных измерений радиальной скорости, полученных аппаратурой высокоскоростного информационного радиокомплекса (ВИРК) на частотах 8.4 и 15 ГГц на станциях наблюдения в Пущино – 2102 сеансов и Грин Бэнк (США, штат Вирджиния) – 914 сеансов;
- беззапросных измерений радиальной скорости, полученных с использованием аппаратуры Cortex в Медвежьих Озёрах (антенны ТНА-1500) – 245 сеансов;
- угловых оптических измерений прямого восхождения и склонения КА, проведённых на 33 телескопах сети обсерваторий – 1490 сеансов;
- лазерных измерений дальности, полученных от Специализированного лазерного оптического локатора контроля космического пространства (ЛОЛ ККП) на Северном Кавказе – 31 сеанс и французской станции лазерной локации «Grass» – 14 сеансов.

По данным этих измерений регулярно выполнялось определение в инерциальной системе координат (СК) текущих кинематических параметров (компонентов векторов положения и скорости КА) траектории движения КА и прогнозирование значений этих параметров на заданные моменты времени с целью баллистико-навигационного обеспечения управления полётом КА и выполнения научной программы.

21 февраля и 1 марта 2012 года посредством двух включений двигательной установки (ДУ) была успешно проведена коррекция орбиты. На протяжении всего полёта КА регулярно для текущей траектории проводился расчёт времени баллистического существования интервалов времени и степени затенения спутника Землёй (Луной) с целью выявления нарушения условий его полёта. Траектория КА, сформированная в результате проведённой коррекции, до настоящего времени удовлетворяет необходимым требованиям к полёту аппарата.

## 1. Навигация

Управление полётом КА и планирование научной программы работы КРТ выполняется в соответствии с результатами решения баллистических задач определения (по измерениям) и прогнозирования параметров движения КА с использованием современных моделей движения аппарата и методов обработки из-

мерений (*Навигация..., 2016*). Необходимая при этом точность решения этих задач достигается без учёта отличительных свойств КА, таких, как, его форма, ориентация, режимы работы бортовых систем на участках пассивного полёта.

Навигационная привязка научных измерений, а также краткосрочное прогнозирование параметров движения КА, необходимого для высокоточного наведения крупных радиотелескопов и проведения лазерных измерений, предъявляют более жёсткие требования по точности определения и прогнозирования движения КА.

Необходимую точность навигации в этом случае невозможно обеспечить без учёта конструктивных особенностей КА «СПЕКТР-Р» и происходящих на борту процессов, влияющих на движение центра масс (ЦМ) КА. Основным источником неопределённости при построении модели движения КА «СПЕКТР-Р» является давление солнечной радиации. Наличие 10-метровой антенны КРТ на борту аппарата увеличивает отношение эффективной площади сечения КА к его массе и, тем самым, усиливает влияние светового давления на движение ЦМ аппарата. Из-за сложной формы и неоднородности отражающих свойств элементов поверхности КА совокупное ускорение от светового давления не направлено строго от Солнца и существенно зависит от изменяющейся в ходе полёта ориентации КА. Помимо влияния на движение ЦМ, световое давление создаёт возмущающий момент. Заданная ориентация аппарата поддерживается системой ориентации и стабилизации, реализованной с использованием комплекса управляемых двигателей-маховиков. Поэтому длительное воздействие возмущающих моментов одного направления приводит к постоянному увеличению угловой скорости двигателей-маховиков (ДМ), что, в свою очередь, вызывает необходимость их разгрузки – уменьшения угловой скорости вращения, сопровождающейся включением реактивных двигателей системы стабилизации. В ходе разгрузки, длящейся, как правило, 1–2 минуты и состоящей из нескольких десятков включений двигателей стабилизации (ДС), скорость центра масс КА изменяется на 2–4 мм/с. За сутки происходит от одной до трёх разгрузок. В задачах реконструкции и краткосрочного прогнозирования движения упрощённая модель движения, не учитывающая описанные выше возмущения, приводит к недопустимо большим навигационным ошибкам.

### 1.1. Измерения

Для определения параметров движения КА «СПЕКТР-Р» используются три вида измерений – радиотехнические измерения дальности и радиальной скорости, лазерные измерения дальности и астро-

метрические измерения положения КА на небесной сфере. Штатные средства навигационной системы управления (НСУ) проводят радиотехнические измерения двумя указанными выше командными измерительными станциями в С-диапазоне частот (Заславский Г.С., Захваткин М.В. и др., 2014).

В течение полёта две станции слежения, оснащённые аппаратурой высокоскоростного информационного радиокомплекса, проводят приём научной информации с использованием антенны РТ-22 в Пущино и 43-метровой антенны, расположенной в обсерватории Green Bank, США. Трансляция сигнала бортом производится при помощи остронаправленной антенны (ОНА), наводящейся на одну из станций слежения. Полезный сигнал транслируется на частоте 15 ГГц, вместе с ним передаётся немодулированная частота 8.4 ГГц. Основную часть времени опорная частота для сигналов ВИРК генерируется бортовым водородным стандартом. В редких случаях во время наблюдения КРТ или проведения экспериментов по измерению гравитационного красного смещения опорный сигнал транслируется станцией слежения. Аппаратура, установленная на станциях слежения, позволяет проводить измерения частоты сигналов ВИРК с периодом 0.04 секунды. Из полного потока измерений формируются нормальные места, представляющие собой измерения радиальной скорости, среднеквадратическая ошибка (СКО) которых при интервале осреднения 1 минута варьируется от 0.02 мм/с до 0.1 мм/с в зависимости от условий приёма и характеристик стандартов частоты станций слежения. В пределах диаграммы направленности ОНА сигналы ВИРК, поступающие с КА, могут одновременно принимать несколько радиообсерваторий, привлекаемых к работе наряду с упомянутыми выше основными станциями слежения. Как показал опыт (Duev D.A. et al., 2015), использование при решении задачи определения параметров орбиты сеансов таких комплексных измерений существенно повышает точность навигации.

Аппаратура станций НСУ в Медвежьих Озёрах и Уссурийске позволяет получать измерения радиальной скорости, принимая сигнал 8.4 ГГц, поступающий с борта КА. Такие измерения регулярно проводятся на станции в Медвежьих Озёрах при наведении ОНА на станцию слежения в Пущино и в качестве эксперимента были проведены в Уссурийске.

Наиболее точным источникам траекторной информации являются измерения лазерной дальномерии, проведение которых стало возможным благодаря установленному на борту КА «СПЕКТР-Р» массиву уголковых отражателей. Такие измерения имеют

очень высокую точность и практически свободны от систематических ошибок, СКО единичных измерений дальности (до осреднения) в проведённых сеансах достигало значений 18 мм. Возможность проведения лазерных измерений дальности КА «СПЕКТР-Р» ограничена рядом обстоятельств, среди которых малое число станций, способных работать на окололунных расстояниях, сильная зависимость от погодных условий, а также необходимость определённой ориентации КА, которую не всегда можно построить. Названные обстоятельства не позволяют проводить лазерную дальномерию достаточно часто для повышения точности навигационного обеспечения всех научных экспериментов. Тем не менее, проведённые сеансы позволили осуществить калибровку измерений дальности штатных радиотехнических средств, улучшив таким образом точность реконструкции орбиты КА для всех сеансов наблюдения КРТ. За прошедшие пять лет полёта успешно провести измерения удалось двум станциям: ЛОЛ ККП на Северном Кавказе в России и в обсерватории ОСА в Грассе во Франции. Максимальное расстояние, на котором принять удалось отражённый сигнал, составило более 337 тыс. км.

Помимо лазерных измерений дальности, в оптическом диапазоне проводятся астрометрические измерения прямого восхождения и склонения КА относительно осей инерциальной СК. Астрометрические измерения КА «СПЕКТР-Р» могут проводиться при помощи телескопов с небольшим апертурным диаметром, что позволило привлечь к наблюдениям обширную сеть телескопов и организовать регулярное поступление измерений в баллистический центр. Большая часть угловых оптических измерений получена сетью НСОИ АФН (Молотов И.Е. и др., 2009), а также средствами, привлекаемыми АКЦ ФИАН, в том числе обсерваториями проекта МАСТЕР и Коуровской обсерваторией УрФУ. Точность полученных угловых оптических измерений, как правило, не хуже 1 угл. с, что позволяет эффективно использовать их в задачах оперативной навигации. Совместное использование оптических измерений с измерениями дальности и радиальной скорости позволяет определять орбиту на более коротких мерных интервалах и избежать накопления ошибок, вызванных неточностью принятой модели движения.

В таблице 1 приведён полный список оптических средств проводивших наблюдения КА «СПЕКТР-Р» с указанием количества ночных наблюдения и числа полученных измерений. В таблице 2 содержатся данные о количестве полученных сеансов различных видов измерений по годам полёта.

# БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН». ПЯТЬ ЛЕТ ПОЛЁТА

**таблица 1** – Статистика проведения наблюдений оптическими средствами

обсерватория (телескоп)	ночей	измерений
Китаб ОРИ-40	320	4800
Краснодар (КубГУ)	316	9485
Мейхилл (MPC:H06)	138	2772
Монды	103	2751
Сайдинг Спринг (MPC:Q62)	102	1445
МАСТЕР-Кисловодск (MPC:C41)	99	878
Благовещенск ОРИ-25	79	1183
Мейхилл (MPC:H15)	54	426
Евпатория	51	2411
Научный-1 АТ-64	51	2929
Коуровская (MPC:168)	38	922
Ужгород	31	889
КрАО РН-1	24	1718
Научный-2, ЭОП-1.3 САНТЕЛ-250	15	300
Монды (АЗТ-33)	13	440
Циммервальд ZIMSPACE	9	179
КрАО Zeiss-600	9	1175
Кисловодск (25см)	8	214
Бюракан ОРИ-25	7	115
Мильково	3	104
Абастумани ОРИ-22	3	14
Научный-2 ЭОП-1.3 ОРИ-40	2	26
Терскол	2	57
Научный-2 ЭОП-1.4 САНТЕЛ-250	2	38
Циммервальд	2	18
Уссурийск (25 см)	2	19
Кисловодск (40 см)	2	32
Тирасполь SRT-220	1	2
Кисловодск ОРИ-40	1	11
Лесосибирск ОРИ-22	1	3
КрАО ЗТШ	1	225
Звенигород	1	14

**таблица 2** – Статистика сеансов различных типов измерений, проведённых с момента запуска по июнь 2016 года

измерительный пункт	год					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
<b>радиотехнические измерения</b>						
Медвежьи Озёра	135	229	103	91	107	55
Уссурийск	89	94	92	57	35	10
<b>беззапросные измерения ВИРК</b>						
Пущино	34	272	540	447	582	262
Грин-Бэнк			153	378	232	151
Медвежьи Озёра			47	46	103	56
<b>лазерные измерения</b>						
ЛОЛ ККП, Кавказ	1	6	7	13	4	
ОСА, Грасс	4	7			1	3
<b>угловые оптические измерения</b>						
обсерватории	124	310	244	243	395	174

## 1.2. Определение орбиты КА для обеспечения работы НСУ и управления его полётом

Для навигационного обеспечения задач полёта, не предъявляющих высоких требований к точности, используется модель пассивного движения околоземного КА. В правых частях уравнений движения учитываются следующие источники возмущений:

- влияние нецентрального гравитационного поля Земли, представленного в форме разложения потенциала по сферическим функциям с коэффициентами модели EGM-96 (*Lemoine F.G. et al.*, 1998) до степени и порядка 75;
- изменение гравитационного поля Земли, вызванное её деформацией под действием гравитации Луны и Солнца («твёрдые приливы») (*Eanes R. et al.*, 1983);
- гравитационное влияние Луны и Солнца, координаты которых вычисляются на основе теории движения DE421 (*Lemoine F.G. et al.*, 1998);
- влияние давления солнечного излучения при использовании однородной сферы в качестве модели поверхности аппарата (*Справочное..., 1976*);
- на участках траектории аппарата ниже 1500 км учитывается влияние атмосферы, плотность которой определяется на основе динамической модели (*ГОСТ Р 25645.166-2004*, 2004).

В рамках этой модели влияние на движение центра масс КА возмущающих ускорений, возникающих в результате разгрузки ДМ, не учитывается. Влияние давления солнечной радиации учитывается в упрощённом виде: направление вектора ускорения совпадает с направлением от Солнца, а его величина пропорциональна коэффициенту, включённому в состав уточняемых параметров. Определение коэффициента светового давления вместе с шестью фазовыми параметрами КА происходит в ходе статистической обработки траекторных измерений методом максимального правдоподобия (*Аким Э.Л., Энеев Т.М.*, 1963). Использование этого метода в применении к решению задачи определения параметров орбиты современных КА описывается в статье (*Гордиенко Е.С. и др.*, 2016).

## 1.3. Навигационное обеспечение научных экспериментов

Наблюдение радиоисточников с использованием наземно-космического интерферометра и корреляционная обработка полученных данных требуют знания с высокой точностью векторов координат, скорости и ускорения КРТ. Ошибки определения параметров движения не должны превышать 600 м по положению, 2 см/с – по скорости и  $10^{-8}$  м/с<sup>2</sup> – по ускорению. Для достижения требуемой точности необходимо

учитывать возмущения движения центра масс КА, вызванные работой двигателей стабилизации, а также влияние давления солнечной радиации, зависящего от ориентации аппарата, неоднородности отражающих свойств и сложной формы его поверхности.

Для более точного описания возмущений от давления солнечного излучения используется параметризованная аналитическая модель, основанная на конечно-элементной модели поверхности КА. Параметрами модели возмущения выступают средние коэффициенты отражения  $\alpha_1$  и зеркальности  $\mu_1$  поверхности КА, покрытой экранно-вакуумной теплоизоляцией, а также коэффициент отражения  $\alpha_2$  поверхности панелей солнечных батарей аппарата. Ориентация аппарата относительно Солнца определяется данными о кватернионах ориентации КА в инерциальном пространстве, полученными на борту и переданными в составе телеметрической информации (ТМИ) на Землю. Интервалы времени длительностью более 15 минут, не покрытые данными ТМИ об ориентации КА, заполняются плановыми значениями ориентации, утверждёнными группой управления.

Предполагается, что на исследуемом интервале времени известны моменты времени включений ДС  $(t_{i,1}, \dots, t_{i,N_i})^n_{i=1}$  для разгрузки накопленного кинетического момента, индекс  $i$  соответствует номеру разгрузки, а индексы  $1, \dots, N_i$  определяют номер включения в рамках  $i$ -й разгрузки. Длительность разгрузки существенно меньше интервала уточнения орбиты, поэтому возмущение от разгрузки представляется усредненным вектором приращения скорости ЦМ КА.

$$\Delta \mathbf{V}_i = \sum_{j=1}^{N_i} \mathbf{e}_j \Delta v_{ij} \text{ в момент времени } t_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_i} t_{ij} \Delta v_{ij}}{\sum_{j=1}^{N_i} \Delta v_{ij}},$$

где  $\Delta v_{ij}$  – величина приращения скорости КА в результате  $j$ -го включения ДС в  $i$ -й разгрузке, рассчитываемая по данным ТМИ;  $\mathbf{e}_{ij}$  – единичный вектор направления тяги ДС в ходе этого включения. Возмущение движения КА на всем интервале представляется набором векторов приращения скорости центра масс КА  $\Delta \mathbf{V}_i$ , произошедших в известные моменты времени  $t_i = t_i(t_{i,1}, \dots, t_{i,N_i})$ . Компоненты векторов  $\Delta \mathbf{V}_i$  входят в число уточняемых параметров.

Совокупная информация о модели движения, используемой для навигационного обеспечения научных экспериментов, приведена в таблице 3. Более подробное описание модели возмущений от разгрузок ДМ и давления солнечного излучения КА «СПЕКТР-Р» дано в работе (Захваткин М.В. и др., 2014).

**таблица 3** – Описание модели движения КА «СПЕКТР-Р», используемой для навигационного обеспечения научных экспериментов проекта «РАДИОАСТРОН»

гравитационные возмущения	
геопотенциал	EGM-96 до степени/порядка 75
гравитационные центры	Луна, Солнце и планеты по эфемеридам DE-421 ( <i>Folkner W.M. et al.</i> , 2009)
твёрдые приливы	от Луны и Солнца, постоянное число Лява ( <i>Eanes R. et al.</i> , 1983)
эффекты общей теории относительности	в соответствии с рекомендацией Международной службы вращения Земли (IERS 2010) ( <i>Estabrook F.B.</i> , 1969)
негравитационные возмущения	
давление солнечного излучения	3-параметрическая модель с учётом ориентации
излучение Земли	постоянные коэффициенты альбедо (18x9) ( <i>Klocke P.C. et al.</i> , 1988)
торможение в атмосфере	модель плотности ГОСТ Р 25645.166-2004
разгрузки двигателей маховиков	
направление $\Delta \mathbf{V}_i$	направление оси $OX$ связанной СК, ориентация по данным БКУ или файлу планируемой ориентации
величина $\Delta \mathbf{V}_i$	данные о длительности включений ДС, априорные данные о тяге

Использование описанной модели приводит к значительному возрастанию размерности вектора уточняемых параметров. Помимо шести фазовых параметров, он включает три параметра светового давления и  $3n$  параметров возмущений от разгрузок

$$\mathbf{Q} = \{\mathbf{X}_0(t_0), \alpha_1, \mu_1, \alpha_2, \Delta \mathbf{V}_1, \dots, \Delta \mathbf{V}_n\},$$

где  $\mathbf{X}_0(t_0)$  – вектор состояния КА, отражающий положение и скорость в инерциальной СК, на начальный момент времени  $t_0$ .

Для компенсации роста числа уточняемых параметров в задачу вводится дополнительная информация. Помимо наземных траекторных измерений, привлекаются бортовые измерения. К ним относятся уже упомянутые данные о включениях ДС. Известная длительность включения и априорная информация о тяге двигателей преобразуются в импульс, сообщённый КА в ходе кратковременной работы ДС. Суммирование по всем включением ДС во время разгрузки позволяет получить оценку  $\Delta \mathbf{V}_i$  неизвестного приращения скорости и использовать её в качестве измерения (Захваткин М.В., 2014).

Вторым важным источником бортовых измерений являются измерения скоростей вращения ДМ, характеризующие текущий накопленный на борту ки-

# БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН». ПЯТЬ ЛЕТ ПОЛЁТА

нетический момент. Так как аппарат большую часть времени находится в неизменной ориентации, то изменение накопленного ДМ кинетического момента может быть интерпретировано как измерение возмущающего момента. Возмущающий момент, в свою очередь, главным образом обусловлен световым давлением, и его расчётное значение зависит от коэффициентов модели  $\alpha_1$ ,  $\mu_1$  и  $\alpha_2$ . Измерение момента позволяет получить дополнительную информацию о коэффициентах давления солнечного излучения (Захваткин М.В., 2014). Пример сопоставления измеренных значений проекции возмущающего момента на одну из осей и расчётных аналогов, зависящих от уточняемых коэффициентов, приведён на рисунке 1. Хорошее согласование измеренных и расчётных значений указывает на то, что описанная модель влияния светового давления адекватно представляет возмущения движения как центра масс, так и относительно центра масс аппарата.

Использование улучшенной модели движения КА «СПЕКТР-Р» и привлечение дополнительной информации в виде бортовых измерений импульсов включений ДС и внешнего возмущающего момента позволили получить необходимые характеристики точности реконструированной орбиты и навигационную привязку научных наблюдений. В качестве примера, характеризующего согласование измерений с построенной моделью, на рисунке 2 представлены отклонения измеренных и расчётных значений для различных видов измерений.

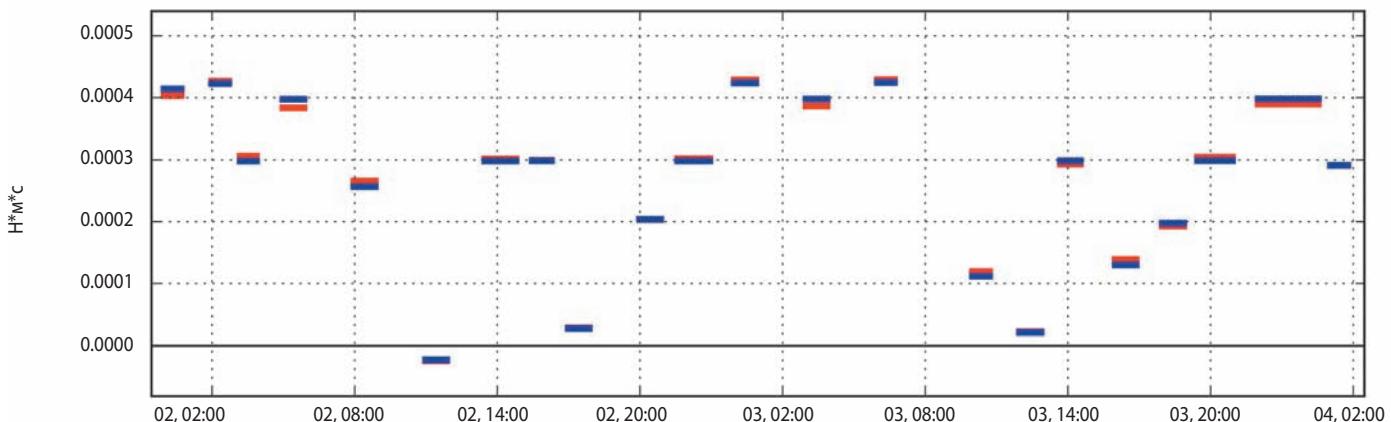
Наиболее значимым подтверждением достижения необходимой точности является накопленная за пять лет полёта в АКЦ ФИАН статистика успешной корреляции наблюдений КРТ и наземных радиообсерваторий.

Для получения независимых апостериорных оценок точности реконструкции орбиты КА «СПЕКТР-Р» были сопоставлены положения и скорости КА, рас-

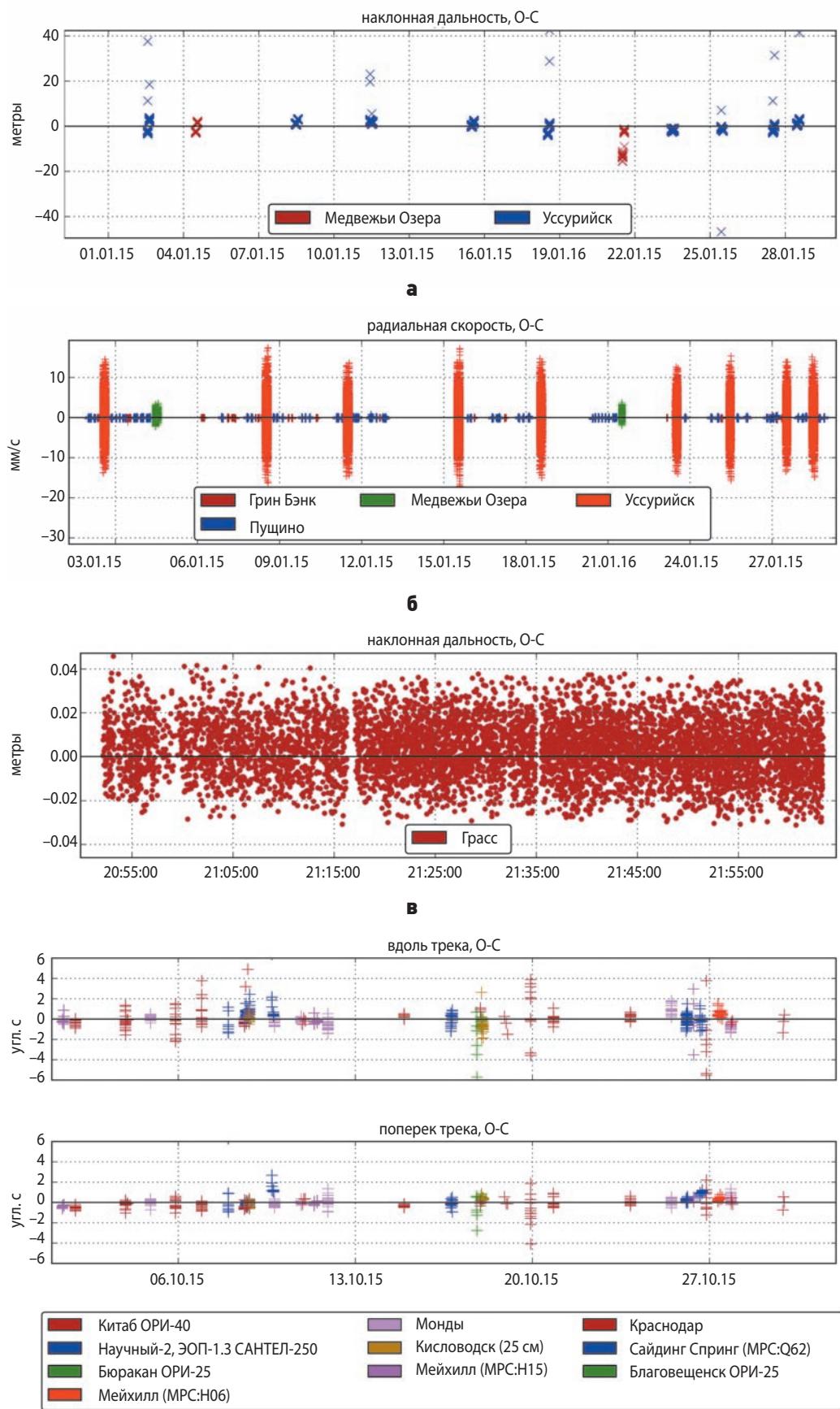
считанные по двум различным и независимым наборам параметров движения  $\mathbf{Q}_i$  и  $\mathbf{Q}_{i+1}$ , где индекс  $i$  определяет номер интервала обработки. Независимость достигается благодаря обработке на непересекающихся интервалах времени с использованием независимых наборов измерений. Реконструкция орбит для навигационной привязки научных экспериментов производится без пропусков, так, что  $t_{i,2}=t_{i+1,1}$ . Для оценки точности орбит были рассмотрены величины  $\|\mathbf{r}(t_{i,2}, \mathbf{Q}_i) - \mathbf{r}(t_{i,2}, \mathbf{Q}_{i+1})\|$  и  $\|\mathbf{v}(t_{i,2}, \mathbf{Q}_i) - \mathbf{v}(t_{i,2}, \mathbf{Q}_{i+1})\|$  для реконструированных орбит начала 2014 года до середины 2016 года. График модулей разности определённых положений и скоростей приведён на рисунке 3. Среднее значение отклонения по положению составило 274 метра, отклонения по скорости – 2.22 мм/с. Приведённые данные демонстрируют хорошее соответствие требованиям по точности реконструкции движения КА. Превышение рассогласований рассчитанных положений КА отметки 600 м обусловлено в целом более низкой точностью орбит летнего периода из-за меньшего количества оптических наблюдений и научных сеансов, сопровождающихся доплеровскими измерениями частоты ВИРК.

## 2. Коррекция траектории полёта КА

Баллистические расчёты, выполненные в БЦ ИПМ после выведения КА на рабочую орбиту, показали необходимость проведения в 2012 году коррекции траектории движения КА с целью устранения прогнозируемых нарушений двух необходимых условий его полёта (Заславский Г.С., Степаньянц В.А. и др., 2014). В начале 2013 года нарушается светотеневая обстановка на борту КА, а в конце 2013 – начале 2014 годов заведомо досрочно завершается его баллистическое существование. В связи с этим в БЦ ИПМ была разработана схема коррекции траектории движения КА с двумя целевыми (1-м и 2-м)



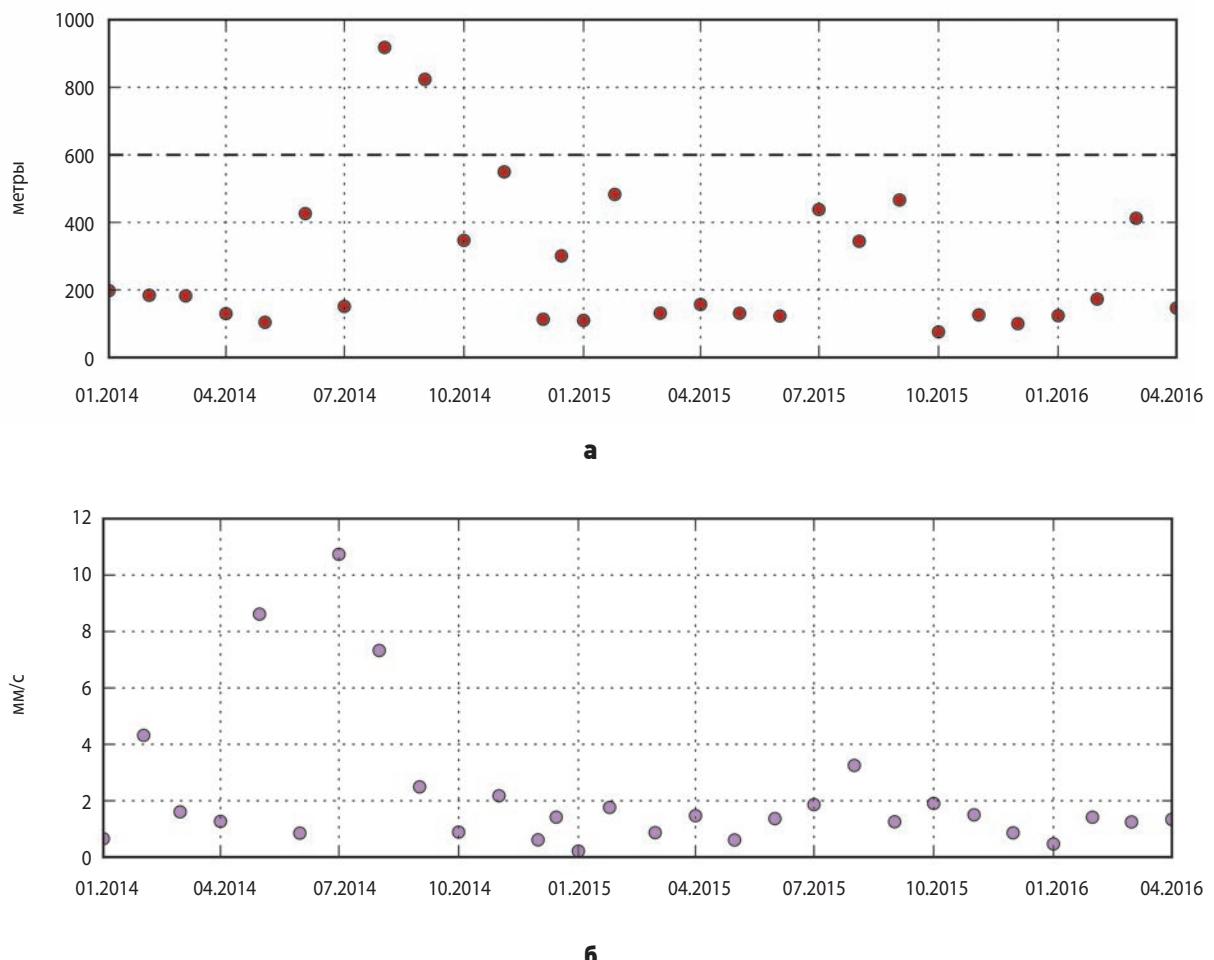
**рисунок 1.** Соответствие проекции измеренного (синие линии) и расчётного (красные линии) значений возмущающего момента на ось  $OY$  строительной системы координат (проекции на две другие оси в штатном режиме ориентации, как правило, на порядок меньше)



**а – измерения наклонной дальности января 2015 г.; 6 – измерения радиальной скорости января 2015 г.; в – измерения лазерной дальномерии сеанса 29 мая 2016 г.; г – угловые оптические измерения октября 2015 г.**

**рисунок 2.** Рассогласования траекторных измерений КА «СПЕКТР-Р», полученных в ходе реконструкции орбиты для навигационной привязки научных данных

# БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН». ПЯТЬ ЛЕТ ПОЛЁТА



**рисунок 3.** Различие реконструированных орбит КА «СПЕКТР-Р», полученных на независимых смежных интервалах уточнения, по положению (**а**) и скорости (**б**)

включениями ДУ, им предшествует техническая операция прожиг, которая заметно изменяет траекторию полёта КА. Схема была утверждена Главной оперативной группой управления полётом КА (ГОГУ). Коррекция траектории движения КА была исполнена по утвержденённой схеме.

## 2.1. Параметры коррекции

Баллистические параметры коррекции рассчитывались БЦ ИПМ с учётом технических характеристик и особенностей работы бортовых систем КА и возможностей работы наземных станций, задействованных в управлении полётом КА (Заславский Г.С., Степаньянц В.А. и др., 2014). В расчётах, по согласованию с ГОГУ, прожиг моделировался непрерывной работой ДУ с тягой по направлению совпадающей с тягой при 1-м целевом включении ДУ на интервале времени, при котором КА получает приращение характеристической скорости (импульс), по абсолютной величине равный 0.01 м/с. Средней точкой указанного интервала был назначен момент 21.02.2012 20:56:47,1. Здесь и далее моменты событий представлены в московском времени (UTC+3 часа). Были получены баллистические характеристики целевой коррекции траектории КА: 1-е включение ДУ происходит 21.02.2012

21:00:00,0 и непрерывно работает 300 с; 2-е включение происходит 01.03.2012 14:45:00,0 и непрерывно работает в течение 332 с. Указанные характеристики 2-го включения ДУ рассчитаны по уточнённой траектории после реализации 1-го включения ДУ.

За счёт этих включений ДУ приращения характеристических скоростей КА составляют 1.75 м/с и 1.86 м/с соответственно. Направление тяги ДУ на очередном интервале её непрерывной работы совпадает с расчётным направлением текущей скорости КА на середину указанного интервала в предположении пассивного полёта КА (тяга равна нулю).

Полученные баллистические параметры коррекции траектории КА априори обеспечивали (при сохранении характеристик действующих на КА сил) для всей «трубки» возможных траекторий, после коррекции, его баллистическое существование (высота полёта над поверхностью Земли превосходит 640 км) не менее пяти лет, и до января 2017 года – приемлемую светотеневую обстановку на борту. При этом предполагалось, что указанная трубка обусловлена неточностью знания траектории полёта КА до коррекции, заданными ошибками в реализации величины и направления тяги ДУ и погрешностью моделирования светового давления на КА.

## 2.2. Качественная оценка исполнения коррекции

По прошествии более четырёх лет от исполнения коррекции движения центра масс КА (около пяти лет – от запуска КА) можно получить качественную оценку её исполнения. Указанная оценка проводится путём сопоставления характеристик четырёх траекторий пассивного полёта КА. В настоящей статье им присвоены номера: 0 – траектория до реализации прожига ДУ; 1 – траектория после расчётного исполнения коррекции; 2 – траектория после фактического исполнения коррекции, полученная по данным трёх последовательных (за коррекцией) сеансов измерений; 3 – текущая траектория, параметры которой уточнены в конце мая 2016 года.

В таблице 4 представлены расчётные характеристики баллистического существования и первых по ходу полёта неприемлемых затенений КА для каждой из четырёх указанных выше четырёх траекторий. В таблице используются обозначения:  $t_{ce}$ ,  $t_{zn}$ ,  $t_{azn}$  – моменты времени завершения баллистического существования КА, его входа в частичную тень и полную тень от Земли соответственно;  $\delta t_3$  и  $\delta t_{az}$  – интервалы времени затенения КА и его полного затенения Землёй. В случае отсутствия полной тени в таблице приводится коэффициент ( $K_{Tmax}$ ) степени затенения КА (Заславский Г.С., Степаньянц В.А. и др., 2014), который изменяется в пределах от 0 до 1.

Аналогичные расчёты показывают, что на рассматриваемых траекториях неприемлемые затенения КА Луной отсутствуют, и КА не входит в её сферу действия.

Для каждой из четырёх рассматриваемых траекторий были рассчитаны в последовательности (по виткам) моментов времени достижения минимального расстояния КА от ЦМ Земли параметры оскулирующих орбит относительно Земли в системе координат J2000 и величины углов SOV между вектором текущей скорости КА и направлением с КА на ЦМ Солнца. Значения углов SOV используются при выборе схемы проведения коррекции траектории КА (Заславский Г.С., Степаньянц В.А. и др., 2014). К указанным параметрам оскулирующих орбит отнесены:  $h_\pi$ ,  $h_a$  – высоты перигея и апогея над поверхностью

Земли соответственно;  $\omega$  – аргумент широты перигея;  $i$  – наклонение;  $\Omega$  – долгота восходящего узла;  $P_0$  – период орбиты. При расчёте высот перигея и апогея орбиты КА в качестве фигуры Земли рассматривается шар с радиусом 6378.2 км. Величины  $\omega$  и  $\Omega$  принимают значения из полуинтервала  $[0, 2\pi]$ , а величина  $i$  – из интервала  $[0, \pi]$ .

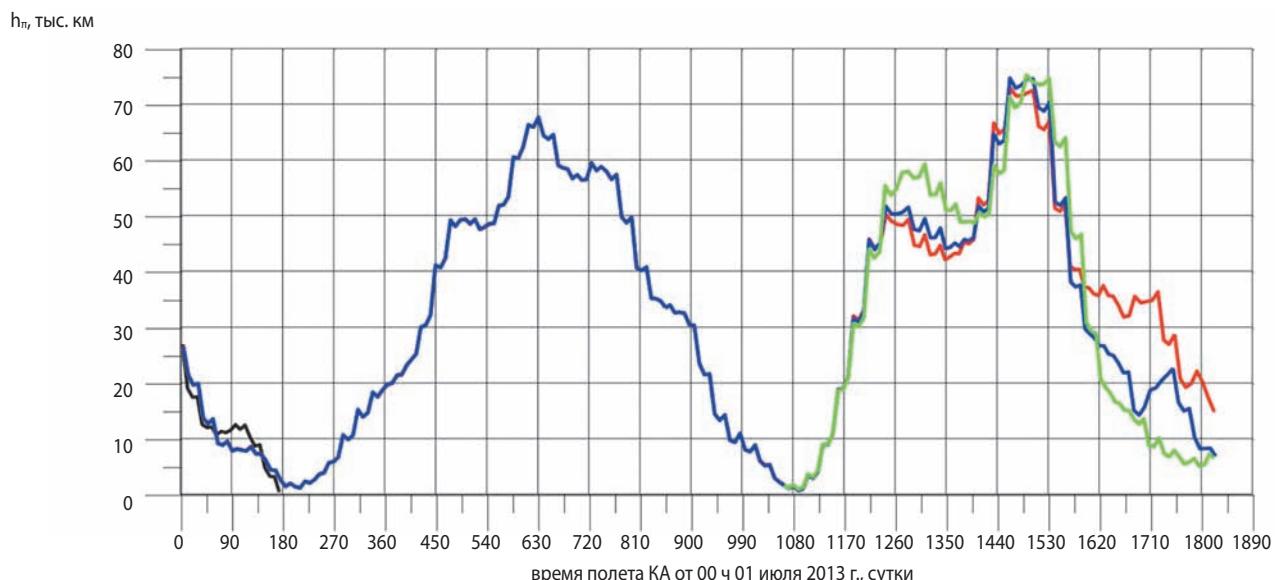
Результаты расчётов изображены на рисунках 4–10 в виде графиков, представляющих собой ломаные линии. По оси абсцисс всех графиков отложены моменты времени, отсчитываемые от момента 01.07.2013 00:00:00. Абсциссами вершин ломаной линии являются моменты времени достижения спутником минимального (на витке) расстояния от ЦМ Земли. Ордината вершины ломаной линии равняется рассчитанному значению обозначенного на рисунке параметра. График, соответствующий движению ЦМ КА по траектории 0, обрывается непосредственно перед моментом времени прекращения его баллистического существования (см. таблицу 4). Графики, соответствующие движению ЦМ КА по траекториям 1, 2 и 3, обрываются непосредственно перед моментом времени 18.07.2021 12:00:00. Момент начала графика, соответствующего движению ЦМ КА по траектории 3, отнесён к моменту времени получения в БЦ ИПМ кинематических параметров этой траектории (26 мая 2016 года). Каждой траектории здесь и далее по тексту соответствует определённый цвет графика: 0 – чёрный, 1 – красный, 2 – синий и 3 – зелёный. Графики наносились на рисунок в последовательности цветов: чёрный, красный, синий и зелёный.

Графики на рисунках 4–10 и данные в таблице 4, прежде всего, свидетельствуют об успешном исполнении коррекции траектории КА. Они подтверждают, что навигационные задачи по определению параметров траектории движения ЦМ КА и прогнозированию его дальнейшего полёта в БЦ ИПМ выполнены с необходимой для управления полётом спутника точностью, а также что предложенные БЦ ИПМ схема проведения двухимпульсной коррекции и результаты расчёта баллистических параметров коррекции обеспечили перевод КА на траекторию, на которой выполняются предписанные условия полёта КА, по крайней мере, в течение пяти лет.

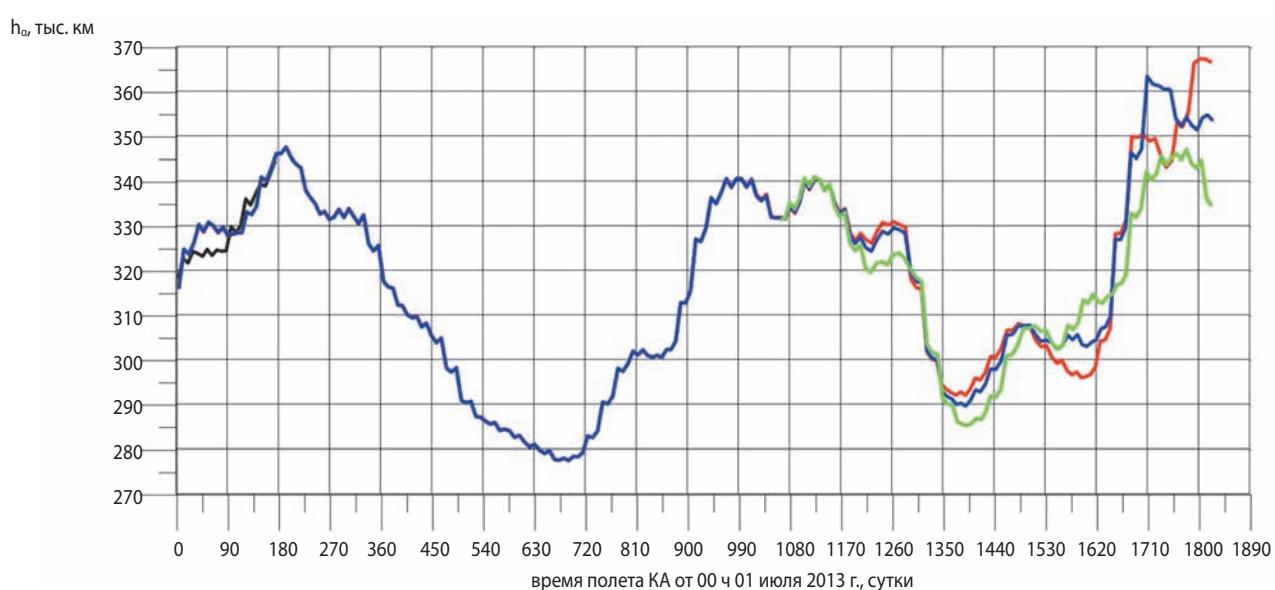
**таблица 4** – Время баллистического существования и интервалы затенения КА

номер траектории	0	1	2	3
$t_{ce}$	22.12.2013 08:04:29	>18.07.2021 12:00:00	>18.07.2021 12:00:00	>18.07.2021 12:00:00
$t_{zn}$	08.01.2013 22:04:19	21.01.2017 03:40:20	20.01.2017 22:39:01	19.01.2019 13:56:56
$\delta t_3$ , часы	5.69	5.15	4.34	4.73
$t_{azn}$	08.01.2013 23:05:35	нет, $K_{Tmax} K_{Tmax}=0.83$	нет, $K_{Tmax} K_{Tmax}=0.54$	нет, $K_{Tmax} K_{Tmax}=0.98$
$\delta t_{az}$ , часы	3.63	нет	нет	нет

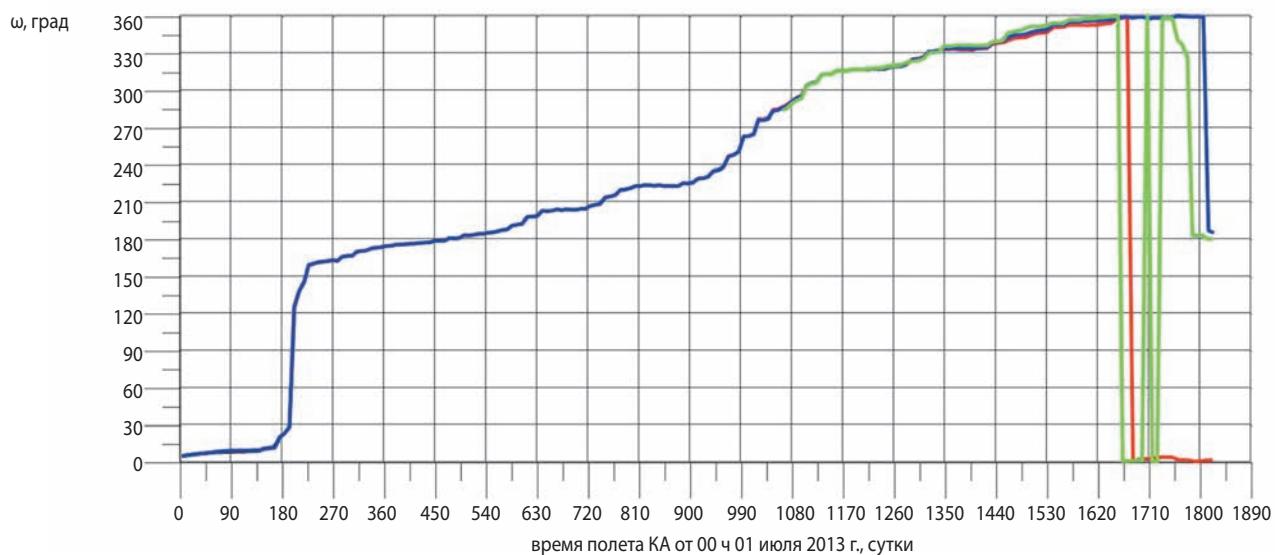
**БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА И ВЫПОЛНЕНИЯ  
НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН». ПЯТЬ ЛЕТ ПОЛЁТА**



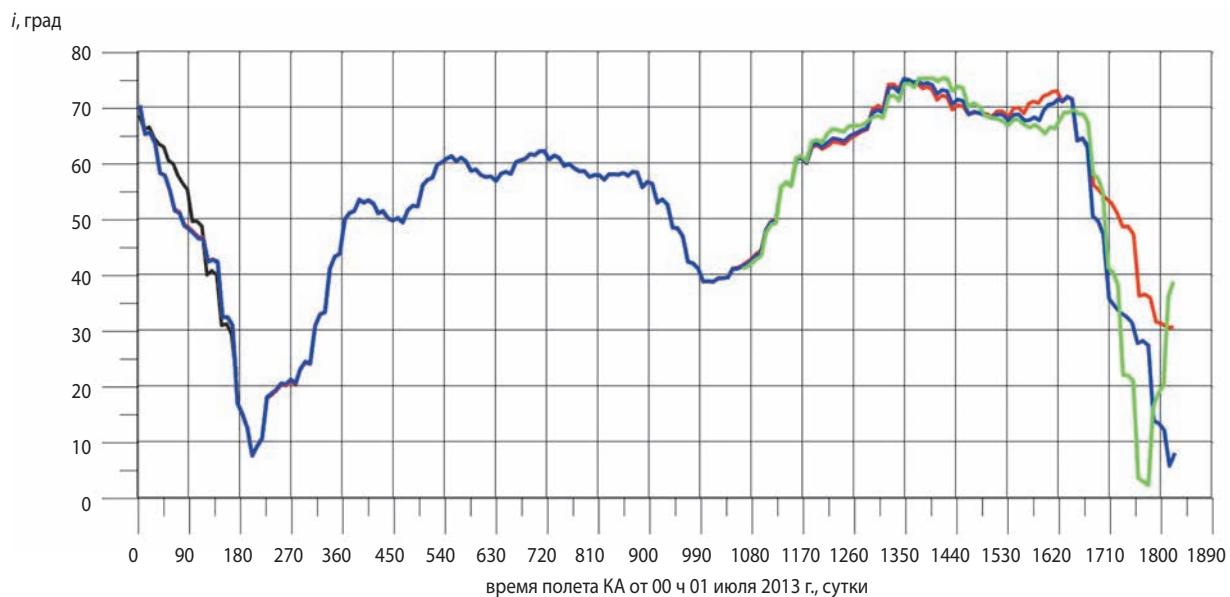
**рисунок 4.** Эволюция высоты КА в перигее орбиты



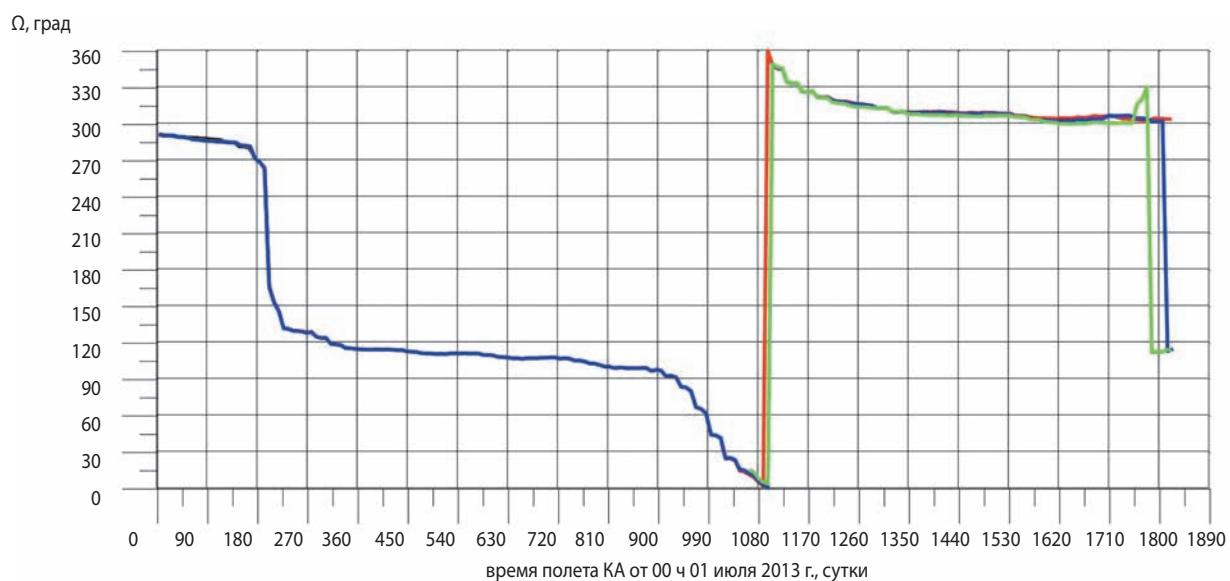
**рисунок 5.** Эволюция высоты КА в апогее орбиты



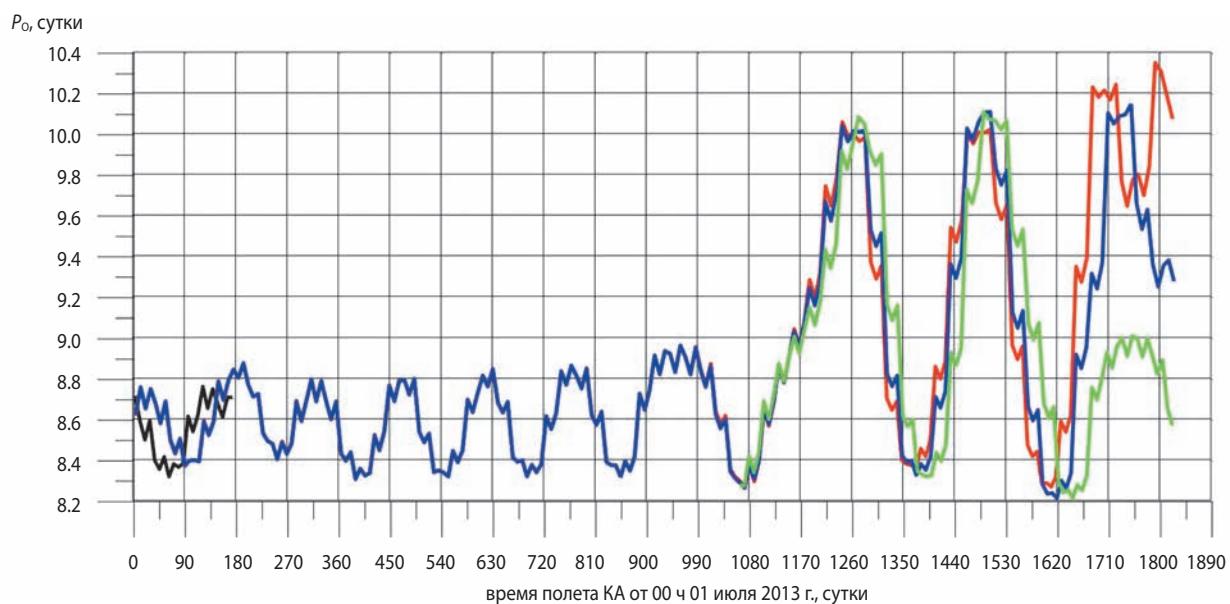
**рисунок 6.** Эволюция аргумента широты перигея орбиты КА



**рисунок 7.** Эволюция наклонения орбиты КА

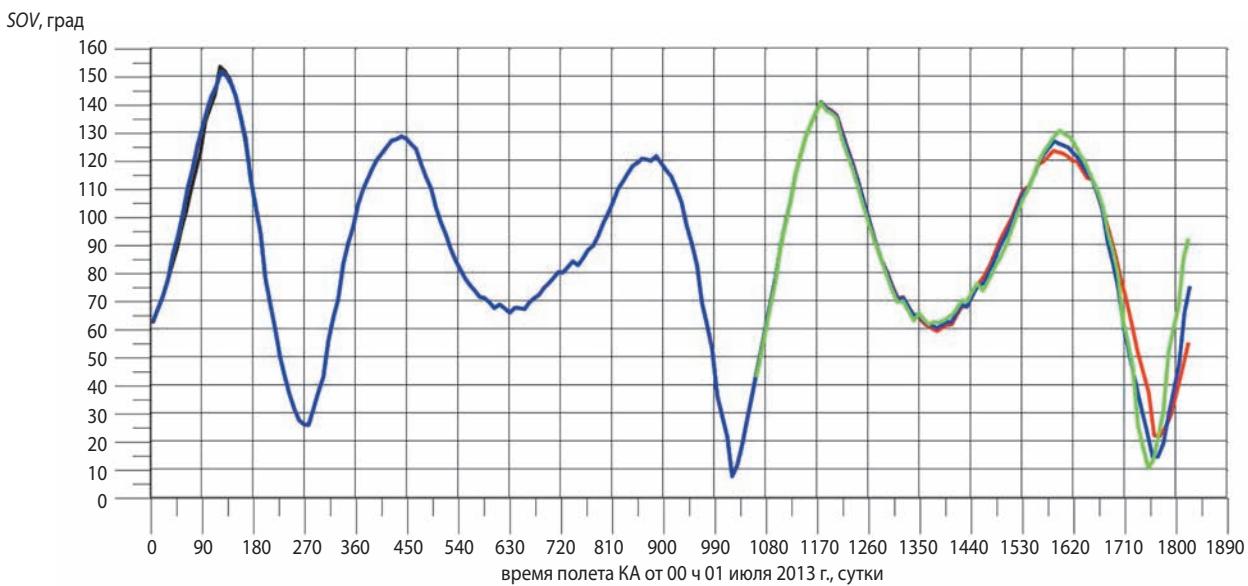


**рисунок 8.** Эволюция долготы восходящего узла орбиты КА

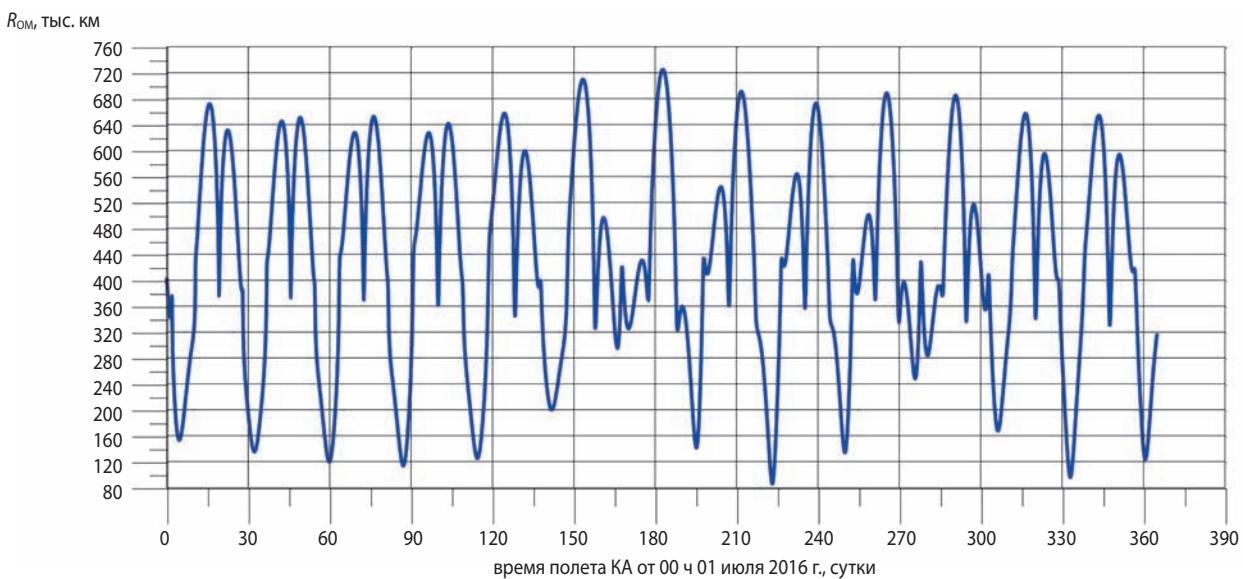


**рисунок 9.** Эволюция периода орбиты КА

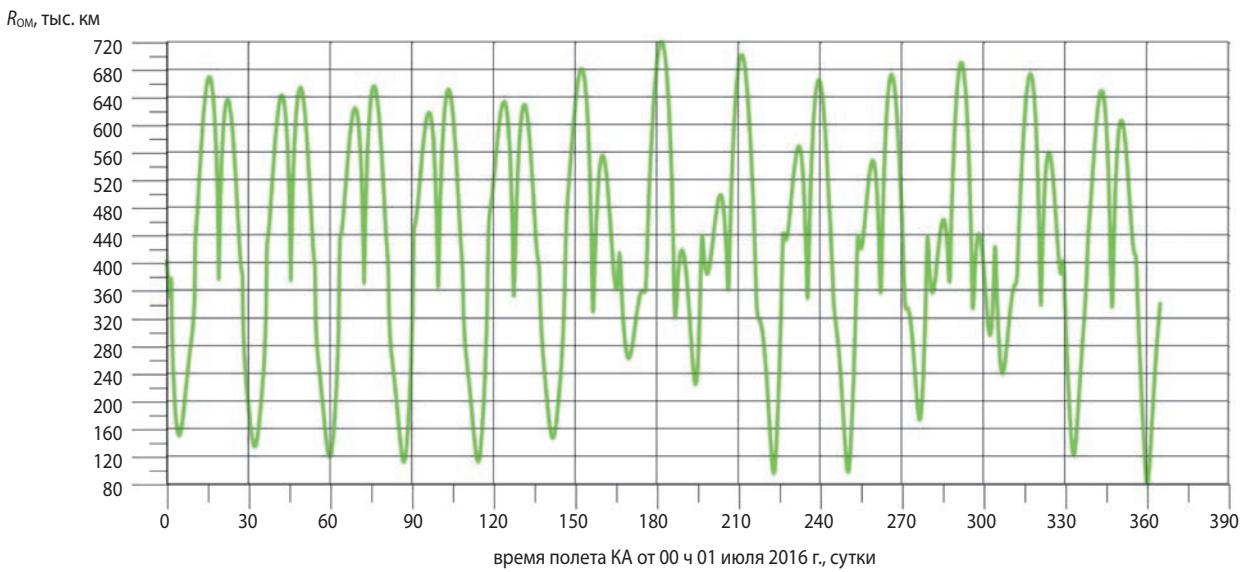
## БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЁТОМ КА И ВЫПОЛНЕНИЯ НАУЧНОЙ ПРОГРАММЫ ПРОЕКТА «РАДИОАСТРОН». ПЯТЬ ЛЕТ ПОЛЁТА



**рисунок 10.** Изменение, с течением времени, угла между скоростью КА в перигее орбиты и направлением с КА на ЦМ Солнца



**рисунок 11.** Зависимость расстояния КА от ЦМ Луны при его движении по траектории, уточнённой непосредственно после реализации коррекции



**рисунок 12.** Зависимость расстояния КА от ЦМ Луны при его движении по текущей траектории, уточнённой в конце мая 2016 года

Графики на рисунках 4–10 и данные таблицы 5 показывают, что параметры, характеризующие траектории 2 и 3, начиная со второй половины 2016 года заметно различаются. В таблице 5 приведены значения минимальной высоты ( $h_{\min}$ ) КА над поверхностью Земли и момента времени ( $t_{\min}$ ) достижения им этой высоты. Указанная разница траекторий 2 и 3 объясняется тем, что после тесного сближения с Землёй КА – даже при незначительном отклонении подлётных (к Земле) его траекторий – различным образом неоднократно сближается с Луной. На рисунках 11–12 представлены графики зависимости от времени полёта КА его расстояния ( $R_{\text{OM}}$ ) от ЦМ Луны. Сближение КА с Луной достигает 80 тыс. км, и гравитационное влияние Луны на изменение движения КА по орбите становится весьма заметным, что может, вообще говоря, потребовать коррекции его траектории в ближайшие один – два года, после завершения первого полугодия 2017 года.

**таблица 5** – Минимальная высота полёта КА и время её достижения

номер траектории	2	3
$h_{\min}$ , км	658	834
$t_{\min}$	24.06.2016 12:12:25	24.06.2016 07:27:46

## заключение

Работа по баллистико-навигационному обеспечению полёта КА «СПЕКТР-Р» продолжается. В ходе полёта была успешно проведена коррекция орбиты аппарата, обеспечившая перевод КА на траекторию, для которой выполняются предписанные условия полёта КА, по крайней мере, в течение пяти лет. Успешно выполняется программа научных экспериментов, при этом обеспечение необходимой точности определения параметров движения потребовало разработки принципиально новых алгоритмов обработки информации, включающей как внешнетраекторные измерения, так и данные бортовой телеметрии.

## список литературы

Аким Э.Л., Энеев Т.М. Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений // Космические исследования. 1963. Т. 1, вып. 1. С. 5–50.

ГОСТ Р 25645.166-2004. Атмосфера Земли верхняя. Модель плотности для баллистического обеспечения полётов искусственных спутников Земли. Введ. 2004-03-09. М.: Национальный стандарт РФ, 2004. 28 с.

Гордиенко Е.С., Ильин И.С. и др. Баллистико-навигационное обеспечение полёта малых космических аппаратов «ЗОНД-ПП» и «РЭЛЕК» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2 (32). С. 31–43.

Заславский Г.С., Захваткин М.В., Ильин И.С., Косянов В.В. и др. Баллистико-навигационное обеспе-

чение полёта космического аппарата «СПЕКТР-Р» // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 1 (74). С. 15–29.

Заславский Г.С., Степаньянц В.А., Тучин А.Г. и др. Коррекция траектории движения космического аппарата СПЕКТР-Р // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 5. С. 387–398.

Захваткин М.В. Определение и прогнозирование параметров движения космического аппарата с учётом возмущений, вызванных работой бортовых систем // Препринт ИПМ. 2014. № 45. С. 1–30.

Захваткин М.В., Пономарев Ю.Н., Степаньянц В.А., Тучин А.Г. и др. Навигационное обеспечение научной миссии «РАДИОАСТРОН» // Космические исследования. 2014. Т. 52, № 5. С. 376–386.

Кардашев Н.С., Алакоз А.В., Ковалев Ю.Ю., Попов М.В. и др. «РАДИОАСТРОН»: итоги выполнения ранней научной программы исследований объектов Вселенной со сверхвысоким угловым разрешением // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3 (24). С. 4–11.

Молотов И.Е., Агапов В.М. и др. Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений // Известия ГАО РАН. 2009. № 1. С. 233–248.

Навигация космических аппаратов при исследовании дальнего космоса / Под ред. Е.П. Молотова, А.Г. Тучина. М.: Радиотехника, 2016. 231 с.

Справочное руководство по небесной механике и астродинамике / Под ред. Г.Н. Дубошина. М.: Наука, 1976. 864 с.

Duev D.A., Zakhvatkin M.V., Stepanyants V.A., Molera G. Calves et al. RadioAstron as a target and as an instrument: Enhancing the Space VLBI mission's scientific output // Astronomy & Astrophysics. 2015. V. 573. A99.

Eanes R., Schutz B., Tapley B. Earth and Ocean Tide Effects on Lageos and Starlette // Proc. of the Ninth International Symp on Earth Tides. 1983. P. 239–250.

Estabrook F.B. Post-Newtonian n-BODY Equations of the Brans-Dicke Theory // Astrophysical journal. 1969. V. 158, № 1. P. 81–83. DOI: 10.1086/150172.

Folkner W.M., Williams J.G., Boggs D.H. The Planetary and Lunar Ephemeris DE 421 // Interplanetary Network Progress Report. 2009. V. C1. P. 42–178.

Knocke P.C., Ries J.C., Tapley B.D. Earth radiation pressure effects on satellites // Proceedings of American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA Paper). 1988. № 88-4292-CP.P. 577–587.

Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G. et al. The Development of the Joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96 // NASA TP-1998-206861, NASA Goddard Space Flight Center. July 1998. 575 p.

Статья поступила в редакцию 22.06.2016 г.

## ГАЛАКТИЧЕСКАЯ АСТРОНОМИЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТЕ

## GALACTIC ASTRONOMY IN UV



**A.C. Расторгуев<sup>1</sup>,**  
профессор, доктор физико-  
математических наук,  
*msachkov@inasan.ru;*  
**A.S. Rastorguev**



**М.Е. Сачков<sup>2</sup>,**  
профессор РАН,  
доктор физико-  
математических наук,  
*msachkov@inasan.ru;*  
**М.Е. Sachkov**



**М.В. Заболотских<sup>1</sup>,**  
кандидат физико-  
математических наук,  
*msachkov@inasan.ru;*  
**M.V. Zabolotskikh**

В работе рассматривается ряд перспективных наблюдательных программ для космической ультрафиолетовой обсерватории «СПЕКТР-УФ» («ВКО-УФ», «WSO-UV»), имеющих важнейшее значение для современной галактической астрономии. Среди них – поиск кандидатов в двойные цефеиды; поиск и детальное изучение фотометрии и радиального распределения ярких в УФ звёзд шаровых звёздных скоплений («голубых бродяг», голубых звёзд горизонтальной ветви и RR-лирид, белых карликов и звёзд с УФ-избыtkами); исследование звёздного состава и кинематики молодых рассеянных звёздных скоплений и ассоциаций; изучение распределения энергии в спектрах горячих звёзд и закона межзвёздного поглощения в УФ, оптике и ближнем ИК; уточнение калибровок ультрафиолетовых цветов и эффективных температур. Высокое пространственное разрешение обсерватории делает возможными астрометрические измерения собственных движений на интервале нескольких лет и исследование звёздной кинематики.

*Ключевые слова:*  
звёздная астрономия;  
звездообразования;  
проект «СПЕКТР-УФ».

We propose a number of perspective observational programs for ultraviolet space observatory «WSO-UV», which seem to be of great importance to modern galactic astronomy. They include the search for binary Cepheids; the search and detailed photometrical study and the analysis of radial distribution of UV-bright stars in globular clusters; the investigation of stellar content and kinematics of young open clusters and associations; the study of spectral energy distribution in hot stars, including calculation of the extinction curves in UV, optics and NIR; and accurate definition of the relations between UV-colors and the effective temperature. High angular resolution make it possible accurate astrometric measurements of stellar proper motions and their kinematical analysis.

*Key words:*  
stellar astronomy;  
star formation;  
«SPECTR-UF» project.

<sup>1</sup> Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернberга МГУ, Россия, г. Москва.  
Sternberg Astronomical Institute Moscow University,  
Russia, Moscow.

<sup>2</sup> ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.  
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences,  
Russia, Moscow.

## введение

Галактическая («звёздная») астрономия стала всеволновой астрономической наукой. 50 лет наземных и космических исследований в ультрафиолетовом диапазоне спектра сильно изменили наши взгляды на физические процессы, протекающие в областях звездообразования в нашей и других галактиках, где важнейшую роль играют горячие звёзды; привели к революционным открытиям в изучении населения шаровых и рассеянных звёздных скоплений, ранее рассматривавшихся в контексте парадигмы простых звёздных населений. Изучение межзвёздной экспанкции в газопылевой среде является необходимым условием проведения исследований распределения энергии в спектрах звёзд и важнейшей основой надёжного определения межзвёздных расстояний, на чём базируются все работы по изучению строения Галактики. Сравнение законов поглощения в ультрафиолетовой, оптической и ближней инфракрасной областях спектра предоставляет уникальную информацию о строении и химическим составе межзвёздных пылинок, их происхождении и процессах обогащения межзвёздной среды химическими элементами, что в конечном счёте служит физической основой космогонических концепций.

Хорошо известно, что одной из наблюдательных основ галактической астрономии являются астрометрические данные. Многолетний опыт получения прямых изображений крупными космическими телескопами, в первую очередь HST (Hubble Space Telescope), обладающими близким к дифракционному пределу качеством изображения и высокой проникающей способностью, показал, что, наряду с исключительно цennыми астрофизическими данными, грамотная обработка изображений позволяет извлечь и дополнительную астрометрическую информацию, по позиционной точности во многих случаях сравнимую с космическими специализированными проектами «HIPPARCOS» и «TYCHO». Удачным примером таких исследований служат уникальные результаты определения высокоточных абсолютных собственных движений Большого и Малого Магеллановых Облаков по наблюдениям с камерой высокого разрешения ACS (Advanced Camera for Surveys) HST с привязкой к квазарам (*Kalivalyalil N. et al., 2006 I, II; Besla G. et al., 2007*) и оценка полной массы Галактики. Высокое угловое разрешение и одновременно достаточно широкое поле зрения камер поля «WSO-UV» (*Boyarchuk A.A. et al., 2013, Shustov B. et al., 2014, Sachkov M. et al., 2014 I, II*), как ожидается, также даст возможность определения собственных движений звёзд и звёздных скоплений на интервале 3–5 лет с привязкой к изображениям квазаров или далёких галактик. В применении к звёздным скопле-

ниям можно ожидать субмиллисекундной точности собственных движений, что почти не уступает ожидаемой точности специализированного астрометрического проекта GAIA. Астрометрические возможности обсерватории «WSO-UV» открывают новые перспективы изучения кинематики галактических населений вплоть до больших (десятков кпк) расстояний от Солнца и распределения массы в Галактике. Следует особо отметить важность исследований кинематики и динамики околоводородных областей шаровых звёздных скоплений, практически недоступных даже крупнейшим наземным инструментам. Так, камеры WFPC2 и ACS космической обсерватории HST были с успехом использованы для изучения степени анизотропии распределения скоростей в ядерной области шарового скопления NGC 104=47 Тук (*McLaughlin D.E. et al., 2006*).

Привлечение новых массовых наблюдательных данных, фотометрических и спектральных, полученных в ультрафиолетовом диапазоне, способно значительно уточнить современные астрономические шкалы расстояний, задаваемые рассеянными и шаровыми звёздными скоплениями, цефеидами плоской и сферической составляющей, RR-лиридами и субкарликами поля, сверхновыми типов Ia и II, в частности путём разработки более точных методов классификации этих объектов. Упомянутые направления исследований, несомненно, имеют большую важность для современной астрономии.

В предлагаемой работе кратко перечислены некоторые актуальные задачи звёздной астрономии, представляющиеся весьма перспективными для составления будущей научной программы обсерватории «WSO-UV» (*Malkov O. et al., 2011*).

## 1. Изучение двойных цефеид

Классические цефеиды – жёлтые сверхгиганты, произволюционировавшие В-звезды главной последовательности – являются представителями одного из основных классов «стандартных свечей», т.е. объектов с хорошо установленной (в смысле малости случайных ошибок) шкалой расстояний. Их расстояния рассчитываются по многоцветным зависимостям период – светимость, выведенным, например, по цефеидам – членам рассеянных скоплений, реализующим т.н. «короткую» шкалу расстояний (*Бердников Л.Н. и др., 1996*). Вопреки ожиданиям, тригонометрические параллаксы цефеид, измеренные в ходе выполнения проекта «HIPPARCOS», не закрыли окончательно вопрос о возможных систематических ошибках их шкалы расстояний. Объяснение тому – малое число близких цефеид с надежно определенными параллаксами. В настоящее время различными группами исследователей фак-

тически используются разные варианты зависимости период-светимость, например (Бердников Л.Н. и др., 1996) как альтернативный вариант т.н. «длинной» шкалы расстояний).

Одной из возможных причин неточности тригонометрических параллаксов является двойственность заметного числа цефеид. Характерные орбитальные периоды известных спектрально-двойных цефеид составляют сотни и тысячи дней, и типичное угловое смещение их фотоцентров на расстоянии порядка сотен парсек может быть оценено в миллисекунды дуги, что сравнимо с точностью тригонометрических параллаксов «HIPPARCOS». Эффекты неразрешенной двойственности в процессе обработки результатов «HIPPARCOS» никак не учитывались. Подтверждением тому является полное отсутствие корреляции между фотометрическими и каталожными тригонометрическими расстояниями известных спектрально-двойных цефеид.

В настоящее время число переменных звёзд, классифицированных как классические цефеиды, превышает 2000. Систематический спектральный мониторинг популяции цефеид северного неба, проведенный в 1985–2007 годах с помощью корреляционного спектрометра системы CORAVEL, показал, что около 22–25% всех цефеид представляют собой спектрально-двойные системы типа SB1 (с линиями только одного компонента в спектре) (Горыня Н.А. и др., 1996). Изучая ультрафиолетовые спектры 76 ярких цефеид по данным IUE в области 200–320 нм, (Evans N.R. et al., 1992) нашла ультрафиолетовые избытки в области 250 нм, обусловленные вкладом горячих B-звезд, у 16 цефеид выборки (~21%). По её мнению, более 30% всех цефеид могут иметь спутники. Следует заметить, что вероятность обнаружить двойственность лишь по изменениям лучевых скоростей определяется как ориентацией плоскости орбиты относительно луча зрения, так и скважностью (и продолжительностью) спектральных наблюдений и ошибками измерения лучевых скоростей. Поэтому независимый поиск двойных цефеид с горячими спутниками является весьма многообещающим.

Для этой цели предполагается измерение ультрафиолетовых избытоков цефеид на тех фазах пульсации, где вклад горячего компонента проще всего обнаружить – вблизи минимума блеска, когда цефеида вдобавок холоднее. Обнаружение ультрафиолетовых избытоков желательно сопровождать низкодисперсными спектральными наблюдениями как с целью сравнения наблюдавшего распределения энергии с теоретическим, так и с целью поиска спектральных линий горячего компонента и (возможно) определения лучевых скоростей цефеиды и спутника.

Определение вклада горячего спутника в суммарный блеск и цвет цефеиды позволит, во-первых,

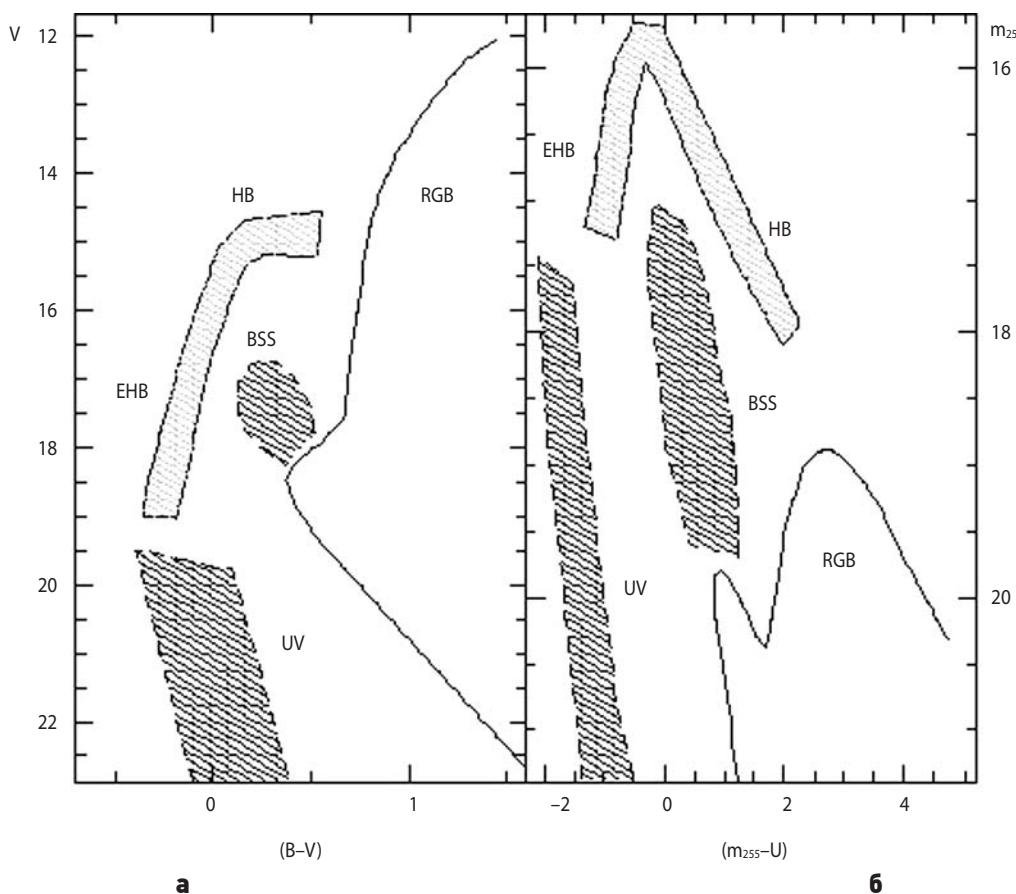
уточнить ее светимость, а во-вторых, в тех случаях, когда в спектре видны линии обоих компонентов двойной, определить массы цефеиды и спутника. «Очистка» ультрафиолетовых и оптических показателей цвета и блеска от вклада горячего компонента позволит более надёжно определять пульсационные радиусы цефеид методом Весселлинка – Бааде – Балона (Sachkov M., 2002), опирающимся на однозначную связь нормальных цветов звёзд с эффективной температурой и, в свою очередь, использовать рассчитанные пульсационные радиусы цефеид для независимого уточнения их шкалы расстояний. В-третьих, изучение большой выборки двойных звёзд с компонентами большой массы двойных цефеид – формирования первичных двойных. В-четвёртых, создание максимально полной выборки двойных цефеид откроет важное направление – изучение влияния двойственности на эволюционные изменения пульсационных периодов цефеид, что может быть использовано в теоретических исследованиях строения и эволюции оболочек этих звёзд. Наконец, прецизионное определение изменений координат позволит не только уточнить собственные движения цефеид, но и в ряде случаев –оценить размеры их орбит.

## 2. Изучение звёздного населения шаровых скоплений

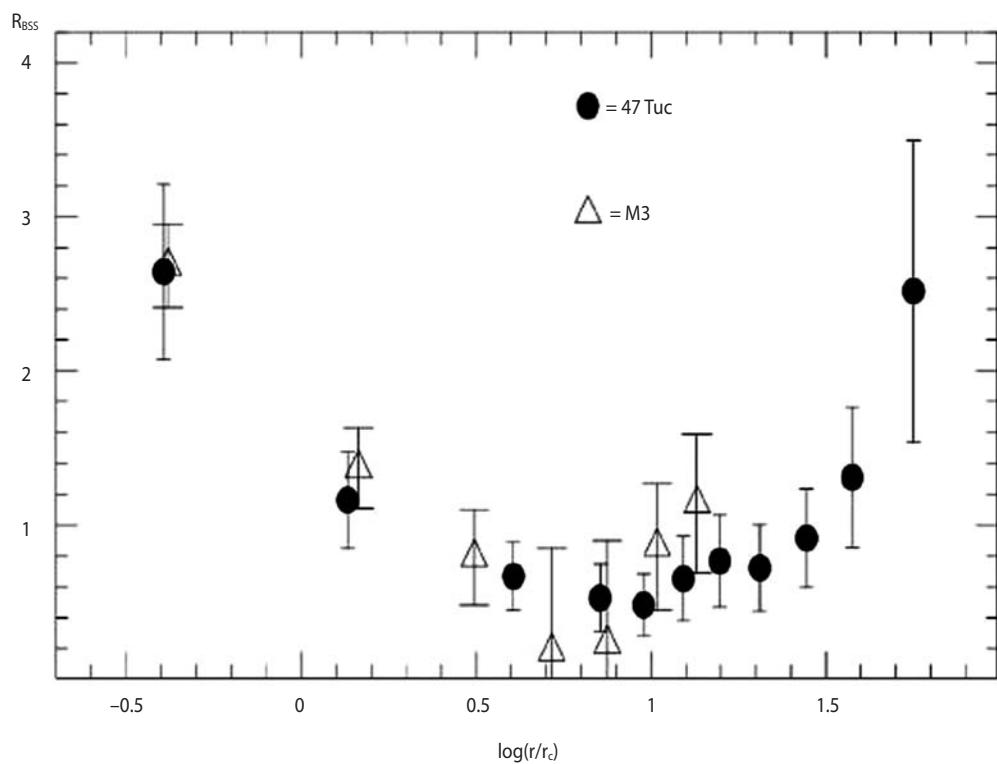
Целый ряд актуальных задач для исследований в ультрафиолетовой области спектра ставят шаровые звёздные скопления (ШЗС).

Всем хорошо известно, что в оптике ярчайшими звёздами шаровых скоплений являются красные гиганты. В ультрафиолетовом же диапазоне блеск красных гигантов становится намного слабее блеска горячих звёзд, таких, как звёзды горизонтальной ветви (HB, EHB), включая переменные типа RR Lyr, «голубые бродяги» (Blue Straggler Stars или BSS), яркие (молодые) белые карлики, звёзды с ультрафиолетовым избыtkом (UVe), а также слабее звёзд асимптотической ветви гигантов (AGB), включая цефеиды сферической составляющей типа W Vir (рисунок 1).

Наблюдениями с HST доказано, что BSS, UVe и другие перечисленные типы звёзд являются типичным населением как периферии, так и ядер многих шаровых скоплений. Особый интерес на протяжении последних 55 лет вызывает популяция «голубых бродяг» в ШЗС. К настоящему времени по разным наблюдениям, включая данные с HST, выявлено свыше 3000 этих звёзд более чем в 60 шаровых скоплениях Галактики (Piotto G. et al., 2004). Практически в каждом скоплении при более или менее детальном исследовании обнаруживаются представители этой



**рисунок 1.** Схематические диаграммы цвет – величина типичного малометаллического шарового скопления: **a** – в видимом диапазоне:  $V - (B - V)$ ; **б** – в УФ-диапазоне:  $m_{255} - (m_{255} - U)$ . Обозначены: RGB – ветвь красных гигантов; HB – горизонтальная ветвь; EHB – экстремально голубые звёзды горизонтальной ветви; BSS – «голубые бродяги»; UV – белые карлики и звёзды с УФ-избыtkом



**рисунок 2.** Радиальное распределение относительной частоты «головных бородяг» (в единицах поверхностной плотности) в шаровых скоплениях М3 и 47 Тuc

популяции, числом от десятков до нескольких сотен. В настоящее время считается общепринятым, что «голубые бродяги» представляют собой результат «комождения» звезды за счёт обмена массой между компонентами в тесной двойной системе. Их массы не превышают 1.6 масс Солнца. Вероятно, большинство двойных звёзд в шаровых скоплениях, в том числе и «голубых бродяг», делятся на две популяции: первичных двойных и двойных столкновительного происхождения (образовавшихся в результате тесных тройных сближений или приливного диссипативного захвата). «Голубые бродяги» практически во всех скоплениях (за исключением аномального скопления  $\omega$  Сен, кандидата в ультракомпактные галактики) показывают бимодальное распределение по радиусу, с резким падением поверхностной плотности на расстоянии порядка  $7\text{--}10 R_c$  (см. рисунок 2, взятый из работы (Ferraro F.R. et al., 2004)). Предполагается, что центральный пик соответствует столкновительным, а периферийный – первичным двойным.

Однако до сих пор окончательно не решён вопрос о происхождении «голубых бродяг» и связи свойств их популяции с характеристиками скопления. Для этого в качестве одной из основных задач предлагается создание максимально полной базы данных по «голубым бродягам» в центральных и периферийных областях доступных наблюдениям шаровых скоплений Галактики. С её помощью предполагается детально исследовать особенности радиального распределения этой популяции и выявить связь радиального распределения и частоты встречаемости BSS с различными характеристиками ШЗС. Как представляется, в совокупности все эти данные способны внести важный вклад в решение вопроса о происхождении и эволюции этой сравнительно короткоживущей популяции. Для ряда близких скоплений желателен спектральный мониторинг «голубых бродяг» с целью определения лучевых скоростей компонентов и оценки их масс. Исчерпывающая база наблюдательных данных для звёзд этой популяции может также служить основой для моделирования динамических процессов в шаровых скоплениях, связанных со взаимодействием двойных и одиночных звёзд. Не менее интересной задачей кажется фотометрический поиск и изучение популяции «голубых бродяг» в старых рассеянных скоплениях.

Примерно в 25–30% шаровых скоплений найдены многочисленные экстремально голубые звёзды горизонтальной ветви (ЕНВ), эффективные температуры которых достигают 35000–40000 К (часто это звёзды не вполне правильно называют «горячими субкарликами»). Эти объекты ставят перед исследователями, пожалуй, не меньше проблем, чем «голубые бродяги». С ними, в частности, ряд

исследователей связывает феномен УФ-подъёма (UV-upturn) в спектральном интервале 150–250 нм в эллиптических галактиках (Deharveng J.M. et al., 2002).

Хорошо известно, что на стадии горизонтальной ветви шаровых скоплений масса гелиевого ядра звёзд почти одинакова (примерно 0.5 массы Солнца), в то время как масса водородной оболочки, в зависимости от сброшенной на стадии гелиевой вспышки массы, меняется от 0.3 до 0.001 массы Солнца. В результате наиболее горячие звёзды ЕНВ могут стать белыми карликами, минуя фазу AGB и планетарной туманности (Moehler S., 2002). Звёзды ЕНВ встречаются и в галактическом поле, причём некоторые авторы считают, что ЕНВ поля и шаровые скопления имеют различную природу, поскольку среди ЕНВ поля намного больше двойных (до 2/3) по сравнению с ЕНВ шаровых скоплений, доля двойных среди которых не превышает нескольких процентов (Maxted P.F.L. et al., 2001). Есть подозрение, что доля двойных падает с возрастом рассматриваемой звёздной популяции (Han Z., 2008). До сих пор неясно, от каких параметров скопления зависит высокотемпературная граница звёзд ЕНВ, хотя отмечалась корреляция как с металличностью, так и с массой (полнотой светимостью) ШЗС. Для объяснения последней высказываются идеи о повышенном содержании гелия в звёздах ЕНВ в массивных шаровых скоплениях за счёт самообогащения межзвёздной среды гелием перед эпохой образования маломассивных звёзд (D'Antona F. et al., 2002). Заслуживают внимания и дальнейшего изучения «провалы» на функции светимости звёзд ЕНВ, соответствующие температуре  $19200 \pm 1000$  К или массе  $M = 0.535 \pm 0.005$  солнечных (Piotto G. et al., 1999).

Массовое изучение морфологии горизонтальных ветвей шаровых скоплений Галактики, включая фотометрическое и спектральное исследование ярких звёзд ЕНВ в УФ-диапазоне, представляется очень перспективным как для уточнения теории эволюции, так и для более глубокого понимания природы и эволюции ярких в УФ населений ШЗС и их сравнения с населением поля и эллиптических галактик. Глубокое изучение ядер ряда сравнительно близких шаровых скоплений, в первую очередь, 47 Тис, с помощью космической обсерватории HST выявило еще одну интересную популяцию звёзд с ультрафиолетовыми избыtkами, на диаграмме цвет – величина располагающуюся между белыми карликами и верхней частью главной последовательности (Ferraro F.M. et al., 2001) см. рисунок 3. Предположительно эти звёзды представляют собой давно ожидаемую популяцию взаимодействующих двойных, что подтверждается оптическим отождествлением части звёзд с рентге-

новскими источниками, обнаруженными Chandra, и с миллисекундными пульсарами. Дальнейшее исследование этих звёзд крайне важно для астрофизики, хотя они и не являются столь яркими, как звёзды BSS и EHB. Весьма перспективным кажется поиск слабых (старых) белых карликов и независимая оценка возраста шаровых скоплений по теоретическим трекам охлаждения белых карликов.

### **3. Горячие звёзды диска, молодые рассеянные скопления и ОВ-ассоциации**

Максимум энерговыделения ярчайших звёзд молодых рассеянных скоплений (ОВ-звёзд – карликов, гигантов и сверхгигантов) и звёздных ассоциаций лежит в УФ-диапазоне. Как правило, у них непосредственно наблюдается сильное истечение вещества («ветер», часто клюковатый). Благодаря большой яркости фотометрическое и спектральное изучение ОВ-звёзд нашей Галактики и других галактик местной группы, а также M31, M33 в УФ представляется весьма перспективным для решения целого ряда задач. Так, остро стоит задача уточнения спектрального распределения энергии и температурной шкалы горячих звёзд и создания для них калибровок ультрафиолетовых и оптических цветов, решение которой невозможно без широкого использования УФ-диапазона (Crowther P.A., 2006). В ряде работ показано, что шкала эффективных температур ОВ-звёзд высокой светимости, выводимая из сравнения наблюдаемых УФ-спектров с современными теоретическими расчётами, учитывающими сферичность фотосфера, бланкетирование и отклонение от ЛТР (Hillier D.J., Miller D.L., 1998), значительно (на 2–8кК) ниже общепринятой (Bianchi L., Garcia M., 2002). Причиной этого могут быть мощный звёздный ветер и эффекты бланкетирования линий (Evans C.J. et al., 2004). Детальные УФ-спектры и результаты исследования характеристик ветров в эмиссии H α могут быть использованы также для создания наиболее точных моделей звёздных ветров, уточнения ряда аспектов теории эволюции массивных звёзд и классификации горячих звёзд по светимостям (отделения звёзд главной последовательности (ГП) от гигантов и сверхгигантов). Не исключено, что последнее приведёт к значительному уточнению их шкалы расстояний. Спектроскопия открывает уникальную возможность прямого изучения процессов взаимодействия горячих звёзд с межзвёздной средой и влияния массивных звёзд и их ветров на звездообразование.

Помимо прочего, высокодисперсная спектроскопия ОВ-звёзд является наблюдательной основой определения их скорости вращения. По современ-

ным данным, проективная скорость, ( $V_{\text{rot}} \sin i$ ) достигает 450 км/с для звёзд ГП и гигантов и 100 км/с – для сверхгигантов (Simon-Diaz S., HerreroA., 2007). Заслуживает внимания природа диффузного УФ-излучения, наблюдавшегося в других спиральных галактиках. Есть данные, что большая часть УФ-эмиссии вблизи 220 нм связана с вкладом В-звёзд поля, а не молодых скоплений (Pellerin A. et al., 2007), что косвенно свидетельствует о быстром распаде рассеянных скоплений.

Трудно переоценить роль ультрафиолетовых фотометрических и спектральных наблюдений молодых звёздных скоплений и ОВ-ассоциаций. Именно УФ-диапазон лучше всего пригоден для изучения строения звёздных комплексов как основных ячеек в областях звездообразования, а также формы спирального узора в других галактиках. В нашей Галактике молодые скопления, как правило, скрыты за толстым слоем пыли, особенно сильно поглощающей именно коротковолновое излучение. Уточнение температурной шкалы и распределения энергии в спектрах ОВ-звёзд требует пересмотра шкалы балометрических поправок и, как следствие, возрастов и расстояний молодых рассеянных скоплений и ассоциаций. Совместное использование данных УФ, оптики и ближнего ИК и астрометрических данных для детального изучения населения молодых рассеянных скоплений позволит значительно уточнить их возрасты и расстояния, а также наложить ограничения на начальный спектр масс звёзд, что является важнейшей проблемой в теории звездообразования. Большую роль в изучении популяции молодых скоплений должны сыграть астрометрические данные, а именно высокоточные собственные движения, полученные на интервале порядка 3–5 лет, позволяющие отделить члены скопления от звёзд поля, уточнить кривую вращения молодых подсистем и определить кинематические параметры популяции рассеянных скоплений на основе однородного наблюдательного материала.

Особый интерес представляет изучение кинематики ОВ-ассоциаций. В отличие от гравитационно-связанных рассеянных звёздных скоплений, звёздные ассоциации, будучи гравитационно несвязанными группировками молодых звёзд, характеризуются заметной дисперсией пространственных скоростей (около 5 км/с). Для кинематических исследований пригодны собственные движения, рассчитанные по разности координат с точностью выше 0.1 mas/год, и лучевые скорости, определенные по высокодисперсным спектрам с необходимой точностью не хуже 0.5 км/с. Можно полагать, что такие точности вполне достижимы при систематических наблюдениях немногих близких ОВ-ассоциаций на WSO-UV

(области в Орионе, Лебеде, Стрельце). Определенные из наблюдений кинематические характеристики ассоциаций несут важнейшую информацию о мас- сах родительских молекулярных облаков, эффективности звездообразования, особенностях про- цессов фрагментации, взаимодействии горячих звёзд с межзвёздной средой и динамике областей звездообразования.

#### 4. Изучение горячего и молекулярного газа

УФ-диапазон открывает богатые возможности ис- следования химического состава, распределения и кинематики межзвёздной среды в нашей Галактике и других близких галактиках. В ультрафиолетовом диапазоне наблюдаются спектральные линии моле- кул CO, молекулы HD и молекулярного водорода H<sub>2</sub> (совершенно не видимого в оптике), а также ряда возбужденных атомов, среди которых особый инте- рес представляет ион кислорода OVI (*Bluhm H., de Boer K.S., 2001; Bluhm H. et al., 2003; Savage B.D. et al., 2003*). Молекулярные линии хорошо видны в спектрах горячих белых карликов и ОВ-звезд, «просвечающих» межзвёздную среду на луче зрения. Доплеровское смещение линий несет информацию о кинематике газа, а эквивалентные ширины – о физических условиях в межзвёздной среде (температу- ре и лучевой плотности).

Исключительно важную космологическую роль играют измерения первичного отношения числа атомовдейтерия к водороду, (D/H), являющегося характеристикой первичного нуклеосинтеза во Все- ленной, на первых 100–1000 секундах её эволюции (*Burles S. et al., 2001*). Согласно современным внеат- мосферным УФ-наблюдениям в диапазоне 90–120 нм отношение D/H показывает значительные вариации, свидетельствующие о большой роли звездообразова- ния и перемешивания межзвёздной среды, а также разрушении первичного дейтерия термоядерными реакциями (*Linsky J.L. et al., 2006*). С космологиче- ской точки зрения, наиболее перспективными могли бы стать определения отношения D/H в малометал- личной среде, слабо затронутой звездообразованием и перемешиванием вещества (*Linsky J.L., 2007*), т.е. на высоких галактических широтах, хотя это и пред- ставляется сложной наблюдательной задачей.

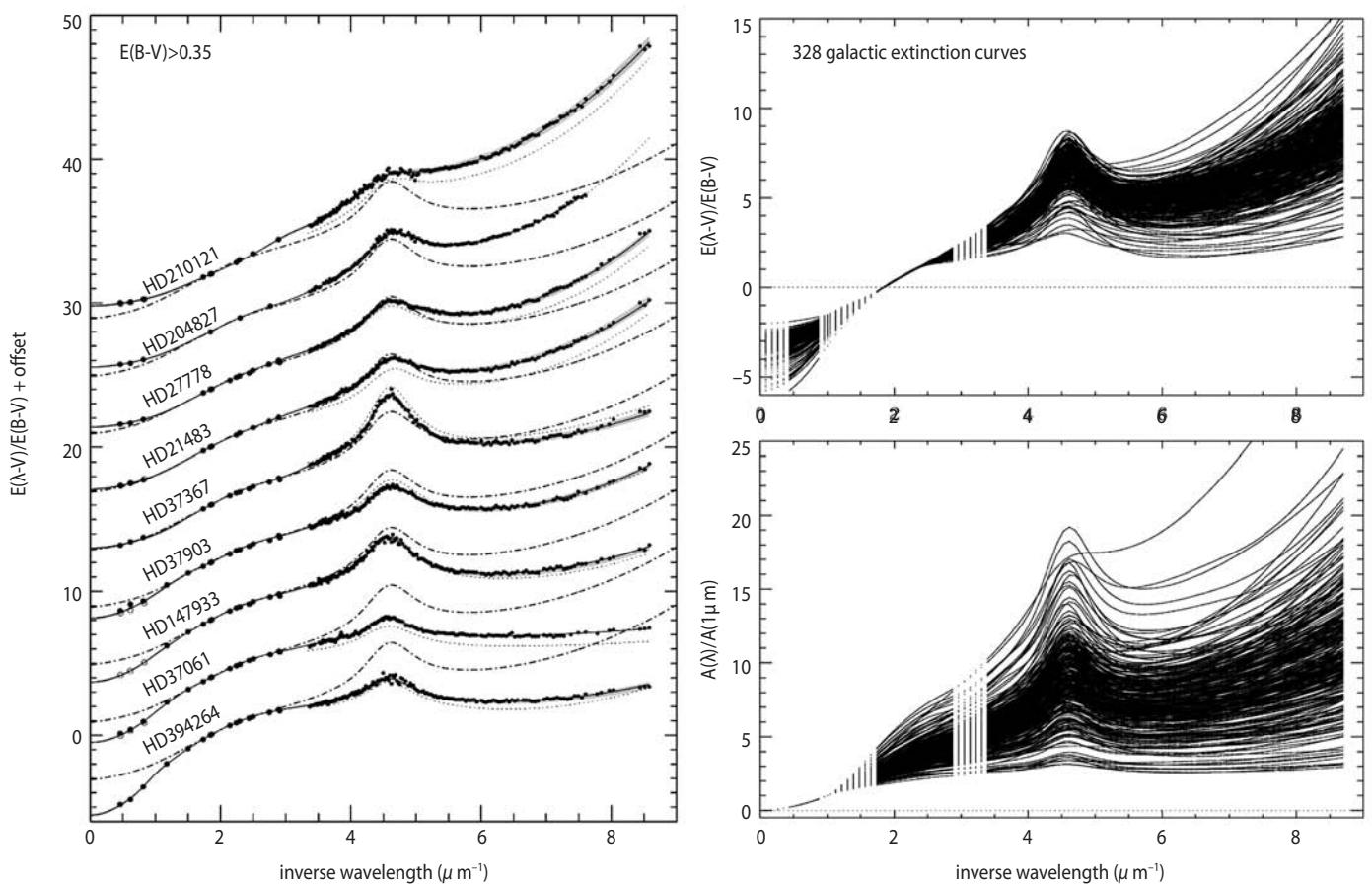
Спектральные наблюдения в УФ и оптике обнару- жили не только крупномасштабные структуры в ло- кальной МЗС, но и множество сравнительно неболь- ших «теплых» облаков в пределах 15 пк от Солнца и позволили уточнить строение Местного газового объёма. Как было показано, столкновениями обла- ков можно объяснить волокнистую структуру неко- торых близких молекулярных облаков (*Redfield S., Linsky J.L., 2008*).

Наблюдениями с FUSE (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer) в интервале длин волн около 103–104 нм обнаружены сильные линии поглощения ионом OIV не только в диске Галактики, но и на высоких галактических широтах, где скорости газа имеют порядок 100 км/с, температура T~300000 K, а лучевая плотность – 10<sup>14</sup>–10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>. В направлени- ях на 100 галактик с активными ядрами и квазаров по линиям O IV ,были также обнаружены высоко- скоростные облака (со скоростями, достигающими |V<sub>r</sub>| ~400 км/с относительно LSR, и лучевой плот- ностью порядка 10<sup>13</sup>–10<sup>14</sup> см<sup>-2</sup>) (*Sembach K.R. et al., 2003*); они ассоциируются с МЗС в Галактике и Местной Группе. Наличие большого количества горячего газа на расстояниях порядка 200–300 кпк накладывает ограничение на возможные сценарии образования Местной Группы и открывает новые горизонты для изучения вклада барионной материи в полную тяготеющую массу.

Спектральные УФ-наблюдения в направлении на горячие звёзды БМО обнаружили, помимо горячего газа, значительное количество молекулярного водорода, сконцентрированного в высокоскоростные об- лака с лучевой плотностью порядка 7×10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>, доля молекулярного водорода в них составляет примерно lg f(H<sub>2</sub>)~−5.4÷−3.3 (*Bluhm H. et al., 2001*). Возможно- сти таких спектральных исследований с помощью обсерватории «ВКО-УФ» представлены в работах (*Sachkov M.E., 2010; Sachkov M.E., 2014*). Иссле- дование физических процессов и происхождения высокоскоростных молекулярных облаков также представляет собой одну из интереснейших задач со- временной космогонии галактик.

#### 5. Поглощение света в УФ, оптическом и ближнем ИК-диапазонах

Межзвёздное поглощение света так или иначе вли- яет на фотометрические и спектральные наблюде- ния практически всех объектов в ультрафиолетовой, оптической и ближней инфракрасной областях спек- тра. Поэтому детальное исследование межзвёздной экстинкции является одной из важнейших задач со- временной астрофизики (*Whittet D.C.B., 2003*). Для оценки поглощения света чаще всего используются так называемые «средние» кривые поглощения (зави- симости монохроматического поглощения от длины волны), усредненные по наблюдениям звёзд в разных направлениях диска Галактики. Так, разные исследо- ватели обычно приводят таблицы отношения избыт- ков цвета E(λ-V)/E(B-V), где λ – эффективная длина волны для текущего фильтра широкополосной фотो-



**рисунок 3.** Слева: законы экстинкции  $E(\lambda-V)/E(B-V)$ , выведенные по отдельным звёздам (смещены по вертикали). Справа: результаты измерения экстинкции по 328 звёздам. Вверху:  $E(\lambda-V)/E(B-V)$ ; внизу:  $A(\lambda)/A(1\mu m)$ ; по горизонтали отложена обратная длина волны

метрической системы, задаваемой в оптике и ближнем ИК-диапазоне (*Cardelli J.A. et al.*, 1989; *He L. et al.*, 1995). На их основе легко вычисляются значения  $R_V = A_V/E(B-V)$  и через избытки цвета – величины поглощения в разных фильтрах. Та же идеология лежит в основе двумерных карт поглощения (*Burstein D., Heiles K.M.*, 1982; *Schlegel D.J. et al.*, 1998).

Однако хорошо известно, что законы поглощения в разных направлениях в Галактике часто сильно различаются (в качестве иллюстрации различий см. рисунок 3, взятый из работ (*Fitzpatrick E.L., Massa D.*, 2005; *Fitzpatrick E.L., Massa D.*, 2007)). Показано, что значения отношения полного поглощения к избытку цвета при этом меняются в больших пределах  $R_V \sim 2.4 - 3.6$  (*Fitzpatrick E.L., Massa D.*, 2007) и, следовательно, использование средних значений может привести к значительным и непредсказуемым ошибкам в значениях определяемых астрофизических параметров объектов (эффективных температур звёзд, расстояний и светимостей, возрастов звёздных скоплений). Совершенно ясно, что детальное изучение межзвёздной экстинкции остается одной из важнейших задач звёздной астрономии и астро-

физики. Для определения закона поглощения наряду с классическим методом звёздных пар может эффективно применяться метод Extinction-without-standard (не опирающийся на звёзды-стандарты), разрабатываемый Фитцпатриком и Масса (*Fitzpatrick E.L., Massa D.*, 2005; *Fitzpatrick E.L., Massa D.*, 2007)). Его суть состоит в сравнении модельного распределения энергии с наблюдаемым в УФ, оптике и ближнем ИК, а также использовании данных многоцветной средне- и широкополосной фотометрии, в том числе инфракрасной. Метод протестирован на данных IUE (International Ultraviolet Explorer), причем использована библиотека моделей атмосфер ATLAS9 (*Kurucz R.L.*, 1979). Совместно с законом экстинкции, задаваемым в параметризованном виде, определяются и основные параметры атмосфер:  $\lg T_{\text{eff}}$ ,  $\lg g$ ,  $[m/H]$ . Исследования показали, что наиболее надежно ход кривой экстинкции определяется по звёздам рассеянных скоплений малого и умеренного возраста; применение этого метода на обсерватории WSO-UV (*Шустов Б.М. и др.*, 2014; *Сачков М.Е. и др.*, 2014) позволит, помимо прочего, провести глубокое исследование рассеянных скоплений.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Бердников Л.Н., Возякова О.В., Дамбис А.К.* // Письма в астрон. журн. 1996. 22. С. 936.

*Горыня Н.А., Растворгусев А.С., Самусь Н.Н.* // Письма в астрон. журн. 1996. 22. С 33.

*Сачков М.Е. и др.* Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ»// Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 34-39.

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

*Besla G., Kallivayalil N., Hernquist L. et al.* // ApJ. 2007. 668. P. 949.

*Bianchi L., Garcia M.* // ApJ. 2002. 581. P. 610.

*Bluhm H., de Boer K.S.* // AsAp. 2001. 379. P. 82

*Bluhm H., de Boer K.S., Marggraf O., Richter P.* // AsAp. 2001. 367. P. 299.

*Bluhm H., de Boer K.S., Marggraf O. et al.* // AsAp. 2003. 398. P. 983.

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

*Burles S., Nollett K.M., Turner M.S.* // ApJ. 2001. 552, L1.

*Burstein D., Heiles C.* // AJ. 1982. 87. P. 1165.

*Cardelli J.A., Clayton J.C., Mathis J.S.* // ApJ. 1989. 345. P. 245.

*Crowther P.A.* // ASP Conference Series. 2006. 348. P. 107.

*D'Antona F., Caloi V., Montablan J. et al.* // AsAp. 2002. 395. P. 69.

*Deharveng J.-M., Boselli A., Donas J.* // AsAp. 2002. 393. P. 843.

*Evans C.J., Crowther P.A., Fullerton A.W., Hiller D.J.* // ApJ. 2004. 610. P. 1021.

*Evans N.R.* // ApJ. 1992. 384. P. 220.

*Ferraro F.M., D'Amico M., Possenti A. et al.* // ApJ. 2001. 651. P. 337.

*Ferraro F.R., Beccari G., Rood R.T. et al.* // ApJ. 2004. 603. P. 127.

*Fitzpatrick E.L., Massa D.* // AJ. 2005. 130. P. 1127.

*Fitzpatrick E.L., Massa D.* // ApJ. 2007. 663. P. 320.

*Han Z.* // Astro-ph/0804.4535v2.

*He L., Whittet D.C.B., Kilkenny D., Spencer Jones J.H.* // ApJS. 101. P. 335.

*Hillier D.J., Miller D.L.* // ApJ. 1998. 496. P. 407.

*Kallivayalil N., van der Marel R.P., Alcock C. et al. I.* // ApJ. 2006. 638. P. 772.

*Kallivayalil N., van der Marel R.P., Alcock C. et al. II.* // ApJ. 2006. 652. P. 1213.

*Kurucz R.L.* // ApJS. 1979. 40. P. 1.

*Linsky J.L.* // Space Science Reviews. 2007. 130. P. 367.

*Linsky J.L., Draine B.T., Moos H.W. et al.* // ApJ. 2006. 647. P. 1106.

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

*Maxted P.F.L., Heber U., Marsh T.R., North R.C.* // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 2001. P. 326.

*McLaughlin D.E., Anderson J., Meylan G. et al.* // ApJS. 2006. 166. P. 249.

*Moehler S.* // Astro-ph/0209.2002. 293v1.

*Pellerin A., Meyer M., Harris J., Calzetti D.* // ApJ. 2007. 685, L87.

*Piotto G., De Angeli F., King I. et al.* // AJ. 2004. 604. L109.

*Piotto G., Zoccali M., King I.R. et al.* // AJ. 1999. 118. P.1727.

*Redfield S., Linsky J.L.* // ApJ. 2008. 673. P. 283.

*Sachkov M.* UV observations of sdB stars and prospects of WSO-UV mission for such studies // Astrophys. Space Sci. 2010. 329. P. 261-266.

*Sachkov M.* // Astronomy Letters. 2002. V. 28. P. 589-593.

*Sachkov M.E.* Study of pulsations of chemically peculiar A stars // Astrophysical Bulletin. 2014. 69. P. 40-45.

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

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

*Savage B.D., Sembach K.R., Wakker B.P. et al.* // ApJS. 2003 146. P. 125.

*Schlegel D.J., Finkbeiner D.P., Davis M.* // ApJ. 1998. 500. P. 525.

*Sembach K.R., Wakker B.P., Savage B.D. et al.* // ApJS. 2003. 146. P. 165.

*Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al.* // WSO-UV progress and expectations // Astrophys. Space Sci. 2014. 354. P. 155-161.

*Simon-Diaz S., Herrero A.* // Astro-ph/0703. 2007. 216, V.1.

*Whittet D.C.B.* Dust in the Galactic Environment // IOP Publishing Ltd. 2003.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016 г.

# ПРОБЛЕМЫ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ ПО НАБЛЮДАТЕЛЬНЫМ ДАННЫМ В УФ

# OBSERVATIONS IN UV BAND AND PROBLEMS OF STAR FORMATION STUDIES



**Д.З. Вибе<sup>1</sup>,**  
профессор РАН, доктор  
физико-математических наук,  
*dwiebe@inasan.ru*;

**D.S. Wiebe**

В статье рассматриваются вопросы современной теории звездообразования, для решения которых необходимы наблюдения в ультрафиолетовом диапазоне: ранние стадии образования молекулярных облаков и начальные условия для химической эволюции дозвёздных ядер. Описаны основные результаты имеющихся наблюдений диффузных облаков в УФ-диапазоне и перспективные направления будущих исследований с помощью инструментов проекта «СПЕКТР-УФ».

**Ключевые слова:** УФ-диапазон; звездообразование; диффузные облака; проект «СПЕКТР-УФ».

## введение

Под «начальными условиями» звездообразования понимают обычно этап эволюции молекулярного облака, когда в нём уже обособились плотные сгустки – ядра, которым в будущем (предположительно) предстоит превратиться в одиночные звёзды или звёздные группы, начиная с двойных звёзд и заканчивая звёздными скоплениями (Bergin E.A., Tafalla M., 2007). Однако в действительности «начальное» состояние конкретного ядра с необходимостью несёт в себе отпечаток предшествующей эволюции родительского молекулярного облака. В частности, две наиболее распространенные модели образования маломассивных дозвёздных ядер предсказывают для них различную кинематическую структуру – квазистатическую

*In this contribution I consider those aspects of the modern star formation theory, which can be substantiated with observations in UV band, paying special attention to early stages of molecular cloud formation and initial conditions for the chemical evolution of starless cores. I describe main results of available diffuse cloud observations in UV band as well as prospective directions for future studies with instrumentation of the World Space Observatory project.*

**Key words:** *UV-range; star formation; diffuse clouds; «SPEKTR-UF» project.*

в «магнитной» модели и турбулентную с преимущественно сверхзвуковой дисперсией скоростей – в «гравитурбулентной» модели (Вибе Д.З., 2006).

Считать химический состав молекулярного облака начальным химическим составом протозвёздного объекта также можно только с точки зрения эволюции индивидуального объекта, но не облака в целом. Кроме того, методики обнаружения дозвёздных ядер по молекулярным линиям (например, по излучению аммиака) гарантируют, что к начальному этапу процесса звездообразования будут отнесены объекты, проэволюционировавшие в химическом отношении. Моделирование химической эволюции таких известных молекулярных облаков, как TMC-1 и L134N, показывает,

<sup>1</sup> ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.

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

что при концентрации порядка  $10^4 \text{ см}^{-3}$ , характерной для окрестностей дозвёздных ядер, требуется порядка 1 млн. лет статической эволюции, чтобы достичь наблюдаемого молекулярного разнообразия (*Roberts H., Herbst E., 2002; Semenov D. et al., 2004*).

В моделях химико-динамической эволюции дозвёздных ядер эта проблема решается двумя способами. Один из них состоит в том, что в модель включается подготовительный этап, в течение которого ядро эволюционирует только химически, но не динамически. Благодаря этому происходит молекуляризация вещества, изначально имевшего преимущественно атомарный химический состав (*Aikawa Y. et al., 2008*). Второй способ – выбирать в качестве начальных условий для химико-динамической модели состояние с пониженной концентрацией ( $10^2\text{--}10^3 \text{ см}^{-3}$ ), по сути, в упрощенном виде включая в модель химическую эволюцию родительского облака (*Shematovich V.I. et al., 2003; Pavlyuchenkov Ya. et al., 2006*). Как показано в процитированных работах, оба способа позволяют адекватно воспроизвести не только средние обилия и (или) лучевые концентрации, но и пространственное распределение основных примесных молекул в дозвёздных ядрах. Неопределенности, обусловленные большим числом свободных параметров, снимаются за счёт значительного объёма данных об этих молекулах, полученных по наблюдениям в радиодиапазоне.

К сожалению, наблюдения молекулярных эмиссионных линий в радио- и субмиллиметровом диапазонах, как правило, не позволяют получать информацию о более ранних этапах звездообразования, предшествующих формированию дозвёздных ядер. При концентрациях порядка  $100 \text{ см}^{-3}$  практически единственным источником информации о состоянии газа являются линии молекулы CO и ее изотопомера  $^{13}\text{CO}$  (а также линии атомарного и ионизированного углерода в дальнем ИК-диапазоне). Однако при меньших концентрациях благодаря высокой прозрачности среды появляется возможность наблюдать молекулы не в излучении, а в поглощении – в спектрах звёзд и других фоновых источников. Причём, если для большинства молекул эти наблюдения можно считать дополнением к наблюдениям в радиодиапазоне, то для молекулярного водорода ультрафиолетовый диапазон предоставляет единственную возможность прямого исследования.

В силу симметрии у молекулы  $\text{H}_2$  (и у других гомоядерных молекул –  $\text{C}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) отсутствуют разрешенные дипольные колебательные и вращательные переходы, поэтому в темных холодных недрах молекулярных облаков она практически не излучает, однако обладает богатейшим набором линий в дальней УФ-области спектра. Наблюдения линий поглощения  $\text{H}_2$  и других молекул в ультрафиолетовом диапазоне позволяют исследовать химический состав очень разреженной фазы межзвёздных облаков, непосред-

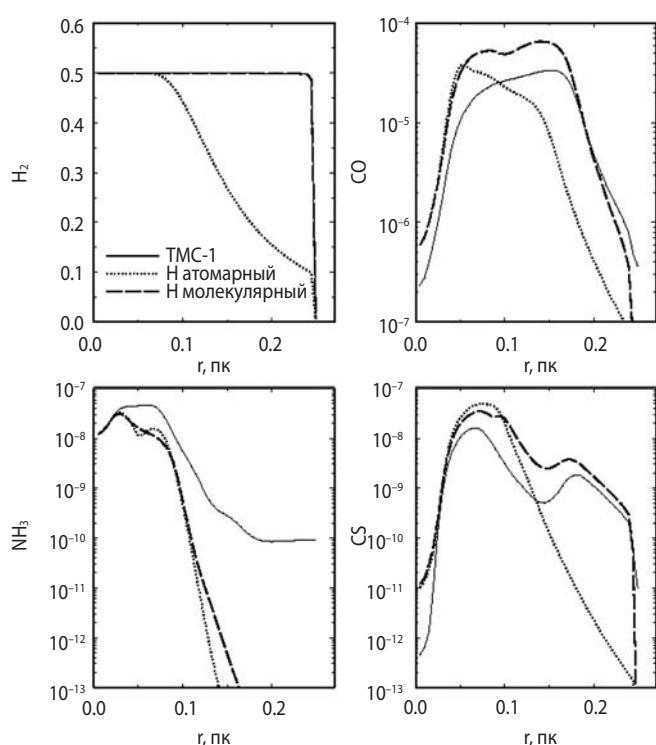
ственно изучая переход газа из атомарного в молекулярное состояние.

Эти исследования интересны как с точки зрения эволюционного статуса самих диффузных облаков, так и для определения начальных условий химической эволюции дозвёздных ядер. В качестве примера на рисунке 1 показаны результаты расчетов химической структуры типичного дозвёздного ядра с центральной концентрацией около  $10^6 \text{ см}^{-3}$  и небольшой ультрафиолетовой засветкой на периферии (0.1 от среднего межзвёздного УФ-фона). Расчёты выполнены с помощью модели, описанной в работе (*Pavlyuchenkov Ya. et al., 2006*). Пунктирными и штриховыми линиями показаны модели, которые отличаются друг от друга только начальной формой водорода: в одной модели он считается полностью атомарным (пунктир), в другой – полностью молекулярным (штрихи). Все остальные элементы присутствуют исключительно в атомарном виде. Сплошными линиями показана модель, в которой использован сложный начальный молекулярный состав, примерно соответствующий составу TMC-1 (*Semenov D. et al., 2004*). В случае CO и CS – двух популярных молекул-индикаторов дозвёздных ядер – различия между моделями с атомарным и молекулярным водородом во внешней области ядра превышают порядок величины. При этом они гораздо более значительны, чем разница между моделями «TMC-1» и «Н молекулярный», которые имеют очень разный начальный состав, но одинаковое начальное содержание молекулярного водорода.

Интересно отметить, что содержание аммиака меньше зависит от начального содержания атомарного водорода (рисунок, внизу слева) – в моделях «Н молекулярный» и «Н атомарный» распределение  $\text{NH}_3$  по радиусу облака практически одинаковое. Это связано с тем, что большая часть атомов азота связана в молекулах  $\text{N}_2$ , и потому содержание аммиака больше зависит от числа свободных атомов N, чем от числа атомов водорода.

## 1. Диффузные облака

По современным представлениям, межзвёздная среда разделяется на несколько фаз, находящихся в равновесии по давлению. Примерно половину объёма Галактики заполняет горячая ионизованная среда с температурой  $T \sim 10^6 \text{ K}$  и концентрацией  $n \sim 10^{-3} \text{ см}^{-3}$ , но ее вклад в общую массу межзвёздного газа ничтожен. По массе межзвёздное вещество примерно поровну распределено между теплой ионизованной и нейтральной средой ( $T \sim 10^4 \text{ K}$ ,  $n \sim 10^{-1} \text{ см}^{-3}$ ) и холодной нейтральной средой ( $T \geq 10^2 \text{ K}$ ,  $n \geq 50 \text{ см}^{-3}$ ). Холодная нейтральная среда, в свою очередь, обладает сложной структурой, наиболее плотным компонентом которой являются молекулярные облака. Жизненный



**рисунок.** Зависимость молекулярного состава дозвёздного ядра от начального содержания молекул. Модели «TMC-1» и «H молекулярный» имеют в целом очень различный начальный химический состав, но одинаковое исходное обилие молекулярного водорода. Начальный состав в моделях «H молекулярный» и «H атомарный», напротив, отличается только содержанием молекулярного водорода (100% в первом и 0% во втором случае). Эволюционное время составляет 200000 лет

цикл молекулярного облака может выглядеть примерно так. Разреженный атомарный газ по каким-то причинам (столкновение турбулентных течений, разнообразные неустойчивости, спиральные ветви) уплотняется, остывает, и атомы в нём начинают объединяться в молекулы. В наиболее плотных областях образуются звёзды, энергетическое воздействие которых рассеивает родительское облако и переводит его обратно в разреженное атомарное состояние.

В таблице 1 представлена классификация «переходных» облаков, предложенная в работе (Snow Th.P., McCall B.J., 2006). В этой таблице через  $f$  обозначена доля атомов того или иного элемента, связанных

в конкретном соединении. Например,  $f_H(H_2)$  есть доля атомов водорода, связанных в молекулах  $H_2$ , т.е. фактически, степень молекуляризации облака. Атомарный газ можно наблюдать в линии водорода на длине волны 21 см, плотные облака наблюдаются в радиодиапазоне как в молекулярных линиях, так и в континууме теплового излучения пыли. Но ни один из этих методов не позволяет отслеживать ключевой этап в эволюции облака – превращение атомарного водорода в молекулярный, которому, главным образом, соответствуют «полупрозрачные» облака. Единственным источником информации об этом этапе являются наблюдения молекулярных линий поглощения в ультрафиолетовом диапазоне.

## 2. Переходы межзвёздных молекул в УФ-диапазоне

Среди молекул с переходами в ультрафиолетовом диапазоне основной интерес представляет, естественно, молекулярный водород в диффузной межзвёздной среде, поскольку в других диапазонах его массовое исследование невозможно. В условиях диффузных облаков молекула  $H_2$  находится преимущественно в основном ( $X^1\Sigma_g^+$ ) или в первых двух возбужденных электронных состояниях ( $B^1\Sigma_u^+$  и  $C^1\Pi_u$ ), разделенных энергиями, соответственно 11.2 эВ и 12.3 эВ. Каждое из этих состояний в свою очередь расщеплено на множество колебательных и вращательных уровней, поэтому переходы между ними образуют полосы, простирающиеся от 78 до 170 нм. Переходы между основным состоянием и состоянием  $B^1\Sigma^+$  называются полосой (или системой полос) Лаймана, переходы между основным состоянием и состоянием  $C^1\Pi_u$  – полосой Вернера. Количество линий в указанном диапазоне исчисляется многими тысячами. Например, в спектральном атласе (Roncin J.Y., Launay F., 1994) их более 12000 URL: <http://amrel.obspm.fr/molat/index.php?page=pages/Atlas/atlas.php>.

В УФ-диапазоне есть полосы и других гомоядерных молекул. В частности, полосы молекулы  $C_2$  расположены на длинах волн 131.4 нм, 134.2 нм и 231.3 нм. Линии молекулярного азота охватывают интервал от 80 нм почти до 130 нм причем, все сильные линии этой молекулы находятся на длинах волн короче 97 нм.

**таблица 1** – Классификация диффузных облаков

	диффузные атомарные	диффузные молекулярные	полупрозрачные (translucent)	плотные молекулярные
определяющая характеристика	$f_H(H_2) < 0.1$	$f_H(H_2) > 0.1 \quad f_C(C^+) > 0.5$	$f_C(CO) < 0.9 \quad f_C(C^+) < 0.5$	$f_C(CO) > 0.9$
$A_V$	0	0.2	1–2	5–10
$n_H, \text{см}^{-3}$	10–100	100–500	500–5000	>5000
T, K	30–100	30–100	15–50	10–50
методы исследования	УФ, оптика, 21 см	УФ, оптика, ИК, мм (погл)	оптика, ИК, мм, мм (изл)	ИК (погл), мм (изл)

Большим количеством линий в УФ-диапазоне (при  $\lambda < 160$  нм) обладает молекула CO. На длинах волн 122.2 нм и 307.8 нм располагаются электронные переходы гидроксила (OH). Несколько переходами в дальнем УФ-диапазоне обладают молекулы HF (95.1 нм), HCl (129.1 нм) и воды (124 нм). Таким образом, линии астрофизически интересных молекул попадают в диапазон примерно от 80 нм до 310 нм. Поскольку вращательные уровни находятся очень близко друг к другу, для разделения линий в полосах необходимо высокое спектральное разрешение, порядка 50000. Для сравнения в таблице 2 показаны возможности ряда реальных УФ-инструментов.

**таблица 2** – Спектральные характеристики основных УФ-инструментов

телескоп	диапазон	спектральное разрешение
Aerobee-150	100–150 нм	500
Copernicus	90–315 нм	20000
IUE	115–335 нм	13000–18000
HUT	82.5–185 нм	600
IMAPS	95–115 нм	80000
BEFS	90–120 нм	3000
GHRS	115–340 нм	80000
STIS	115–310 нм	30000–110000
FUSE	90.5–118.7 нм	20000
COS	115–320 нм	20000–24000

### 3. Наблюдения молекулярного водорода

Первые наблюдения линий поглощения лаймановской серии молекулярного водорода были проведены с борта ракеты «Aerobee-150» 13 марта 1970 года (Carruthers G.R., 1970), а первым крупномасштабным проектом по наблюдениям этих линий стала космическая обсерватория «Copernicus» (Savage B.D. et al., 1977). С её помощью была выявлена основная закономерность в распределении молекулярного водорода: его доля, оцениваемая по лучевым концентрациям H и H<sub>2</sub>

$$f(H_2) = 2N(H_2)/[2N(H_2) + N(HI)],$$

мала при E(B-V) < 0.08 (возрастая с увеличением E(B-V) и примерно постоянна и близка к единице при E(B-V) > 0.08. Эта закономерность согласуется с моделью фотодиссоциации молекулы водорода – процессом Соломона (Stecher T.P., Williams D.A., 1967). Согласно этой модели в дальнем УФ-диапазоне до лаймановского континуума ( $\lambda > 91.2$  нм) диссоциация молекулы водорода является двухступенчатым процессом. Сначала молекула поглощает квант в линии, соответствующей одному из переходов лаймановской или вернеровской серии, а затем с некоторой вероятностью переходит в колебательный континуум основного электронного состояния, т.е. диссоциирует. Поскольку диссоциация H<sub>2</sub> происходит в узких

линиях, в которых быстро набирается оптическая толщина, возникает эффект самоэкранирования: чем больше в среде молекул H<sub>2</sub>, тем эффективнее они защищают себя от диссоциации.

Наиболее масштабные исследования молекулярного водорода были проведены с помощью космического телескопа FUSE. Одной из основных задач этого инструмента был поиск «полупрозрачных» облаков (Rachford B.L. et al., 2002). Благодаря высокой чувствительности при наблюдениях на FUSE удалось продвинуться до значений E(B-V) порядка единицы, однако и этого оказалось недостаточно, чтобы получить качественные спектры звёзд, у которых на луче зрения доля молекулярного водорода приближается к единице. Максимальное значение f(H<sub>2</sub>) при наблюдениях на FUSE составило примерно 0.8 (Rachford B.L. et al., 2002).

Наблюдения показывают, что, помимо основного и первого вращательных состояний, у молекулы водорода заселены и состояния с большими значениями J, причём температуры возбуждения, определённые по низким и высоким вращательным уровням, не совпадают. Если населённости уровней J=0 и J=1 соответствуют кинетической температуре в несколько десятков градусов, то температура возбуждения более высоких уровней измеряется уже в сотнях кельвинов (Jenkins E.B., Peimbert A., 1997). Не исключено, что высокие вращательные уровни молекулы H<sub>2</sub> заселяются в результате не столкновительных, а радиативных переходов. В некоторых случаях по наблюдениям при помощи спектрографов GHRS и STIS на космическом телескопе им. Хаббла отмечена также заселенность высоких колебательных уровней, которая, вероятно, связана с веществом в непосредственных окрестностях наблюданной звезды (Federman S.R. et al., 1995; Meyer D.M. et al., 2001).

### 4. Наблюдения других молекул

После H<sub>2</sub> наиболее распространенной космической молекулой является оксид углерода. Поскольку он хорошо наблюдается в радиодиапазоне, его часто используют в качестве индикатора молекулярного водорода в предположении, что относительное содержание молекул CO и H<sub>2</sub> примерно постоянно. Для оценки лучевой концентрации молекулярного водорода по наблюдениям CO используют так называемый X-фактор, равный отношению N(H<sub>2</sub>)/I(CO), где I(CO) – интегральная интенсивность линии CO(1–0). Ультрафиолетовый диапазон удобен для калибровки зависимости лучевых концентраций H<sub>2</sub> и CO, поскольку позволяет одновременно наблюдать линии обеих молекул. Сравнение лучевых концентраций молекул водорода и оксида углерода показывает, что линии CO – не лучший индикатор H<sub>2</sub>. Как показано в работе (Burgh E.B. et al., 2007), зависимость N(CO) от N(H<sub>2</sub>), во-первых, нелинейна, во-вторых, обла-

дает разбросом, превышающим порядок величины. Не исключено, что лучшими индикаторами могут оказаться другие компоненты, также наблюдаемые в ультрафиолетовом диапазоне – СН или С+.

Ещё одна задача, которую можно решать с помощью наблюдений в УФ-диапазоне, состоит в определении относительного содержания изотопомеров различных молекул, в частности Н<sub>2</sub> и HD или <sup>12</sup>CO и <sup>13</sup>CO. Например, в работе (*Federman S.R. et al.*, 2003) по наблюдениям на спектрографе GHRS были определены относительные содержания изотопомеров молекулы CO – <sup>13</sup>CO и C<sup>18</sup>O в направлениях на некоторые звёзды в созвездии Змееносца. При этом выяснилось, что отношение лучевых концентраций <sup>12</sup>CO/<sup>13</sup>CO равно примерно 120, а отношение лучевых концентраций C<sup>16</sup>O/C<sup>18</sup>O – примерно 1000. Оба значения в два раза превышают космические отношения содержаний изотопов С и О по полному числу атомов. Причиной является химическое разделение изотопов: скорости фотодиссоциации молекул <sup>13</sup>CO и C<sup>18</sup>O превышают скорость фотодиссоциации молекулы CO. Поскольку линии <sup>13</sup>CO и C<sup>18</sup>O весьма активно используются в исследованиях дозвёздных ядер, знание их относительного содержания на предшествующих стадиях необходимо как для моделирования, так и для интерпретации наблюдений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Спектрографы космической обсерватории «СПЕКТР-УФ» (*Шустов Б.М. и др.*, 2014; *Сачков М.Е. и др.*, 2014) благодаря чувствительности и высокому спектральному разрешению открывают богатейшие перспективы исследования самых ранних стадий звездообразования, начиная с этапа диффузных атомарных облаков (см. детальное описание проекта в работах (*Boyarchuk A.A.*, 2013; *Shustov B. et al.*, 2014; *Sachkov M. et al.*, 2014 I, II). Научные задачи проекта представлены в работе (*Malkov O. et al.*, 2011). В спектральный диапазон приборов обсерватории попадают линии множества межзвёздных молекул, в том числе, что особенно важно, линии лаймановской серии молекулярного водорода. Возможности спектральных исследований звёзд с помощью обсерватории «ВКО-УФ» представлены в работах (*Sachkov M.*, 2010; *Sachkov M.*, 2014). Одновременное наблюдение линий различных молекул позволит решить такие актуальные астрофизические задачи, как поиск индикаторов молекулярного водорода, определение относительного содержания изотопомеров распространенных молекул, определение молекулярного состава диффузных и «полупрозрачных» облаков и многие другие.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Wiebe D.Z.* // Звездообразование в Галактике и за ее пределами: сб. / Под ред. Д.З. Вибе, М.С. Кирсановой. М.: Янус-К, 2006. С. 64.

*Сачков М.Е. и др.* Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ»// Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 34-39.

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

*Aikawa Y., Wakelam V., Garrod R.T., Herbst E.* // ApJ. 2008. 674. P. 984.

*Bergin E.A., Tafalla M.* // ARA&A. 2007. 45. P. 339.

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

*Burgh E.B., France K., McCandliss S.R.* // ApJ. 2007. 658. P. 446.

*Carruthers G.R.* // ApJL. 1970. 161. L81.

*Federman S.R., Cardelli J.A., van Dishoeck E.F., Lambert D.L., Black J.H.* // ApJ. 1995. 445. P. 325.

*Federman S.R., Lambert D.L., Sheffer Y., Cardelli J.A. et al.* // ApJ. 2003. 591. P. 986.

*Jenkins E.B., Peimbert A.* // ApJ. 1997. 477. P. 265.

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

*Meyer D.M., Lauroesch J.T., Sofia U.J., Draine B.T., Bertoldi F.* // ApJL. 2001. 553. L59.

*Pavlyuchenkov Ya., Wiebe D., Launhardt R., Henning Th.* // ApJ. 2006. 645. P. 1212.

*Rachford B.L., Snow Th.P., Tumlinson J., Shull J.M. et al.* // ApJ. 2002. 577. P. 221.

*Roberts H., Herbst E.* // A&A. 2002. 395. P. 233.

*Roncin J.-Y., Launay F.* Atlas of the Vacuum Ultraviolet Emission Spectrum of Molecular Hydrogen. 1994.

*Sachkov M.* UV observations of sdB stars and prospects of WSO-UV mission for such studies // Astrophys. Space Sci. 2010. 329. P. 261-266.

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

*Sachkov M.E.* Study of pulsations of chemically peculiar A stars. II. // Astrophysical Bulletin. 2014. 69. P. 40-45.

*Savage B.D., Bohlin R.C., Drake J.F., Budich W.* // ApJ. 1977. 216. P. 291.

*Semenov D., Wiebe D., Henning Th.* // A&A. 2004. 417. P. 93.

*Shematovich V.I., Wiebe D.S., Shustov B.M., Li Zhi-Yun.* // ApJ. 2003. P. 588. 894.

*Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al.* WSO-UV progress and expectations // Astrophys. Space Sci. 2014. 354. P.155-161.

*Snow Th.P., McCall B.J.* // ARA&A. 2006. 44. P. 367.

*Steecher T.P., Williams D.A.* // ApJL. 1967. 149. L. 29.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016 г.

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА «ВКО-УФ» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ



**Л.Н. Макарова<sup>1</sup>,**  
кандидат физико-  
математических наук,  
*lidia.makarova@gmail.com;*  
**L.N. Makarova**

Рассматриваются вопросы изучения звездообразования и эволюции близких карликовых галактик. Описывается метод определения истории звездообразования галактик с помощью моделирования диаграммы показатель цвета – звёздная величина разрешенных звёзд в карликовых галактиках.

Приведены результаты измерений темпа звездообразования, а также его зависимости от времени и металличности для выборки карликовых нерегулярных и карликовых сфероидальных галактик в двух близких группах галактик *M81* и *Cen A*.

Особо отмечены найденные нами подобные по времени периоды звездообразования в галактиках центральной части группы *M81*, необычно высокий уровень обогащения металлами для ряда галактик группы *Cen A*.

**Ключевые слова:**  
звездообразование;  
проект «СПЕКТР-УФ».

## PROSPECTS OF THE «WSO-UV» PROJECT FOR STUDY OF A STAR FORMATION IN NEARBY DWARF GALAXIES



**Д.И. Макаров<sup>1</sup>,**  
кандидат физико-  
математических наук,  
*lidia.makarova@gmail.com;*  
**D.I. Makarov**

*In the present work we consider the questions of star formation and evolution of nearby dwarf galaxies. We describe the method of star formation history determination based on multicolor photometry of resolved stars and models of color-magnitude diagrams of the galaxies. We present the results of star formation rate determination and its dependence on age and metallicity for dwarf irregular and dwarf spheroidal galaxies in the two nearby galaxy groups *M81* and *Cen A*. Similar age of the last episode of star formation in the central part of the *M81* group and also unusually high level of metal enrichment in the several galaxies of the *Cen A* group have to be mentioned. We pay special attention to the consideration of perspectives of star formation study in nearby dwarf galaxies with the new WSO-UV observatory.*

**Key words:**  
star formation;  
«SPEKTR-UF» project.

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия, Карачаево-Черкесская Республика, Нижний Архыз.

Special Astrophysical Observatory, Russia, Karachai-Cherkessian Republic, Nizhnij Arkhyz.

## введение

Изучение звездообразования в галактиках является одной из первостепенных задач современной астрономии, поскольку именно параметры звёздного населения галактик могут дать ответ на те вопросы, которые всегда интересовали астрономов: когда и каким образом образовались галактики, как происходит звездообразование в них, и как оно меняется со временем. В решении этих важных вопросов особое место занимают близкие (с расстоянием до 10 Мпк) карликовые (с абсолютной величиной  $M_B > -17$  зв. вел.) галактики. Масса таких галактик сравнительно невелика, а структура относительно проста, что позволяет подробно изучать и моделировать процессы, происходящие в них. Кроме того, близкие галактики разрешаются на отдельные звёзды, это даёт возможность напрямую изучать звёздное население в таких объектах. Прямые изображения близких карликовых галактик позволяют также определить ряд общих параметров, таких, как интегральные звёздные величины и показатели цвета, а исследование распределения поверхностной яркости (а также подсчеты звёзд) даёт дополнительные возможности для определения происхождения и эволюции галактик.

Половина галактик Местного Объёма, с расстоянием меньше 10 Мпк, расположены в гравитационно связанных группах. Наличие одной или нескольких крупных центральных галактик (гигантские спиральные, или, реже, эллиптические галактики) и системы карликовых галактик – спутников, по-видимому, оказывает заметное влияние на эволюцию и звездообразование в этих галактиках. Однако степень и механизмы этого влияния пока плохо изучены. Значительный интерес представляют также изолированные карликовые галактики (галактики поля). В отличие от галактик, расположенных в группах, такие объекты должны эволюционировать без заметного влияния извне. Изучение их истории звездообразования и сравнение с объектами в группах поможет прояснить многие вопросы, связанные с образованием и эволюцией галактик во Вселенной. Заметим, что изучение детальной истории звездообразования (SFH) разрешённых на звёзды галактик происходит до сих пор в основном с использованием широкополосной B, V, I фотометрии звёзд в галактиках. Однако запуск проекта «Всемирная космическая обсерватория – Ультрафиолет» («СПЕКТР-УФ», «ВКО-УФ») открывает новые уникальные перспективы исследования близких карликовых галактик также в ближнем ультрафиолетовом диапазоне, если учесть, что предполагаемые возможности камер поля этой обсерватории будут сравнимы (а возможно, по некоторым параметрам и превзойдут) возможностям космического телескопа Хаббла (*Boyarchuk A.A. et al.*,

2013, *Shustov B.B. et al.*, 2014; *Sachkov M. et al.*, 2014. I, II). Такие исследования особенно важны для изучения как древнего, так и современного звездообразования. Подробнее перспективы таких исследований мы рассмотрим в заключительной части.

Для сравнительно простых систем (например шаровых или рассеянных скоплений), содержащих звёзды примерно одного возраста и металличности, задача определения истории звездообразования сводится к приближению теоретических звёздных изохрон к наблюдаемому распределению звёзд на диаграмме цвет – звёздная величина данного скопления (*Panagia N., Tosi M.*, 1980). Галактики же, как правило, содержат смесь звёзд различного возраста и, нередко, различной металличности. Простое приближение теоретических изохрон звёзд даёт лишь грубое представление о возрасте и металличности звёздного населения данной галактики, но не даёт количественных оценок интенсивности звездообразования. Работы, предлагающие количественное исследование истории звездообразования в галактиках, появились в конце 80–90-х годов (*Tosi M. et al.*, 1989; *Tolstoy E.*, 1996; *Aparicio A. et al.*, 1997). Все они основаны на построении набора искусственных диаграмм цвет – звёздная величина из теоретических звёздных изохрон различных возрастов и металличностей с учетом наблюдаемых фотометрических ошибок, расстояния, покраснения и начальной функции масс (IMF). Затем эти модельные диаграммы сравниваются с наблюдаемой диаграммой цвет-звёздная величина (CMD). Таким образом, история звездообразования определяется моделью, дающей наилучшее приближение. Этот метод продолжает быстро развиваться и уточняться (*Dolphin A.*, 2000; *Harris J., Zaritsky D.*, 2001; *Ng Y.K.*, 2002).

Истории звездообразования карликовых галактик Местной Группы изучены подробно, с использованием глубоких изображений, полученных на крупных наземных телескопах и космическом телескопе Хаббла (*Holtzman J. et al.*, 2000; *Han M. et al.*, 1997; *Da Costa G. et al.*, 1996; *Martinez-Delgado D., Aparicio A.*, 1998; *Monkiewicz J. et al.*, 1999). Однако об истории звездообразования карликовых галактик за пределами Местной Группы такой информации очень мало. Изображения около 200 галактик были получены сканерами Wide Field Planetary Camera 2 (WFPC2) и Advanced Camera for Surveys (ACS) космического телескопа Хаббла в рамках проекта определения точных фотометрических расстояний (*Karachentsev I.D. et al.*, 2007) до близких карликовых галактик (в основном в пределах 6–7 Мпк). Звёздная фотометрия этих объектов позволяет во многих слу-

чаях измерить историю звездообразования карликовых галактик. Чтобы проанализировать этот большой и однородный набор данных, мы создали программу для количественного анализа истории звездообразования (*Makarov D., Makarova L., 2004*) с учётом особенностей данного обзора.

## **1. Описание метода определения истории звездообразования**

Наблюдаемое распределение звёзд на диаграмме показатель цвета – звёздная величина (CMD) является линейной суперпозицией всех звёзд, родившихся в галактике в течение её жизни и находящихся на различных стадиях эволюции. Несколько дополнительных параметров также оказывают сильное влияние на это фотометрическое распределение: расстояние до объекта, наличие внешнего и внутреннего поглощения и фотометрические ошибки. Наблюдательные данные и модельные данные используются в виде Hess-диаграммы, которая представляет собой двумерную гистограмму, показывающую количество звёзд в определенном диапазоне (ячейке) звёздных величин и показателя цвета. Оптимальный размер ячейки зависит от особенностей фотометрических данных. Построение модельных Hess-диаграмм происходит на основе теоретических изохрон, каждая из которых соответствует определенному возрасту и металличности, а весь набор этих моделей занимает достаточно широкий диапазон возрастов и металличностей звёздного населения. При создании модельных диаграмм учитываются модуль расстояния и величина поглощения, которая может быть выбрана различной для звёзд различного возраста, чтобы моделировать наличие газа и пыли в областях недавнего звездообразования. Точность и полнота фотометрии задается в виде таблицы, получаемой в результате моделирования большого числа искусственных звёзд. Задача определения SFH сводится к нахождению такой линейной комбинации модельных CMD для различных возрастов и металличностей, которая наилучшим образом приближала бы наблюдательные данные.

Основным и, пожалуй, наиболее трудоёмким этапом определения SFH является построение модельных CMD. Мы строим аналитическую функцию распределения звёзд на Hess-диаграмме для каждой изохроны, соответствующей некоторой металличности и возрасту звёзд, с учетом IMF, ошибок фотометрии, размера ячейки Hess-диаграммы, модуля расстояния и поглощения. Аналогичный подход реализует (*Dolphin A., 1997*). Мы используем изохроны из работы (*Girardi L. et al., 2000*). Изохроны опубликованы для широкого диапазона металличности от  $Z=0.0001$  до  $Z=0.03$  и для возраста от E6.6 до E10.25

лет с равномерным шагом 0.05 в логарифмической шкале. Для начальной функции масс используется закон Салпетера:  $\rho(m) \times dm \sim m^{-2.35} \times dm$ .

Нормировка была выбрана таким образом, чтобы полная интегральная вероятность равнялась единице в пределах 0.1–100 масс Солнца. Для данной изофоты масса звезды полностью определяет её наблюдательные характеристики. Из искусственной фотометрии мы знаем вероятность обнаружения звёзд данной яркости, дисперсию измерений относительно среднего и смещение среднего относительно истинного значения. Всё это позволяет полностью определить вероятность появления звезды данной массы в любом бине Hess-диаграммы.

При сравнении модели с реальной Hess-диаграммой необходимо учесть, что CMD других галактик засоряются звёздами, принадлежащими нашей Галактике. Для решения этой проблемы обычно наблюдают второе поле возле объекта исследований, чтобы получить CMD звёзд нашей Галактики. Эти фоновые звёзды затем статистически вычитаются из набора звёздной фотометрии исследуемой галактики. К недостаткам этого метода, пожалуй, стоит отнести, добавление дробового шума в исследуемую диаграмму. Второй подход основан на вычитании из наблюдаемой Hess-диаграммы модели, соответствующей звёздам фона.

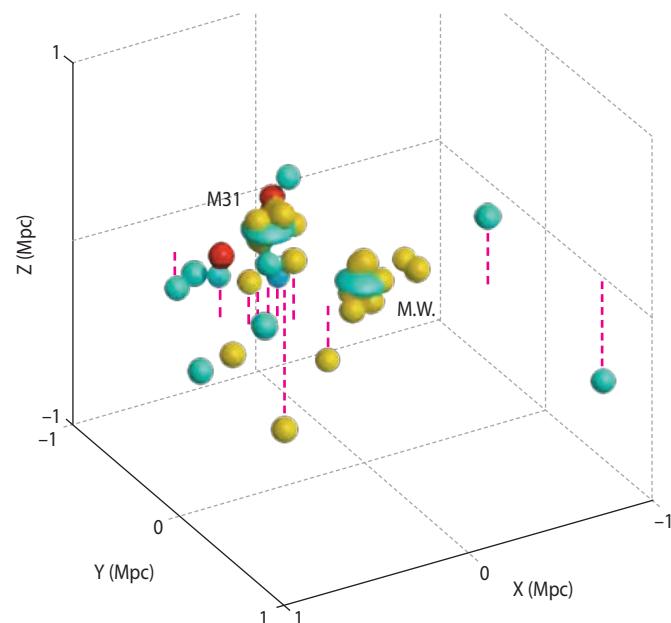
Для определения SFH мы должны найти линейную комбинацию частичных модельных CM-диаграмм, наилучшим образом соответствующую наблюдательным данным. Во-первых, мы находим наиболее значимые переменные (т.е. частичные модельные CMD), которые отличаются от нуля с заданной вероятностью. Во-вторых, определяем величины значимых переменных методом максимального правдоподобия. Отметим, что распределение звёзд в бинах Hess-диаграммы следует статистике Пуассона, а не Гаусса, и решение методом наименьших квадратов (наиболее очевидный подход) будет давать смещённую оценку искомых параметров. Таким образом, мы строим функцию максимального правдоподобия для нашей задачи.

Чтобы найти наилучшее решение, на каждом шаге отбирается переменная, наиболее сильно коррелирующая с наблюдательными данными, с учетом уже включенных в регрессию переменных. Надёжность получаемых оценок темпов звездообразования существенно зависит от количества звёзд, приходящихся на данную изохрону, а также от того, насколько сильно скоррелированы соседние изохроны. Если количества звёзд на CM-диаграмме недостаточно, чтобы различить две близкие изохроны, то темпы звездообразования, полученные для этих эпох, могут быть весьма неточными из-за тесной корреляции между изохронами. Эта ситуация наи-

более драматична для молодых звёзд, где промежутки времени между изохронами малы. К тому же молодые массивные звёзды встречаются в карликовых галактиках достаточно редко. С другой стороны, при исследовании самого старого звёздного населения сильно возрастает роль ошибок измерения звёздных величин, которые замывают особенности тем сильнее, чем более слабые звёзды мы хотим изучать. Поэтому мы вынуждены, как правило, жертвовать времененным разрешением метода ради надёжности получаемых оценок. Наши эксперименты показали, что на молодые изохроны приходится так мало звёзд, а изохроны между собой настолько сильно скоррелированы, что нет смысла, за исключением редких случаев, делать временное разрешение лучше, чем 10 млн лет.

## 2. Местная Группа галактик

Местная Группа демонстрирует весьма разнообразную коллекцию карликовых галактик, включающую объекты широкого диапазона масс, светимостей и с разнообразным звёздным населением. Группа содержит около 40 объектов, большинство из которых являются карликовыми галактиками. Трёхмерная структура Местной Группы показана на рисунке 1. История звездообразования карликовых галактик в Местной Группе представлена в целом ряде работ, опубликованных за последние 10 лет. Один из наиболее полных обзоров различных свойств и параметров был приведён в (Grebel E., 2005). Количественное определение темпов звездообразования карликовых галактик в зависимости от возраста и металличности разрешенного звёздного населения даётся в большой и детальной работе (Dolphin A. et al., 2005), где авторы используют архивные данные космического телескопа Хаббла, полученные ACS и WFPC2. Мы не будем здесь рассматривать подробно эту работу, упомянем лишь основные выводы. Авторы нашли, что среди карликовых сфероидальных и карликовых эллиптических галактик имеется корреляция между абсолютной звёздной величиной и длительностью эпохи звездообразования, в том смысле, что более яркие галактики обычно формируют звёзды в течение более длительного периода времени. Карликовые иррегулярные галактики показывают другую зависимость от абсолютной звёздной величины: самые яркие системы имеют самое стабильное звездообразование. Интересно, что, несмотря на некоторые общие тенденции в историях звездообразования различных систем, в Местной Группе не существует двух галактик с похожей историей звездообразования. Это отмечают многие исследователи.



**рисунок 1.** Трёхмерная структура Местной Группы галактик

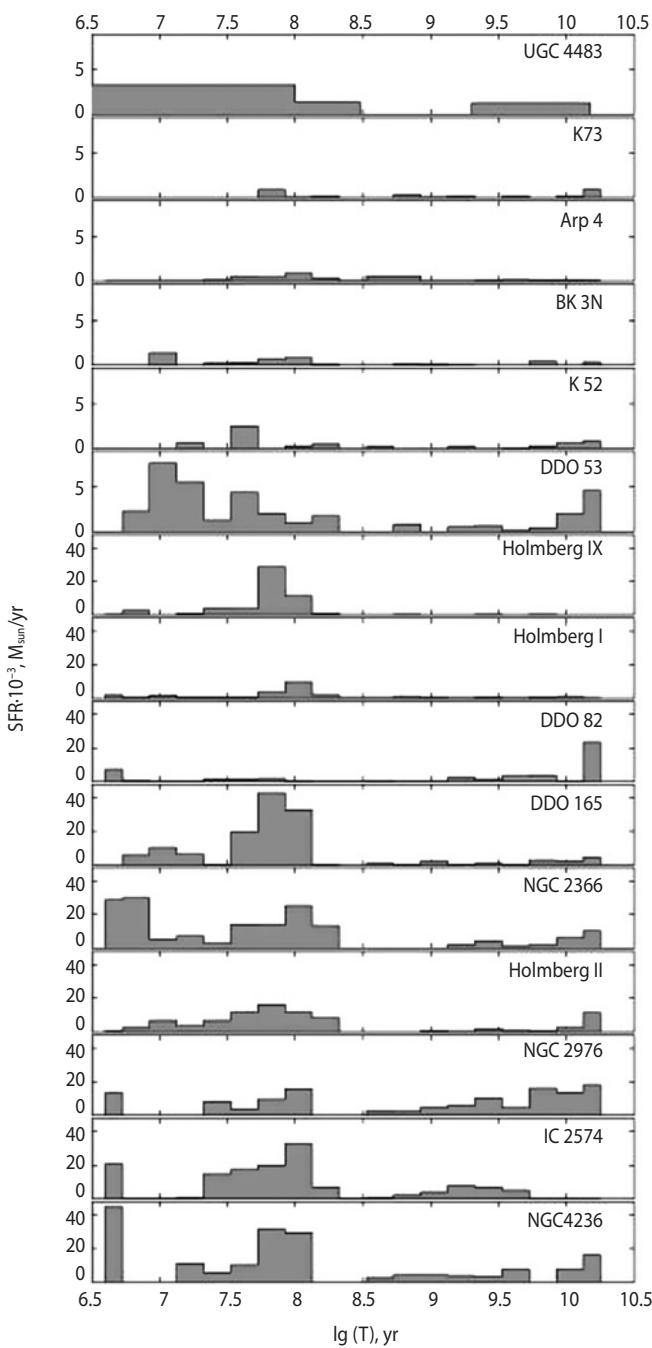
## 3. Группа M81

Группа M81 – одна из ближайших к нам групп галактик (среднее расстояние около 3.6 Мпк). Эта группа является также примером сильного взаимодействия в центральной части, так как доминирующие галактики M81, M82, NGC3077 и NGC2976 заключены в огромное облако HI, с протяжёнными приливными мостами между компонентами (Yun M., Ho P., Lo K., 1994). Существуют доказательства того, что в результате сильного взаимодействия около 200 млн. лет назад образовалось как минимум четыре приливных карликовых галактики (Makarova L. et al., 2002).

Мы принимали участие в нескольких наблюдательных программах на HST с использованием камер WFPC2 (Snapshot survey of nearby galaxies, proj. 8192 и 8601) и ACS (proj. 9771 и 10235). Эти наблюдения предоставили нам уникальную возможность определения расстояний до примерно 200 галактик Местного Объёма Вселенной с точностью не менее 10 процентов.

Гистограммы на рисунке 2 представляют результаты наших измерений истории звездообразования 15 карликовых иррегулярных галактик группы M81. Более крупные и яркие галактики выборки (например NGC4236, IC2574 и NGC2976) показывают признаки непрерывного звездообразования, в то время как в галактиках меньших размеров и более низкой поверхности яркости мы можем различить два или три отдельных эпизода звездообразования. Металличность разрешенного звёздного населения в среднем достаточно высока (вплоть до  $[Fe/H]=-0.4$ ) со значительным разбросом около 1 dex.

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА «ВКО-УФ» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ



**рисунок 2.** История звездообразования карликовых иррегулярных галактик в группе M81

Дальнейший прогресс в изучении карликовых галактик группы M81 был достигнут после наблюдений с HST/ACS и использования архивных данных. Мы изучили историю звездообразования девять карликовых галактик в центральной части (<300 Кпк) группы M81 (рисунок 3). Это в основном карликовые сфероидальные галактики, которые, как известно, концентрируются обычно ближе к гравитационному центру группы галактик. Фотометрия разрешенных звёзд в галактиках была выполнена с помощью пакета DOLPHOT (*Dolphin A.*, 2002). Фотометрические расстояния всех галактик выборки были определены по вершине ветви красных гигантов с использовани-

ем нашей программы TRGBtool, реализующей метод максимального правдоподобия. Для определения истории звездообразования мы использовали наш пакет StarProbe (*Makarov D., Makarova L. et al.*, 2006). Отметим, что большинство рассматриваемых галактик имеют близкий по возрасту эпизод последнего звездообразования от 300 млн. до 1 млрд. лет назад. Возможно, это усиление звездообразования связано с сильным взаимодействием галактик в центральной части группы в этот период времени.

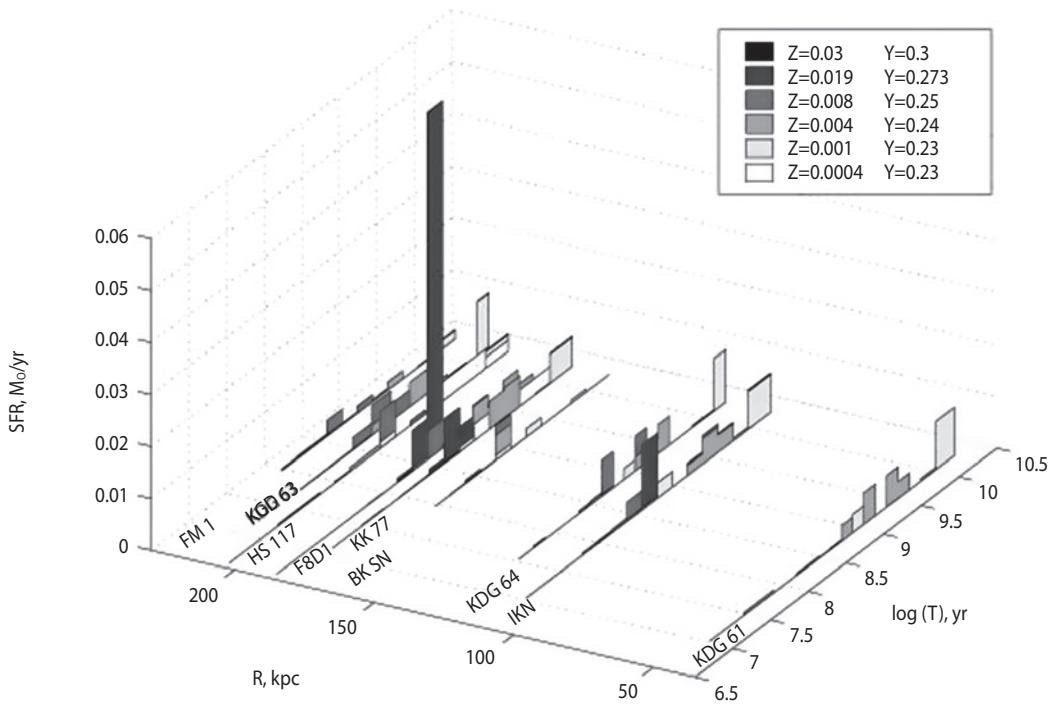
## 4. Группа Centaurus A

Группа галактик Centaurus A также является одной из ближайших к нам групп галактик. Она расположена в южной полусфере неба примерно на том же расстоянии от нас (3.8 Мпк), что и группа M81. Интересно, что структура этих двух групп (а также структура нашей собственной Местной Группы) имеет ряд общих особенностей, в том смысле, что каждая из них пространственно поделена на две подгруппы (Milky Way – M31, M81 – NGC 2403, Cen A – M83). Но морфология области Cen A/M83 особенно интересна, поскольку одна из доминирующих галактик Cen A является гигантской эллиптической галактикой. Не считая галактики Maffei 1, которая находится в зоне сильного поглощения, Centaurus A является единственной большой эллиптической галактикой в близкой Вселенной. Вполне возможно, что группа Центавра в связи с этим является динамически более проэволюционированной, чем Местная Группа и группа M81, центральными системами в которых являются гигантские спирали. Трехмерная структура группы Centaurus A показана на рисунке 4.

Размер сфер, которыми обозначены галактики, соответствует абсолютной величине объекта. Серыми сферами обозначены карликовые иррегулярные галактики, а черными – сфероидальные.

Большинство известных членов комплекса Cen A/M83 наблюдалось в рамках упомянутых выше проектов на HST и обрабатывалось с помощью пакетов программ, названных в предыдущей главе. История звездообразования карликовых галактик, расположенных на расстоянии не более 300 Кпк от центральной галактики Cen A, изображена на рисунке 5.

Несколько особенностей звездообразования следуют из наших измерений. Во-первых, большинство галактик демонстрируют два отдельных (и близких по времени) эпизода звездообразования. Более древний произошел, по-видимому, 10–13 млрд. лет назад, причём звёзды имели низкую металличность. Второй, более современный, период усиленного звездообразования в среднем имеет временные рамки от 0.1 до 1 млрд. лет назад. Карликовые иррегулярные галактики показывают также некоторые признаки звездообразования, продолжающегося и сейчас. Второй найденной нами особенностью является то, что несколько изучаемых галактик имеют необычно высокую степень обогащения металлами, при кото-



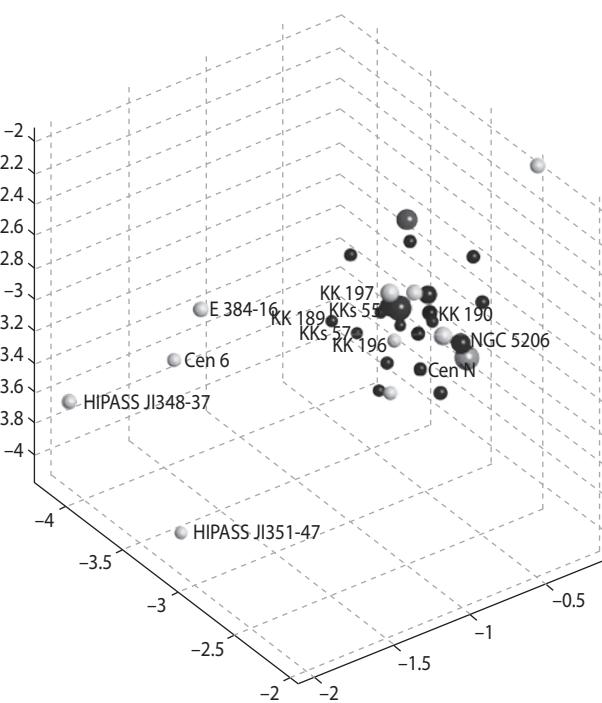
**рисунок 3.** История звездообразования карликов в центральной части группы M81

рой последний эпизод звездообразования характеризуется металличностью звёзд вплоть до солнечной, а возможно, и несколько выше (такие объекты, как KK197 и ESO269-066). Такой высокий уровень металличности может быть объяснён сильным взаимодействием между членами группы в ходе эволюции или даже поглощением одной или нескольких звёздных систем.

## 5. Перспективы

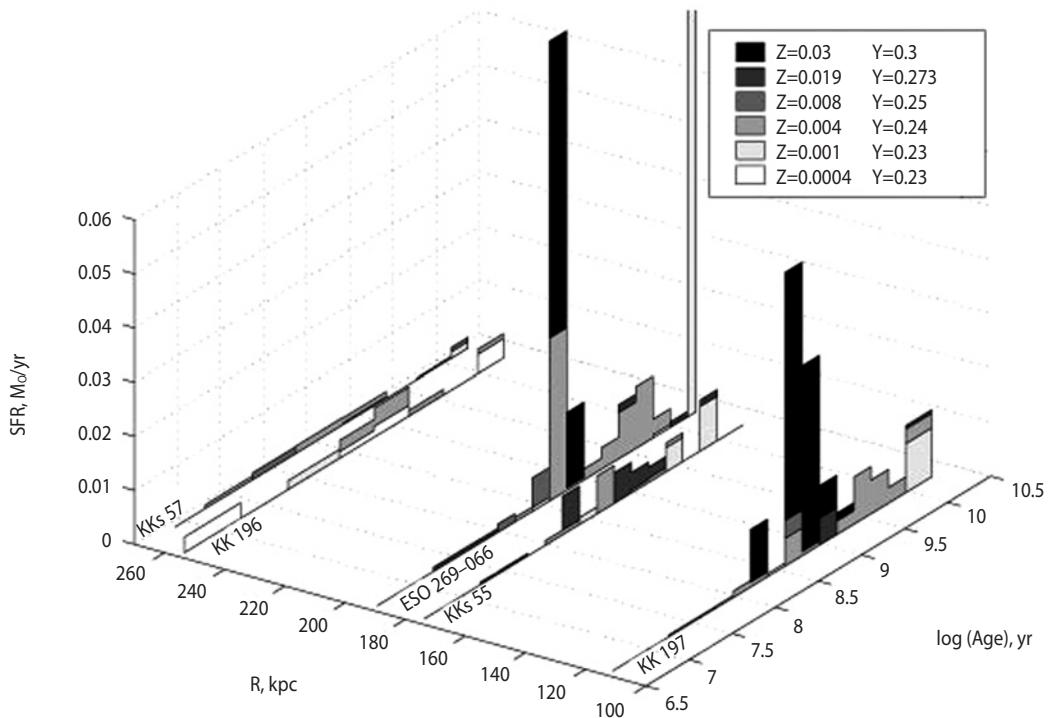
Близкие карликовые галактики предоставляют нам уникальные возможности для изучения звёздного населения, что, в свою очередь, позволяет пролить свет на такие важные проблемы, как происхождение и эволюция карликовых галактик. Несмотря на то, что история звездообразования галактик Местной Группы изучена сравнительно детально, в целом звездообразование в галактиках Местного Объёма Вселенной изучено плохо. Остаются невыясненными многие вопросы, касающиеся как происхождения карликовых галактик, так и их эволюции, а также зависимости этой эволюции от окружения изучаемых объектов.

Среди крупных проектов, которые пытались заполнить этот пробел в последние несколько лет, следует отметить работы (Dalcanton J. et al., 2007). Авторы проекта провели глубокие исследования с HST/ACS и HST/WFPC2 некоторых карликовых галактик с расстоянием не более 3 Мпк в широкополосных фильтрах, близких к B, V и I, чтобы определить их историю звездообразования и другие свойства звёздного населения этих карликовых галактик. Однако, несмотря на то, что этот крупный проект позволил получить глубокие диаграммы цвет – звёздная величина для некоторых близких галактик, эти усилия следует признать далеко не достаточными. Запуск нового спутника «ВКО-УФ» предоставляет нам совершенно уникальные возможности для изучения происхождения и эволюции близких карликовых галактик. Возможности спектральных исследований обсерватории «ВКО-УФ» рассмотрены в работах (Sachkov M., 2010;



**рисунок 4.** Пространственная структура группы Cen A

# ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОЕКТА «ВКО-УФ» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ В КАРЛИКОВЫХ ГАЛАКТИКАХ



**рисунок 5.** История звездообразования карликов в центральной части группы Сен А

(*Sachkov M.E., 2014*). Оснащение этого спутника камерой с большим полем зрения в несколько угловых минут позволит получить детальные изображения большинства карликовых галактик в Местном Объёме вплоть до 8–10 Мпк. В самом деле, значение такого однородного набора изображений, полученного в фильтрах U, B, V и I, невозможно переоценить. Такие наблюдения позволят нам решать одновременно ряд важнейших задач:

1. Глубокие экспозиции позволяют разрешить отдельные звёзды, вплоть до населения не только ветви красных гигантов, но и менее яркой горизонтальной ветви гигантов для галактик с расстоянием вплоть до 3 Мпк.

2. Наличие ультрафиолетового фильтра даёт уникальную возможность детально изучить свойства звёздного населения с возрастом до 30–50 млн. лет. Для более далеких галактик, где разрешение не позволяет с уверенностью говорить о том, что мы видим отдельные звёзды, применима методика изучения распределения поверхностной яркости и показателя цвета по телу галактики (*Makarova L., 1999*). Современные звёздные модели к тому же позволяют оценить возраст и металличность звёздного населения, если мы будем иметь изображения галактик как в видимом, так и в ультрафиолетовом диапазоне. Заметим, что основная часть карликовых галактик поместится в поле 5 угловых минут целиком, что позволяет судить о свойствах изучаемых объектов в целом.

Оснащение спутника камерой поля с разрешением, сравнимым с разрешением HST/ACS, даёт дополнительную уникальную возможность изучать области молодых звёзд в близких карликовых галактиках. Разрешение на отдельные звёзды таких областей в большинстве близких карликовых галактик может снабдить нас уникальным набором однородных данных в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазоне, которые могут пролить свет на эволюцию и образование звёздного населения карликовых галактик в современную эпоху. Задачи исследования звездообразования в карликовых галактиках включены в базовую российскую программу проекта «ВКО-УФ» (*Malkov O. et al., 2011*).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Aparicio A., Gallart C., Bertelli G. // Astronomical Journal (AJ). 1997. V. 114, №. P. 680.*
- Boyarchuk A.A., Shustov B.M., Moisheev A.A., Sachkov M.E. «SPEKTR-UF» Project // Solar System Research. 2013. V. 47, № 7. P. 499-507.*
- Da Costa G., Armandroff T., Caldwell N., Seitzer P. // Astronomical Journal. 1996. V. 112, №. P. 2576.*
- Dalcanton J., Williams B., Gogarten S., Weisz D. et al. // ANGST team. 2007. V. 211, №. P. 7905.*
- Dolphin A. A new method to determine star formation histories of nearby galaxies // New Astronomy. 1997. V 2, № 5. P. 397-409.*
- Dolphin A. Hubble Space Telescope Studies of the WLM Galaxy. II. The Star Formation History from Field*

Stars // *Astrophysical Journal (ApJ)*. 2000. V. 531, № 2. P. 804-812. DOI: 10.1086/308512.

*Dolphin A.* Numerical methods of star formation history measurement and applications to seven dwarf spheroidals // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (MNRAS)*. 2002. V. 332, № 1. P. 91-108.

*Dolphin A., Weisz D., Skillman E., Holtzman Jon A.* Star Formation Histories of Local Group Dwarf Galaxies // Review at the meeting «Resolved Stellar Populations», Cancun, Mexico, 18-22 April 2005. 30 p. URL: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0506430> (дата обращения: 29.06.2016).

*Girardi L., Bressan A., Bertelli G., Chiosi C.* Evolutionary tracks and isochrones for low- and intermediate-mass stars: From 0.15 to 7 M<sub>sun</sub>, and from Z=0.0004 to 0.03» // *Astronomy and Astrophysics Supplement (A&AS)*. 2000. V. 141. P. 371-383. DOI:10.1051/aas:2000126.

*Grebel E.* Stellar Populations in the Local Group of Galaxies // *AIP Conference Proceedings (AIPC)*. 2005. V. 752. P. 161-174.

*Han M., Hoessel J., Gallagher III J., Holtsman J. et al.* Stellar Populations in the Dwarf Elliptical Galaxy NGC 147 // *Astronomical Journal (AJ)*. 1997. V. 113, № 3. P. 1001-1010. DOI: 10.1086/118316.

*Harris J., Zaritsky D.* A method for determining the star formation history of a mixed stellar population // *Astrophysical Journal Supplement Series (ApJS)*. 2001. V. 136, № 1. P. 25-82. URL: <http://arxiv.org/pdf/astro-ph/0104202.pdf> (дата обращения: 29.06.2016).

*Holtzman J., Smith G., Grillmair C.* Stellar Populations in the Phoenix Dwarf (dIrr/dSph) Galaxy as Observed by Hubble Space Telescope WFPC2 // *Astronomical Journal (AJ)*. 2000. V. 120, № 6. P. 3060-3069. doi: 10.1086/316844.

*Karachentsev I.D., Tully R.B., Dolphin A., Sharina M. et al.* The Hubble Flow around the Centaurus A/M83 Galaxy Complex // *Astronomical Journal (AJ)*. 2007. V. 133, № 2. P. 504-517. DOI: 10.1086/510125.

*Makarov D., Makarova L.* Modeling the Star Population of Resolved Galaxies // *Astrophysics (Ap)*. 2004. V. 47, № 2. P. 229-241. DOI: 10.1023/B:ASYS.0000031838.50078.1a.

*Makarov D., Makarova L., Rizzi L., Tully B. et al.* Tip of the Red Giant Branch Distances. I. Optimization of a Maximum Likelihood Algorithm // *Astronomical Journal (AJ)*. 2006. V. 132, № 6. P. 2729-2742. DOI: 10.1086/508925.

*Makarova L.* Multi-colour photometry of nearby dwarf galaxies // *Astronomy and Astrophysics Supplement (A&AS)*. 1999. V. 139, № 3. P. 491-512. DOI: 10.1051/aas:1999402.

*Makarova L., Grebel E., Karachentsev I., Dolphin A. et al.* Tidal dwarfs in the M81 group: The second generation? // *Astronomy and Astrophysics (A&A)*.

2002. V. 396, № 2. P. 473-487. DOI: 10.1051/0004-6361:20021426.

*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*. 2011. V. 335. P. 323-327. DOI: 10.1007/s10509-010-0589-2.

*Martinez-Delgado D., Aparicio A.* The Star Formation History of the Local Group Dwarf Elliptical Galaxy NGC 185. I. Stellar Content // *Astronomical Journal (AJ)*. 1998. V. 115, № 4. P. 1462-1471. doi: 10.1086/300305.

*Monkiewicz J., Mould J., Gallagher III J. et al.* // Program in Aegean Scripts and Prehistory (PASP). 1999. V. 111. 1392.

*Ng Y.K., Brogt E., Chiosi C., Bertelli G.* Automatic observation rendering (AMORE) – I. On a synthetic stellar population's colour-magnitude diagram // *Astronomy and Astrophysics (A&A)*. 2002. V. 392, № 3. P. 1129-1147. DOI: 10.1051/0004-6361:20020760.

*Panagia N., Tosi M.* The chemical abundance gradient in the galaxy derived from an analysis of the H-R diagrams of open clusters // *Astronomy and Astrophysics (A&A)*. 1980. V. 81, № 3. P. 375-378.

*Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M., Moisheev A. et al.* WSO-UV progress and expectations // *Astrophysics and Space Science*. 2014. V. 354, № 1. P. 155-161. DOI: 10.1007/s10509-014-2119-0.

*Sachkov M.* UV observations of sdB stars and prospects of WSO-UV mission for such studies // *Astrophysics and Space Science*. 2010. V. 329, № 1. P. 261-266. DOI: 10.1007/s10509-010-0393-z.

*Sachkov M.E.* Study of pulsations of chemically peculiar A stars // *Astrophysical Bulletin*. 2014. V. 69, № 1. P. 40-45. DOI: 10.1134/S1990341314010040.

*Sachkov M., Shustov B., Savanov I., Gómez de Castro A.I.* WSO-UV project for high-resolution spectroscopy and imaging. I. // *Astronomische Nachrichten*. 2014. V. 335, № 1. P. 46-50. DOI: 10.1002/asna.201312015.

*Sachkov M., Shustov B., Gómez de Castro A.I.* WSO-UV project. II. // *Advances in Space Research*. 2014. V. 53, № 6. P. 990-995. doi: 10.1016/j.asr.2013.12.023.

*Tolstoy E.* The Resolved Stellar Population of Leo A // *Astrophysical Journal (ApJ)*. 1996. V. 462, № 2. P. 684-704. DOI: 10.1086/177182.

*Tosi M., Greggio L., Focardi P.* Star formation in dwarf irregular galaxies: preliminary results // *Astrophysical Journal Supplement Series (ApJS, Ap&SS)*. 1989. V. 156, № 1. P. 295-300. DOI: 10.1007/BF00646381.

*Yun M., Ho P., Lo K.* A high-resolution image of atomic hydrogen in the M81 group of galaxies // *Nature*. 1994. V. 372, № 6506. P. 530-532. DOI: 10.1038/372530a0.

Статья поступила в редакцию 29.06.2016 г.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

## EXPERIMENTAL UV-SPECTROSCOPY



**В.Е. Панчук<sup>1</sup>,**  
профессор,  
доктор физико-  
математических наук,  
*panchuk@ya.ru;*  
**V.E. Panchuk**



**В.Г. Клочкива<sup>1</sup>,**  
профессор,  
доктор физико-  
математических наук,  
*valenta@gmail.com;*  
**V.G. Klochkova**



**М.Е. Сачков<sup>2</sup>,**  
профессор РАН, доктор  
физико-математических  
наук, *msachkov@inasan.ru;*  
**M.E. Sachkov**

Сделана оценка основных параметров спектроскопических экспериментов в УФ-диапазоне электромагнитного спектра. Различные спектральные приборы сопоставляются в терминах их потенциального качества. Обсуждаются некоторые технические детали современных УФ-экспериментов и перспективы спектрографов проекта «ВСЕМИРНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ – УЛЬТРАФИОЛЕТ».

**Ключевые слова:**  
«ВСЕМИРНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ  
ОБСЕРВАТОРИЯ – УЛЬТРАФИОЛЕТ»;  
УФ-диапазон.

### введение

Возможности заатмосферной спектроскопии в ультрафиолетовом диапазоне определяются типом используемого приёмника излучения, габаритно-весовыми ограничениями приборного отсека, характеристиками системы ориентации и сопровождения объекта. Спектроскопические эксперименты можно разделить на следующие группы:

*Main parameters of experiments in the UV-spectral domain are described. Potential quality of various instruments is compared. Some technical details of current experiments and prospects of the «WSO-UV» mission are discussed.*

*Key words:*  
«WORLD SPACE OBSERVATORY –  
ULTRAVIOLET»;  
UV spectral.

- первые ракетные эксперименты (*Stecher Th.P., Milligan J.E., 1962; Morton D.C., Spitzer L.Jr., 1966; Carruthers G.R., 1968; Smith A.M., 1973*);
- спектроскопия с аэростатов (*Boksenberg A. et al., 1975; Bates B. et al., 1978*);
- орбитальные эксперименты 1969–1973 гг. (орбитальная астрономическая обсерватория ОАО-2

<sup>1</sup> Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Россия, Карачаево-Черкесская республика, Нижний Архыз.

Special Astrophysical Observatory, Russia, Karachai-Cherkessian Republic, Nizhnij Arkhyz.

<sup>2</sup> ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.  
Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow.

(Code A.D., 1969; Code A.D. et al., 1970), спутник TD-1A (Boksenberg A. et al., 1973), наблюдения с борта космического аппарата Союз-13 (Gurzadyan G.A., 1974);

- продолжительные орбитальные эксперименты (ОАО-3 «КОПЕРНИК» (Rogerson J.B. et al., 1973), «АСТРОН» (Boyarchuk A. et al., 2014));
- кратковременные эксперименты 80–90-х – ракетные эксперименты (Snow T.P. et al., 1988; Jenkins E.B. et al., 1989), а также эксперименты с использованием кораблей-членоков – HUT (Davidson A.F. et al., 1992), WUPPE (Nordsieck K.H. et al., 1994), эксперименты миссии ORFEUS: TUES (Barnstedt J. et al., 1999) и BEFS (Bowyer S., Hurwitz M., 1990);
- спектрографы телескопа HST: GHRS (Brandt J.C. et al., 1994), STIS (Woodgate B.E. et al., 1998), COS (Green J.C. et al., 2012);
- специализированные эксперименты FUSE (Moos H.W. et al., 2000) и GALEX (Martin D.C. et al., 2005).

Различные эксперименты принято сравнивать по параметру эффективной площади  $S$ , т.е. площади собирающей поверхности телескопа  $s$ , уменьшенной с учётом потерь света на всех поверхностях и квантовой эффективности приёмника  $Q$ . Однако такое сравнение справедливо только для приборов определенного класса. Например, спектральные системы, близкие по эффективной площади, могут различаться по числу одновременно передаваемых элементов спектра.

## 1. Параметр потенциального качества спектрального прибора $Z$

Перечисленные выше эксперименты можно сравнить, используя параметр потенциального качества спектрального прибора  $Z$ . Согласно Миберну (Meaburn J., 1976), сравнение различных спектральных приборов можно проводить по четырём основным параметрам: спектральному разрешению  $R=\lambda/\Delta\lambda$ , числу одновременно передаваемых элемен-

тов спектра  $N$ , числу одновременно регистрируемых пространственных элементов изображения  $M$  и светосиле по потоку  $L$ . Светосилу по потоку можно определить как произведение сечения пучка  $s$ , падающего на оптику, на коэффициенты потерь света на каждой из оптических поверхностей. Дополняя четыре параметра (RNML) параметром квантовой эффективности приёмника  $Q$ , получим  $Z=RNMLQ$ . Для объектов с малыми угловыми размерами произведение светосилы по потоку на квантовую эффективность равно эффективной площади,  $S=LQ$ , тогда  $Z=RNMS$ . Группируя эксперименты по типу приёмников излучения, мы составили таблицы 1–5. В тех случаях, когда экспериментальные данные не опубликованы, для оценок мы приняли одинаковый уровень потерь света на каждой поверхности (20%), уровень потерь на дифракционных решётках 30%, квантовую эффективность фотоэмulsionии 1%, квантовую эффективность ФЭУ – 10%. В ультрафиолетовом диапазоне эффективная площадь быстро изменяется с длиной волны, поэтому в большинстве случаев мы оценивали эффективность для близких длин волн  $\lambda$ . Подчеркнем, что результаты, приведённые в таблицах 1–5, являются оценочными и служат для качественного сравнения методов.

Из таблицы 1 следует, что при одном и том же светоприёмнике применение более эффективного спектрального прибора (интерферометра Фабри–Перо, установленного внутри дифракционного спектрографа (Bates B. et al., 1978), резко повышает потенциальное качество по сравнению с дифракционными спектрографами (Morton D.C., Spitzer L.Jr., 1966; Carruthers G.R., 1968; Smith A.M., 1973; Boksenberg A. et al., 1975; Gurzadyan G.A., 1974). Увеличение информационной ёмкости приёмника (переход к мелкозернистым электронографическим эмульсиям с повышенной  $Q$ ), также увеличивает  $Z$ . Эффективность многообъектного метода (Gurzadyan G.A., 1974) ограничивалась спектральным разрешением, а также числом элементов спектра  $N$ , определяемым точностью сопровождения и пропусканием призмы и линзового корректора на коротких длинах волн. Параллельно

**таблица 1** – Спектрографы с фотографической и электронографической регистрацией

эксперимент	R	N	M	S	Log Z	ссылки
Aerobee	1700	350	1	0.08	4.68	(Morton D.C., Spitzer L.Jr., 1966)
Aerobee	1100	450	1	26.5	7.12	(Carruthers G.R., 1968)
Aerobee	6000	2100	1	0.44	6.74	(Smith A.M., 1973)
Аэростат	28000	1500	1	0.42	7.24	(Boksenberg A. et al., 1975)
Аэростат	141250	12500	1	0.41	8.86	(Code A.D., 1969)
ОРИОН-2	175	120	100	0.19	5.60	(Gurzadyan G.A., 1974)

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА

**таблица 2** – Сканирующие спектрографы с фотоэлектронными умножителями ФЭУ

эксперимент	R	N	M	S	Log Z	ссылки
Aerobee	57	1	1	7	2.60	(Carruthers G.R., 1968)
OAO-2	150	1	1	14.8	3.35	(Code A.D., 1969)
TD-1	55	3	1	20.4	3.52	(Boksenberg A. et al., 1975)
OAO-3	24000	4	1	94.5	6.96	(Rogerson J.B. et al., 1973)
Астрон	4582	3	1	200	6.44	(Boyarchuk A. et al., 2014)
Астрон	69	3	1	200	4.62	(Boyarchuk A. et al., 2014)

методам фотографической регистрации развивались фотоэлектрические методы, основным недостатком которых было небольшое число (1–4) одновременно регистрируемых элементов спектра.

Из таблицы 2 видно, что потенциальное качество сканирующих систем определяется, в основном, величиной спектрального разрешения и площадью оптики телескопа. В обзорных экспериментах сканирование осуществлялось либо движением всего аппарата (Stecher Th.P., Milligan J.E., 1962; Boksenberg A. et al., 1975), либо движением дифракционной решётки (Code A.D., 1969; Rogerson et al., 1973; Boyarchuk A. et al., 2014). В экспериментах с высоким спектральным разрешением важную роль играла точность сопровождения объекта от 1 угл. с в работах (Code A.D., 1969; Code A.D. et al., 1970); до 0.2 угл. с в работе (Boyarchuk A. et al., 2014). Повышенное спектральное разрешение в (Rogerson J.B. et al., 1973) обеспечивалось за счёт более узкой входной щели (0.3 угл. с, относительно 1 угл. с в (Boyarchuk A. et al., 2014)). При оценке светосилы по потоку потери света на входной щели в таблице 2 не учтены.

Следующим важным шагом в технике внеатмосферной спектроскопии явился переход к режиму одновременной регистрации большого числа спектральных элементов с последующим считыванием заряда, накопленного в течение экспозиции на мишени телевизионной трубы. Применение схемы скрещенной дисперсии позволило оптимально сочетать формат изображения спектра с форматом мишени (768×768 элементов, считываемых с шагом 37 мкм). Оснащённые преобразователями УФ-излучения в видимое, приёмники длительное время работали на обсерватории IUE (Boggess A. et al., 1978).

Сравнение данных таблиц 1–3 показывает, что применение двумерного приёмника и схемы скрещенной дисперсии увеличивает Z более чем на два порядка (в режиме высокого спектрального разрешения). Оптоволоконная шайба, расположенная между UV-конвертером и мультищелочным фотокатодом SEC-видикона, снабжена сеткой реперов, что облегчало учёт масштабных искажений, неизбежных при использовании «нежесткого» светоприёмника. Сле-

**таблица 3** – Спектрографы высокого и низкого спектрального разрешения, оснащенные SEC-видиконами с УФ-конвертерами

эксперимент	R	N	M	S	Log Z	ссылки
IUE	12000	6150	1	30	9.34	(Boggess A. et al., 1978)
IUE	13000	6500	1	24	9.31	(Boggess A. et al., 1978)
IUE	258	133	1	35	6.08	(Boggess A. et al., 1978)
IUE	315	162	1	28	6.15	(Boggess A. et al., 1978)

**таблица 4** – Спектрографы и спектрополяриметр, оснащённые линейками диодов

эксперимент	R	N	M	S	Log Z	ссылки
WUPPE	383	1024	1	29	7.05	(Nordsieck K.H. et al., 1994)
GHRS	97720	500	1	975	10.7	(Brandt J.C. et al., 1994)
GHRS	24683	500	1	1115	10.1	(Brandt J.C. et al., 1994)

дующий шаг в технике регистрации спектров связан с применением линеек диодов (диджиконов), динамический диапазон которых (107 в случае GHRS) намного превосходит возможности телевизионных трубок. На GHRS, в режиме скрещенной дисперсии, двумерное изображение спектра, построенное на фотокатоде, последовательно считывалось линейкой диодов, и, таким образом, за единичный интервал накопления (50 или 200 мс), регистрировалось полтора десятка спектральных порядков. Космические частицы, вызывающие черенковское излучение на окне диджикона, обеспечивали фон до 0.01 отчёта на диод в секунду, что более чем на порядок превышало данные наземных испытаний. При прохождении HST через южноатлантическую аномалию фоновые отчёты увеличивались до 1 отчёта на диод в секунду, кроме того, возрастали шумы датчиков системы точного гидирования, и наблюдения прекращались. Сравнение таблиц 3 и 4 показывает, что, относительно спектрографов высокого разрешения IUE, потенциальное качество GHRS выше за счёт многократного увеличения R и S.

При замене спектрографа GHRS на спектрограф STIS период применения линеек диодов сменился периодом применения матриц приборов с зарядовой связью (для видимого диапазона спектра), и проблема борьбы со следами космических частиц обострилась. Применение матриц ПЗС в УФ-диапазоне ограничивается быстрым падением чувствительности (даже при использовании флуоресцирующих покрытий), необходимостью глубокого охлаждения приёмника и высоким уровнем помех при УФ-спектроскопии холодных объектов, за счёт света, рассеиваемого в видимом и близком ИК-диапазонах. Более 40 лет совершенствуется техника регистра-

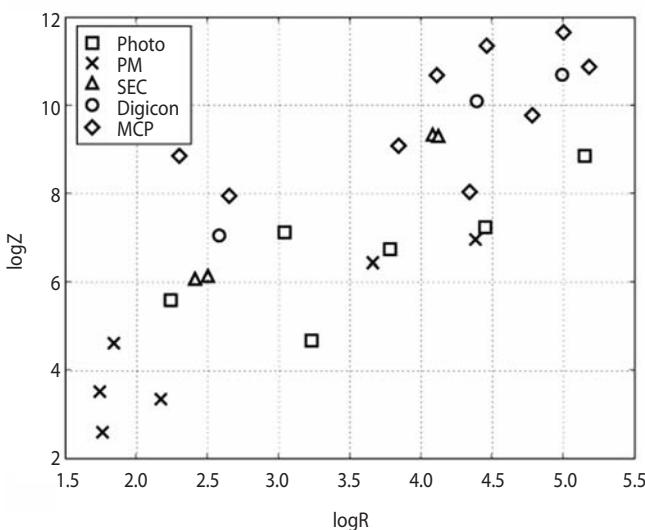
ции излучения с усилением на микроканальных пластинах (МКП). В сочетании с кодирующими анодами приборы на основе МКП не имеют таких габаритных и масштабных ограничений, которые свойственны системам с магнитной или электромагнитной фокусировкой. По сравнению с полупроводниковыми линейками и матрицами ПЗС, приборы на основе МКП выигрывают по уровню темновых шумов и скорости считывания, но заметно проигрывают по динамическому диапазону. Сопротивление микроканалов чувствительно к температуре, поэтому необходима стабилизация температуры (например с точностью до 0.5°C в рабочем объёме FUSE). Современная бортовая вычислительная техника позволяет обрабатывать каждое фотонное событие, что облегчает задачу телеметрии. Приборы на основе МКП уже более 20 лет являются основным средством спектроскопии (таблица 5) и вполне перспективны (например технологию регистрации излучения, отработанную в миссии FUSE, используют в приборе COS (*Green J.C. et al., 2012*)).

Из таблиц 1–5 видно, как по мере развития методов регистрации излучения, потенциальное качество систем, реализующих преимущества новых приёмников, возрастало. Вторым важным параметром, определяющим потенциальное качество, является спектральное разрешение. На рисунке видно, что системы высокого и низкого спектрального разрешения, оснащённые приёмником одного и того же типа, по величине Z различаются на полтора–два порядка. Можно показать, что в задаче повышения точности измерения параметров спектральных линий выгоднее увеличить спектральное разрешение, чем увеличивать время накопления сигнала при прежнем спектральном разрешении.

**таблица 5** – Спектрографы с микроканальными пластинами

эксперимент	R	N	M	S	Log Z	ссылки
Ракета	60000	3584	1	28	9.78	( <i>Snow T.P. et al., 1988</i> )
IMAPS	151234	5878	1	85	10.88	( <i>Jenkins E.B. et al., 1989</i> )
HUT	445	512	1	387	7.95	( <i>Davidsen A.F. et al., 1992</i> )
TUES	13000	19089	1	196	10.69	( <i>Barnstedt J. et al., 1999</i> )
BEFS	7000	2000	1	88	9.09	( <i>Bowyer S., Hurwitz M., 1990</i> )
STIS	100000	5843	1	780	11.66	( <i>Woodgate B.E. et al., 1998</i> )
STIS	29000	10200	1	780	11.36	( <i>Woodgate B.E. et al., 1998</i> )
FUSE	22000	2000	1	25	8.04	( <i>Moos H.W. et al., 2000</i> )
GALEX	200	100	900	40	8.86	( <i>Martin D.C. et al., 2005</i> )

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ В УЛЬТРАФИОЛЕТОВОМ ДИАПАЗОНЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СПЕКТРА



**рисунок.** Корреляция потенциального качества спектральной аппаратуры Z с величиной спектрального разрешения R (см. таблицы 1–5)

Низкое спектральное разрешение наиболее эффективно в обзорных, многообъектных методах наблюдения, потенциальное качество при этом возрастает за счёт M (например GALEX). Для случаев низкого спектрального разрешения проведем некоторую аналогию с наземными наблюдениями. Ещё в фотографическую эпоху выяснилось, что предельная звёздная величина не зависит от диаметра телескопа и чувствительности эмульсии. Предельная звёздная величина ограничивается фоном неба и конечной информационной ёмкостью приёмника (например числом зёрен, приходящихся на единицу площади фотоэмульсии (Теребиж В.Ю., 1988)). Как при наземных, так и при орбитальных наблюдениях, время экспозиции ограничено широтой места наблюдения и параметрами орбиты соответственно. При внеатмосферных наблюдениях в УФ-диапазоне роль фона неба играет свечение геокороны и свет, рассеянный на деталях телескопа. Информационная ёмкость приёмника (построенного на основе МКП), ограничена (сверху) возможностями быстрого считывания сигнала с анода.

## 2. Современные тенденции развития УФ-спектроскопии

Дальнейший прогресс в УФ-спектроскопии связан, в основном, с усовершенствованием оптических схем и методов обработки сигнала. Рассмотрим реализованные в первой декаде XXI века проекты FUSE (Moos H.W. et al., 2000) и GALEX (Martin D.C. et al., 2005). Схема FUSE является развитием идеи снижения потерь на оптических поверхностях – переходом от сегментирования апертуры одного телескопа (BEFS, EUVE), к созданию нескольких телескопов,

параллельно работающих по одному объекту. Два сегмента зеркала покрыты карбидом кремния, что обеспечивает хороший коэффициент отражения в коротковолновом ультрафиолете. Два других сегмента, покрытые алюминием и флюоридом лития, оптимальны для работы в длинноволновом УФ-диапазоне. Каждый из сегментов строит изображение в отдельной диафрагме, положение объекта контролируется датчиком малых ошибок (FES) в видимом диапазоне, ежесекундные команды обеспечивают положение осей аппарата с точностью 0.5 угл. с. Минимальное число оптических элементов (по два в каждом канале), приводят к значительному астигматизму, который исправляется при обработке координат списка фотонных событий.

В эксперименте GALEX спектральное разрешение (более чем на два порядка ниже, чем в FUSE) обеспечивается в режиме бесщелевых наблюдений. Оптическая схема GALEX – Ричи – Кретьен, астигматизм исправлен асферическим кварцевым окном в сходящемся пучке. Многослойное диэлектрическое покрытие этого окна служит разделителем диапазонов (FUV в отражении и NUV – в пропускании). Отражающая поверхность окна корректирует качество изображения в канале дальнего УФ (FUV), тогда как вторая поверхность корректирует изображения в канале ближнего УФ (NUV). Небольшая клиновидность окна компенсирует кривизну поля искажений в сходящемся пучке канала NUV. Кривизна поля исправлена формой поверхности окон приемников. В GALEX впервые применены дихроичный делитель УФ-диапазонов и первая гризма для FUV ( $R=200$ ) и NUV ( $R=90$ ) диапазонов. Для улучшения фотометрических характеристик наблюдения выполняются в режиме «прецессии» аппарата, ось которого описывает спираль диаметром около 10 угловых минут. Затем, по данным системы ориентации, пересчитываются координаты всех событий. Это позволяет сглаживать мелкомасштабные вариации чувствительности и сложной структуры приёмника, а также снижает эффект «усталости» приёмника от ярких объектов.

Итак, в современных проектах прослеживаются следующие тенденции: минимизация числа оптических поверхностей, сочетание нескольких функций (разделитель диапазонов, корректор aberrаций, диспергирующий элемент) в одном оптическом элементе, сегментирование апертуры, обработка координат каждого фотонного события. Число механических перемещений деталей оптической схемы минимизируется. В борьбе за предельные параметры важным моментом является отказ от универсальности прибора.

### 3. Спектографы проекта «СПЕКТР-УФ»

В качестве примера тенденций развития спектральной аппаратуры рассмотрим некоторые предложения по комплексу спектральной аппаратуры проекта «ВСЕМИРНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ – УЛЬТРАФИОЛЕТ» («СПЕКТР-УФ», «ВКО-УФ») (*Boyarchuk A.A. et al., 2013; Shustov B. et al., 2014*). Детальное описание научной аппаратуры миссии описано в работах (*Sachkov M. et al., 2014. I; Sachkov M. et al., 2014. II*). Запуск этого спутника «ВКО-УФ» предоставляет нам совершенно уникальные возможности для изучения многих вопросов происхождения и эволюции Вселенной (*Сачков М.Е. и др., 2014; Шустов Б.М. и др., 2014*). Возможности спектральных исследований обсерватории «ВКО-УФ» рассмотрены в работах (*Sachkov M., 2010; Sachkov M.E., 2014*). Базовая российская программа проекта «ВКО-УФ» описана в статье (*Malkov O. et al., 2011*). При обсуждении первоначальной схемы спектрографа высокого разрешения (*Reutlinger A. et al., 2011*) были предложены конструктивные дополнения, позволяющие существенно увеличить спектральное разрешение (*Панчук В.Е., Юшкин М.В., 2006*). Исходная концепция спектрографа высокого разрешения проекта «ВКО-УФ» основана на методе подстраиваемого изображения спектра. В процессе экспозиции регистрируется совокупность спектров научного объекта и спектров сравнения. Экспресс-анализ спектра сравнения позволяет определить величину сдвига спектра сравнения и возвратить изображение спектров (как сравнения, так и научного) в начальное положение, путём наклона сферического зеркала камеры спектрографа. При этом предполагается, что величина нестабильностей спектра, определяемых нестабильностью оптико-механической конструкции спектрографа, намного превосходит сдвиги спектра, вызываемые смещением центра изображения звезды (диаметром 0.03 мм) относительно центра входной диафрагмы (щели) спектрографа (диаметром 0.08 мм). Когда изображение звезды не выходит за пределы щели, спектрограф, по сути, является бесщелевым, и положение монохроматических изображений звезды в фокальной плоскости спектрографа определяется точностью системы сопровождения и возможными нестабильностями оптико-механической схемы. Следовательно, периодическая регистрация опорного спектра сравнения (ограниченного шириной щели) не обеспечит учёт небольших смещений (определенной точностью работы системы сопровождения) центра изображения звезды в пределах щели. Нами было предложено дополнить спектрограф схемой контроля положения звезды на входе спектрографа. Видимое излучение звезды намного сильнее ультрафиолетового, поэтому, во избежание высокого уров-

ня рассеянного света, видимое излучение отрезается на специальном покрытии первой грани призмы скрещенной дисперсии и направляется в сторону от основного хода лучей, где часть коллимированного пучка перехватывается небольшим вогнутым зеркалом объектива канала фотометрического контроля. Построенное таким образом изображение звезды регистрируется матрицей ПЗС небольшого формата. Последовательность изображений звезды обрабатывается для получения информации о положениях центра изображения звезды относительно центра щели. Последовательность спектров, зарегистрированных основным приёмником, теперь может быть обработана с учётом известных смещений монохроматических изображений звезды в изображении спектра. Кроме того, сравнивая данные датчиков положения, работающих по оффсетным звёздам, с данными канала фотометрического контроля, получаем принципиальную возможность учёта нестабильности схемы фотометрического канала. При дальнейшей разработке спектрографа было решено отказаться от подсмотра щели (*Panchuk V. et al., 2014*).

Второй пример относится к схеме спектрографа с длинной щелью. Нами было предложено увеличить потенциальное качество спектрографа путём сегментирования апертуры и применения разделителя диапазонов (*Panchuk V. et al., 2014*). Напомним преимущества схем сегментирования апертуры. Во-первых, каждый из сегментов работает в пучке, имеющем более низкое относительное отверстие, чем питающая оптика; это снижает aberrации решётки. Во-вторых, имеется возможность использования различных фотокатодов без применения дополнительных оптических элементов. В-третьих, существует возможность построения схем без перемещаемых оптических элементов. В-четвертых, часть апертуры может быть использована для спектроскопии, а часть – для фотометрии и (или) для системы точного сопровождения объекта. Единственным недостатком схемы сегментирования апертуры является принципиальная невозможность использования всей поверхности телескопа в каждом из спектральных диапазонов. Однако, как мы упоминали выше, показателем эффективности спектроскопического инструмента является не эффективная площадь  $S$ , а потенциальное качество  $Z$ . В предложенной трехканальной схеме спектрографа с длинной щелью, все каналы работают одновременно, общее потенциальное качество более чем в полтора раза превосходит потенциальное качество одноэлементной схемы. Если оценивать потенциальное качество для случая наблюдения точечных объектов, относительный выигрыш схемы сегментированной апертурой только возрастет. Помимо выигрыша в потенциальном качестве, в трехканальной схеме отсутствуют перемещаемые элементы, что значительно повышает надёжность спектрографа.

**список литературы**

Панчук В.Е., Юшкин М.В. // Оптический журнал. 2006. Т. 73. С. 60.

Сачков М.Е. и др. Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 34-39.

Теребиж В.Ю. // Труды ГАИШ. 1988. Т. 60. С. 315.

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

Barnstedt J., Kappelmann N., Appenzeller I., Fromm A., Golz M. et al. // Astronomy & Astrophysics. 1999. V.134. P. 561.

Bates B., McCartney D.J., McKeith C.D., McQuoid A.J., Sproule O.E. // Appl. Opt. 1978. V.17. P. 2119.

Boggess A., Carr F.A., Evans D.C. et al. // Nature. 1978. V. 275. P. 372.

Boksenberg A., Evans R.G., Fowler R.G., Gardner I.S.K. et al // MNRAS. 1973. V. 183. P. 291.

Boksenberg A., Kirkham B., Michelson E., Pettini M. et al // Phil. Trans. R. Soc. Lond. A. 1975. V. 279. P. 303.

Bowyer S., Hurwitz M. // Observatories in Earth Orbit and Beyond. 1990. ed. Y. Kondo, Kluwer Acad. Publ. P. 475.

Boyarchuk A., Savanov I., Kanev E., Shustov B., Sachkov M. The Soviet ASTRON mission: legacy // Astrophysics and Space Science. 2014. V. 354. P. 247-250.

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

Brandt J.C., Heap S.R., Beaver E.A. et al. // PASP. 1994. V. 106. P. 890.

Carruthers G.R. // The Astrophysical Journal. 1968. V. 151. P. 269.

Code A.D. // PASP. 1969. V. 81. P. 475.

Code A.D., Houck T.E., McNall J.F., Bless R.C., Lillie C.F. // The Astrophysical Journal. 1970. V. 161. P. 377.

Davidsen A.F., Long K.S., Durrance S.T. et al. // The Astrophysical Journal. 1992. V. 392. P. 264.

Green J.C., Froning C.S., Osterman S., Ebbets D. et al The Cosmic Origins Spectrograph. // The Astrophysical Journal. 2012. V. 744.article id. 60. P. 1-15.

Gurzadyan G.A. // Sky and Telescope. 1974. V. 48. P. 213.

Jenkins E.B., Lees J.F., van Dishoeck E.F., Wilcots E.M. // The Astrophysical Journal. 1989. V. 343. P. 785.

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. 2011.V. 335. P. 323-327.

Martin D.C., Fanson J., Schiminovich D., Morrissey P. et al. // The Astrophysical Journal. 2005. V. 619. P.1-4.

Meaburn J. Detection and Spectrometry of Faint Light. D. Reidel. 1969.

Moos H.W., Cash W.C., Cowie L.L., Davidsen A.F. et al. // The Astrophysical Journal. 2000. V. 538. P. 1-4.

Morton D.C., Spitzer L.Jr. // The Astrophysical Journal. 1966. V. 144. P. 1-8.

Nordsieck K.H., Code A.D., Anderson C.M. et al. // Proc. SPIE. 1994. V. 2010. P. 2-10.

Panchuk V., Yushkin M., Fatkhullin T., Sachkov M. Optical layouts of the WSO-UV Spectrographs // Astrophysics and Space Science. 2014. V. 354. P. 163-168.

Panchuk V.E., Najdenov I.D., Klochkova V.G., Ivanchik A.V. et al. // Bull. Special Astrophys. Obs. 1997. V. 44. P. 127.

Reutlinger A., Sachkov M., Gál C. et al. Using the CeSiC material for the WSO-UV spectrographs // Astrophysics and Space Science. 2011. V. 335. P. 311-316.

Rogerson J.B., Spitzer L., Drake J.F., Dressler K. et al. // The Astrophysical Journal. 1973. V. 181. P. 97.

Sachkov M. UV observations of sdB stars and prospects of WSO-UV mission for such studies // Astrophysics and Space Science. 2010. V. 329. P. 261-266.

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

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

Sachkov M.E. Study of pulsations of chemically peculiar A stars // Astrophysical Bulletin. 2014. V. 69. P. 40-45.

Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al. WSO - UV progress and expectations. // Astrophysics and Space Science. 2014. V. 354. P. 155-161.

Smith A.M. Interstellar Molecular Hydrogen Observed in the Ultraviolet Spectrum of Delta Scorpis // The Astrophysical Journal. 1973. V. 179. P. 11-15.

Snow T.P., McClintock W.E., Voels S.A. // The Astrophysical Journal. 1988. V. 325. P. 402.

Stecher Th.P., Milligan J.E. // The Astrophysical Journal. 1962. V. 136. P. 1-10.

Woodgate B.E., Kimble R.A., Bowers C.W. et al. // PASP. 1998. V. 110. P. 1183.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016 г.

## УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫЕ АСТРОНОМИЧЕСКИЕ РЕСУРСЫ В СЕТИ ИНТЕРНЕТ



**М.Е. Сачков<sup>1</sup>,**  
профессор РАН, доктор  
физико-математических  
наук, [msachkov@inasan.ru](mailto:msachkov@inasan.ru);

**M.E. Sachkov**

В статье рассматриваются базы данных космических проектов, работавших или продолжающих работать в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра. Приведены адреса и даны краткие описания наиболее известных источников ультрафиолетовых данных в Интернете: информация о космических миссиях, базы данных, каталоги. Особое внимание уделено планируемому к запуску в 2021 году проекту «СПЕКТР-УФ».

**Ключевые слова:** ультрафиолетовая астрономия; космические проекты; Сеть Интернет.

### введение

Целью данной работы является сбор, упорядочение и классификация метаданных (сведений о данных) об астрономических наблюдениях в ультрафиолете. Здесь и ниже «ультрафиолетом» будем называть диапазон электромагнитного спектра от 10 до 350 нм. Очевидно, основным источником данных в диапазонах спектра, отличных от оптического и радио, являются заатмосферные наблюдения. Соответственно будут рассмотрены преимущественно базы данных, каталоги и архивы наблюдений космических миссий. Обсуждаются основные ресурсы данных, краткосрочные и продолжительные космические миссии, основные данные, полученные с помощью наземных наблюдений. Настоящая работа

## WEB-RESOURCES FOR ASTRONOMICAL DATA IN THE ULTRAVIOLET



**О.Ю. Малков<sup>1</sup>,**  
доктор физико-  
математических наук,  
[malkov@inasan.ru](mailto:malkov@inasan.ru);

**O.Yu. Malkov**

*In this paper we describe databases of space missions that are operating or that operated in the Ultraviolet wavelengths. We list links to major sources for UV data in the web: archives, space mission sites, databases, catalogues. We pay a special attention to the World Space Observatory – Ultraviolet mission that will be launched in 2021.*

**Key words:** ultraviolet astronomy; space projects; Web-resources

не содержит сведений об ультрафиолетовых наблюдениях Солнца, здесь также не уделяется специальное внимание ультрафиолетовым наблюдениям тел Солнечной системы, осуществляемым специализированными миссиями (например ультрафиолетовый спектрометр на борту «VOYAGER-1»). Наконец, за рамками статьи остались представленные в Сети результаты моделирования излучения объектов в ультрафиолете.

Для краткости изложения в тексте используются не очень корректные термины, такие как «ультрафиолетовые данные» – здесь имеются в виду, конечно, «астрономические данные, полученные при наблюдениях в ультрафиолетовом диапазоне спектра».

<sup>1</sup> ФГБУН Институт астрономии РАН, Россия, Москва.

## 1. Многоцелевой архив MAST (<http://archive.stsci.edu/hlsp/index.html>)

Подавляющее большинство ультрафиолетовых космических экспериментов осуществлялось при участии NASA. Естественно поэтому, основные архивы ультрафиолетовых данных расположены в США. Многоцелевой архив при Институте космического телескопа в США финансируется NASA и предоставляет пользователям доступ к совокупности научных данных, полученных в оптическом, ультрафиолетовом и ближнем инфракрасном диапазонах спектра. Пользователю предоставляется возможность получить данные по конкретному объекту, а также осуществить выборку по спектральному диапазону и/или типу данных (изображения или спектры). Кроме того, можно обратиться непосредственно к архиву того или иного космического телескопа. В частности, MAST предоставляет доступ к данным следующих (основных) ультрафиолетовых миссий: Космический телескоп им. Хаббла HST, GALEX, FUSE, Copernicus, EUVE, IUE, инструментов HUT, UIT и WUPPE миссий Astro, инструментов TUES, BEFS и IMAPS миссий ORFEUS.

## 2. Архив по макроэнергической астрофизике HEASARC (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov>)

Исследовательский центр научного архива по астрофизике высоких энергий (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center, HEASARC) является фундаментальным источником данных, полученных на аппаратах NASA, наблюдавших (и наблюдающих) Вселенную в коротковолновой области спектра: от крайнего ультрафиолета до гамма-излучения. Поиск в HEASARC может осуществляться по ряду критериев: название объекта и обсерватории, координаты объекта, время наблюдений, статус данных и пр. В HEASARC, в частности, могут быть найдены результаты работы следующих обсерваторий, упоминаемых в данной работе: ANS, Copernicus, EUVE, Swift, EXOSAT, Rosat, Skylab.

## 3. База данных каталогов VizieR (<http://webviz.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR> <http://vizier.inasan.ru/vizier/>)

Каталогизированные данные по ультрафиолетовой астрономии могут быть найдены также в Страсбургской базе данных VizieR, содержащей около 7000 каталогов, 200 из которых включают ультрафиолетовые данные. Поиск в VizieR можно осуществлять, явно задав ключевое слово «UV» и/или указав название космической обсерватории (VizieR предоставляет возможность выбирать из следующего списка: ANS, Copernicus, EUVE, EXOSAT, FAUST, FUSE, HST, IUE, MSX, ORFEUS, ROSAT, TD-1, Astro). В частно-

сти, именно VizieR является наиболее удобным инструментом для поиска журналов наблюдений перечисленных обсерваторий и инструментов.

## 4. Библиографическая система ADS (<http://adsabs.harvard.edu> <http://ads.inasan.ru/>)

Как и для множества других приложений, система данных по астрофизике ADS служит эффективным инструментом поиска публикаций по ультрафиолетовой астрономии. ADS поддерживается Смитсонианской астрофизической обсерваторией на средства NASA. База данных по астрономии и астрофизике является одной из трёх цифровых библиотек, содержащих в общей сложности около семи миллионов записей. Поиск в ADS осуществляется по имени автора, времени публикации, идентификатору объекта, а также по ключевым словам, в качестве которых можно указать, в частности, название космической обсерватории.

## 5. Краткосрочные наблюдения

В этом разделе будут кратко описаны сравнительно краткосрочные ультрафиолетовые наблюдения: от нескольких минут (при запуске ракет и аэростатов) до нескольких дней (на автоматических и пилотируемых космических миссиях).

Можно считать, что заатмосферные ультрафиолетовые исследования начались 10 октября 1946 года, когда с борта ракеты V2 был впервые получен ультрафиолетовый спектр Солнца. Только через декаду, в 1955 году, были впервые проведены ультрафиолетовые наблюдения ночного неба. Ультрафиолетовая звёздная фотометрия и спектроскопия были впервые осуществлены в 1957 и 1968 годах, соответственно. Последующие непродолжительные наблюдения приводятся в таблице 1 и комментариях к ней. В колонке «режим наблюдений» указаны коды s – спектроскопия, i – построение изображений, p – поляриметрия. В комментариях в некоторых случаях даются ссылки на дополнительные (помимо MAST и/или HEASARC) или уникальные источники данных. Отсутствие сведений о принадлежности обсерватории означает, что работы проводило NASA.

**ОРИОН** – две советские космические обсерватории, находящиеся на борту «Салюта-1» (1971) и «Союза-13» (1973). В процессе наблюдений получены спектрограммы тысяч объектов, результаты опубликованы в работах Гурзадяна с соавторами (1972–1985).

**SKYLAB** – научная и инженерная лаборатория на орбите. Ультрафиолетовые и рентгеновские наблюдения осуществлялись последовательно тремя экипажами по три человека. Спектрофотометрические данные по 492 звездам опубликованы в каталоге III/86 (здесь и далее нумерация каталогов дана в системе обозначений VizieR).

**таблица 1** – Краткосрочные УФ-миссии

эксперимент	год запуска	апертура инструмента, см	режим наблюдений	диапазон длин волн, нм
ORION-1	1971	28	s	200–380
ORION-2	1973	30	s	200–300
SKYLAB	1973	15	s	130–420
ASTP/EUVT	1975		i	5–77
FOCA	1988	40	i	185–215
ASTRO-1	1990		isp	41.5–350
ASTRO-2	1995		isp	41.5–350
FAUST	1992		i	140–180
ORFEUS-1	1993	100	s	40–140
ORFEUS-2	1996	100	s	40–140
UVSTAR-1	1995	30	s	50–120
UVSTAR-2	1997	30	s	50–120
UVSTAR-3	1998	30	s	50–120
NUVIEWS-1	1996		i	147–172
NUVIEWS-2	2002		i	147–172
CHESS	2014		s	100–160

**ASTP/EUVT** (Apollo – Soyuz Test Project – Extreme Ultraviolet Telescope) – эксперимент, поставленный на борту девятидневного совместного полёта кораблей Союз и Аполлон. При наблюдениях использовались четыре вложенных параболических зеркала. Данные опубликованы в 1979 ApJ...230..755S (в нотации ADS).

**FOCA** – небольшой французский телескоп, неоднократно (1988, 1989, 1991) поднимаемый на аэростате и предназначенный для спектрофотометрии и построения изображений галактик. Результаты наблюдений, включающие подсчеты галактик и распределение цветов, могут быть найдены по адресу: <http://www.astrsp-mrs.fr/~xbig/foca/node2.html>

**Astro** – орбитальная обсерватория, смонтированная на шаттлах «Columbia» (1990) и «Endeavour» (1995). Обсерватория была укомплектована тремя ультрафиолетовыми инструментами:

- Hopkins Ultraviolet Telescope (HUT);
- Ultraviolet Imaging Telescope (UIT);
- Wisconsin Ultraviolet Photo-Polarimeter Experiment (WUPPE).

Диаметры инструментов 90, 38 и 50 см, соответственно. На обсерватории была получена фотометрия, спектроскопия и (что является редкостью для ультрафиолетовых наблюдений) поляриметрия десятков тысяч источников, преимущественно в шаровых скоплениях и близких галактиках. Основным источником опубликованных данных служит архив MAST.

**FAUST** (Far Ultraviolet Space Telescope) – широкоугольный телескоп, установленный на борту шаттла «Atlantis». Каталог 4968 галактических и внегалактических точечных источников, обнаруженных в 22 областях, опубликован в J/ApJS/96/461.

**ORFEUS** (Orbiting Retrievable Far and Extreme Ultraviolet Spectrometers) – совместная американо-германская орбитальная обсерватория, смонтированная на шаттлах «Discovery» (1993) и «Columbia»

(1996). Обсерватория была укомплектована тремя ультрафиолетовыми инструментами:

- Tubingen Ultraviolet Echelle Spectrometer (TUES);
- Berkeley Extreme and Far-UV Spectrometer (BEFS);
- Interstellar Medium Absorption Profile Spectrograph (IMAPS).

**UVSTAR** (Ultra Violet Spectrograph Telescope for Astronomical Research) – совместный американо-итальянский проект, существенный во время полётов трёх шаттлов. Были проведены наблюдения 60 звёзд и некоторых тел Солнечной системы.

**NUVIEWS** (Narrowband Ultraviolet Imaging Experiment for Wide Field Surveys) – ракетный эксперимент, состоящий из четырёх широкоугольных телескопов и призванный осуществить картирование всего неба в четырёх узких УФ-полосах за четыре полёта, первые два из которых состоялись в 1996 и 2002 годах (см. <http://www.srl.caltech.edu/sal/nuviews.htm>). Это единственный из перечисленных в таблице 1 эксперимент, который работал в режиме сканирования, остальные – в режиме наведения.

**CHESS** (Colorado High-resolution Echelle Stellar Spectrograph) – ракетный эксперимент со спектрографом высокого разрешения (спектральное разрешение 120000) на борту для получения спектра звезды αVir для определения уровня ионизации углерода и возраста газо-пылевого облака, окружающего эту звезду.

## 6. Космические обсерватории

В данном разделе приведены сведения о продолжительных наблюдениях с борта космических обсерваторий: от двух (TD-1A) до, на сегодняшний день – более двадцати шести (HST) лет. Продолжительные астрономические наблюдения в ультрафиолете проводятся с 1969 года. Таблица 2 и комментарии к ней содержат основные сведения об ультрафиолетовых космических обсерваториях.

В колонке «режим» указаны коды s – сканирование, p – наведение. Знак «плюс» в колонке «спектральный диапазон» означает, что обсерватория наблюдала и в других лучах, помимо ультрафиолета. Содержание остальных колонок аналогично таблице 1.

**OAO-2** (Orbiting astronomical observatory-2). <http://www.sal.wisc.edu/OAO/>. OAO-2 – первая обсерватория в космосе. Результирующий каталог II/83 содержит УФ-фотометрию 531 звезды в 12 полосах.

**TD-1A** (Thor-Delta-1A). Задачей этого спутника ESA было провести систематический обзор неба в ультрафиолетовой и более высокочастотных областях спектра. Основные ультрафиолетовые данные представлены в каталогах II/59B (потоки), III/39A (спектрофотометрия), II/91 (собственные цвета) II/175 (кривые поглощения).

таблица 2 – Космические УФ-обсерватории

обсерватория	год и месяц запуска и завершения	апертура инструмента, см	режим наведения	режим наблюдения	рабочий диапазон, нм
OAO-2	1968.12–1973.01	20	sp	is	100–425
TD-1A	1972.03–1974.05	28	s	is	135–280+
OAO-3	1972.08–1981.02	80	p	s	90–315
ANS	1974.08–1977.06	22	p	s	150–330+
IUE	1978.01–1996.09	45	p	s	115–320
ASTRON	1983.03–1989.06	80	p	s	110–350+
EXOSAT X	1983.05–1986	2×30	p	is	25+
ROSAT X	1990.06–1999.02	84	sp	i	6–20+
HST	1990.04 – н.в.	240	p	isp	115–1000
EUVE	1992.06–2001.01	12	sp	is	7–76
ALEXIS X	1993.04–2005.04	35	s	i	13–18.6
MSX	1996.04–2003	50	s	i	110–900+
FUSE	1999.06–2007.07	39×35 (4)	p	s	90.5–119.5
XMM X	1999.12	30	p	is	170–550
GALEX	2003.04–2013.06	50	sp	is	135–280
SWIFT g, X	2004.11	30	p	i	170–650

**OAO-3** (Orbiting astronomical observatory-3).

Copernicus – другое название этого совместного NASA+SERC проекта, в ходе которого были получены ультрафиолетовые спектры 551 звезды. Данные для О и В звёзд представлены в каталоге III/77.

**ANS** (Astronomische Nederlandse Satelliet). Данные этого совместного голландско-американского эксперимента опубликованы в каталогах II/97 (каталог 3573 точечных источников) и III/114 (межзвёздное поглощение).

**IUE** (International Ultraviolet Explorer). Космическая обсерватория IUE (NASA+ESA+SERC) была первой, где наблюдения осуществлялись в реальном времени астрономами, прибывающими в Центр управления полётом. Кроме того, IUE – один из немногих спутников, выведенных на высокую геосинхронную орбиту (см. дискуссию об орбитах космических обсерваторий в конце этого раздела). В результате миссии было получено 100 тысяч спектров для 10 тысяч объектов. Основным источником этих данных является база данных INES (IAU Newly Extracted Spectra, <http://sdc.laeff.inta.es/ines/>). INES позволяет осуществлять выборку по идентификатору, координатами классу объекта, времени наблюдения и инструменту обсерватории. Всего же по данным IUE опубликовано более 100 атласов и каталогов.

**АСТРОН** – советско-французская космическая обсерватория. О результатах работы см. (*Boyarchuk A. et al.*, 2014), а также на сайте Института астрономии РАН [www.inasan.ru](http://www.inasan.ru).

**EXOSAT** (European Space Agency's X-ray Observatory). EXOSAT был выведен на высокоэксцентртичную ( $e=0.93$ ) орбиту с периодом около 90 часов, из которых 76 предназначались для наблюдений.

**ROSAT** (Roentgen Satellite). Совместный германо-американо-британский спутник первые полгода работал в режиме сканирования (при этом были получены первые всенебесные обзоры в рентгене и крайнем уль-

трафиолете), который сменился затем режимом наведения. Каталог ярких источников Rosat, его улучшенная версия и список оптических идентификаторов были опубликованы в J/MNRAS/260/77, J/MNRAS/274/1165 и J/MNRAS/274/1194, соответственно.

**HST** (Hubble Space Telescope). HST является первой и флагманской миссией программы Большие Обсерватории NASA (наряду с обсерваториями Spitzer, Chandra, Compton, JWST). Десять различных инструментов работали или работают на HST, восемь из которых поставляют ультрафиолетовые данные. В общей сложности на HST наблюдалось около 30 тысяч источников, и основным сетевым ресурсом для получения этих данных является архив MAST. Примерами фотометрических данных по галактикам, скоплениям в галактиках, звездам в галактиках и скоплениям в Галактике могут служить каталоги J/ApJS/128/99, J/ApJS/122/431, J/ApJ/504/113 и J/A+A/287/769, соответственно.

**EUVE** (Extreme Ultra Violet Explorer). <http://www.ssl.berkeley.edu/euve/>. EUVE – первая обсерватория, специально предназначенная для наблюдений в крайнем ультрафиолете. Как и Rosat, первые полгода EUVE работал в режиме сканирования, создавая всенебесный атлас изображений. Последующие восемь лет спутник работал в режиме наведения, осуществляя преимущественно спектроскопические наблюдения. В результате работы были получены и опубликованы данные по фотометрии спектроскопии сотен объектов (см. J/AJ/107/751, IX/35, J/PASP/109/998).

**ALEXIS** (Array of Low Energy X-ray Imaging Sensors). <http://alexis-www.lanl.gov>. ALEXIS – небольшой американский спутник, запущенный на ракете Pegasus с самолета B-52. Он был предназначен для исследования космического ультрафиолетового фона и переменности ультрафиолетовых источников, однако программу свою выполнил не полностью.

**MSX** (Midcourse Space Experiment). [http://sd-www.jhuapl.edu/MSX/MSX\\$\\\_Overview.html](http://sd-www.jhuapl.edu/MSX/MSX$\_Overview.html). MSX – спут-

ник МО США, запущенный на солнечно-синхронную орбиту и предназначенный для обнаружения ярких инфракрасных источников (например, баллистических ракет на маршевом участке траектории). Кроме того, MSX был снабжён батареей небольших ультрафиолетовых телескопов, объединенных в т.н. эксперимент Ultraviolet and Visible Imaging and Spectrographic Imaging (UVISI). Каталог точечных источников (II/269), полученный в ходе эксперимента UVISI, содержит около 50 тысяч записей.

**FUSE** (Far Ultraviolet Spectroscopic Explorer). <http://fuse.pha.jhu.edu>. FUSE – высокодисперсная спектротипическая миссия, содержала четыре телескопа. Было получено около 6 тысяч спектров более, чем 3 тысяч объектов со спектральным разрешением около 20000.

**CHIPS** (Cosmic Hot Interstellar Plasma Spectrometer). <http://chips.ssl.berkeley.edu/>. Спектрометр CHIPS сканирует всё небо сегментами  $5 \times 27$  угловых градусов. Основная научная цель – изучение горячих и диффузных туманностей. Через полгода после начала работы CHIPS перешел в режим наведения.

**GALEX** (Galaxy evolution explorer). <http://galex.stsci.edu/GR2/default.aspx?page=start>. GALEX – обзорный ультрафиолетовый телескоп, осуществлявший наблюдения в двух полосах и ставивший целью получить около десятка фотометрических и спектротипических обзоров различной степени глубины. В частности, получена фотометрия десятков миллионов объектов. При наблюдениях избегались области с яркими (ярче 9-звездной величины) звездами. Последний релиз данных размещен по адресу <http://galex.stsci.edu/GR7/>.

**FIMS** (Far ultraviolet Imaging Spectrograph). <http://space21.kasi.re.kr/fims/>. Запущенный на солнечно-синхронную орбиту корейский спутник FIMS (другое название – Kaistsat-4) призван отсканировать всё небо.

**SWIFT** (Swift Gamma-Ray Burst Mission). Итально-американо-британский спутник Swift специализируется на обнаружении и наблюдении гамма-вспышек. Он снабжен также УФ-оптическим телескопом, который способен быстро наводиться на обнаруженные другим инструментом (гамма-телескопом) спутника для определения красного смещения и кривых блеска вспышек.

## 7. Орбиты космических обсерваторий

Большинство космических обсерваторий выводятся на относительно низкие (с высотой 5–6 сотен километров) круговые или почти круговые орбиты. Это достаточно высоко, чтобы обеспечить существование спутника в течение 10 лет, но и достаточно низко, чтобы исключить влияние радиационных поясов земной магнитосферы (средняя высота которых

4 и 17 тысяч километров) на его чувствительные приборы. Кроме того, эта конфигурация позволяет осуществлять сервисные миссии (HST), а также уводить спутник с орбиты для последующего разрушения по окончании работы (EUVE). Однако при этом существенная часть наблюдений блокируется Землей (например, только половина орбиты HST используется для наблюдений).

Частным случаем низкой орбиты является солнечно-синхронная орбита (MSX), находясь на которой спутник проходит над каждой точкой земной поверхности в одно и то же местное время. Это удобно, прежде всего, для наблюдений земной поверхности (метеорология, спутники-шпионы, съёмка местности).

Другим удачным местом для размещения космической обсерватории является геосинхронная орбита (IUE) с высотой около 36 тысяч километров, подобранный так, что период обращения спутника становится равным периоду вращения Земли. Ее частным случаем (при нулевых значениях наклонения и эксцентриситета) является геостационарная орбита, в случае которой направление на спутник с любой точки земной поверхности неизменно. Такие орбиты позволяют обходиться, в принципе, одним наземным комплексом. Земля и её радиационные пояса при этом в гораздо меньшей степени являются помехами наблюдениям. Кроме того, улучшается тепловой режим и появляется возможность проводить длительные экспозиции.

Ещё одной возможностью минимизировать количество наземных комплексов и увеличить время экспозиции является вывод спутника на высокоэллиптическую орбиту (EXOSAT, Астрон) с наклонением, подобранным так, чтобы спутник большую часть времени находился в поле зрения одного наземного комплекса, а орбитальные элементы не очень быстро эволюционировали. Такая орбита может быть синхронной с вращением Земли (орбита Тундра) или полусинхронной, с периодом около 12 часов (орбита Молния). Таким образом, преимущества геосинхронной орбиты достигаются меньшими энергетическими затратами, а запускающий космодром может находиться и вдали от земного экватора.

Очевидно, преимущества высоких орбит сыграли заметную роль в том, что и IUE, и Астрон значительно превысили планируемое для них время функционирования.

Наконец, весьма удобным местом для размещения космических обсерваторий является лагранжева точка L2 в системе Солнце – Земля. Здесь, на расстоянии 1.5 млн. километров от Земли в направлении от Солнца, эффективная масса Солнца увеличивается для спутника на 3%, это приводит к тому, что тело на данной гелиоцентрической орбите обращается с

периодом, равным 1 году. Все основные «помехи» для наблюдений – Солнце, Земля и Луна – локализованы для спутника в одной области неба, а сам он находится в довольно устойчивом равновесии (опыт спутника WMAP, размещенного в L2, показывает, что для удержания спутника в точке L2 достаточно одного манёвра в несколько месяцев). Наблюдения за спутником с Земли облегчает его невысокая угловая скорость перемещения. Космическая обсерватория GAIA работает в точке L2. На этой же орбите будет работать миссия JWST.

В аналогичном привилегированном положении находится и точка L1, удобная для размещения солнечных обсерваторий (например, SOHO). Нужно признать, впрочем, что вывод спутника в точку L2 требует существенных энергетических затрат, а проблемы надёжной передачи данных на такие большие расстояния окончательно ешё не решены.

## 8. Фотометрия в наземном ультрафиолете

Самый длинноволновой участок ультрафиолетового диапазона спектра (300–350 нм) можно наблюдать и с Земли. Многие податмосферные фотометрические системы содержат ультрафиолетовую полосу, в частности пять наиболее важных с точки зрения создателей Общего каталога фотометрических данных (<http://obswww.unige.ch/gcpd/gcpd.html>), систем, а именно (в скобках приводится количество источников, фотометрированных в данной системе): UVB (117386), uvby (65267), Geneva (43943), WBVR (13583), Walraven (13688).

## заключение

В работе собраны и упорядочены метаданные об астрономических наблюдениях в ультрафиолетовом диапазоне электромагнитного спектра (10–350 нм). Около 15 космических обсерваторий и примерно столько же менее продолжительных миссий работали и работают в этом диапазоне. В ближайшем будущем основной миссией, которая будет работать в данном диапазоне, будет проект «ВСЕМИРНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ – УЛЬТРАФИОЛЕТ» (Boyarchuk A. et al., 2013; Shustov B. et al., 2014). Детальное описание научной аппаратуры миссии описаны в работах (Sachkov M. et al., 2014 I; Sachkov M. et al., 2014 II). Запуск этого спутника «ВКО-УФ» предоставляет нам совершенно уникальные возможности для изучения многих вопросов происхождения и эволюции Вселенной (Сачков М.Е. и др., 2014; Шустов Б.М. и др., 2014). Возможности спектральных исследований обсерватории «ВКО-УФ» рассмотрены в работах (Sachkov M., 2010; Sachkov M., 2014). Базовая российская программа проекта «ВКО-УФ» описана в статье (Malkov O. et al., 2011).

Основными источниками ультрафиолетовых данных в Сети Интернет являются архивы MAST и HEASARC, база данных каталогов VizieR, а также библиографическая система ADS.

Известно, что из-за красного смещения излучение, испущенное удаляющимся объектом в одном спектральном диапазоне, регистрируется на Земле в другом диапазоне. Современная аппаратура и методы обработки данных позволяют исследователям проводить наблюдения всё более и более удаленных объектов и изучать, таким образом, все более и более ранние стадии развития Вселенной. В частности, инфракрасное излучение, которое будет принимать обсерватория JWST, было испущено в ультрафиолетовом диапазоне первыми звёздами. Таким образом, JWST и аналогичные мощные обсерватории также могут условно считаться ультрафиолетовыми, хотя и работают в более длинноволновом участке спектра.

## список литературы

Сачков М.Е. и др. Комплекс научной аппаратуры обсерватории «СПЕКТР-УФ» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 5. С. 34-39.

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

Boyarchuk A., Savanov I., Kaney E., Shustov B., Sachkov M. The Soviet ASTRON mission: legacy // Astrophysics and Space Science. 2014. 354. P. 247-250.

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

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

Sachkov M. UV observations of sdB stars and prospects of WSO-UV mission for such studies // Astrophys. Space Sci. 2010. 329. P. 261-266.

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

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

Sachkov M.E. Study of pulsations of chemically peculiar A stars // Astrophysical Bulletin. 2014. 69. P. 40-45.

Shustov B., Gómez de Castro A.I., Sachkov M. et al. WSO-UV progress and expectations // Astrophys. Space Sci. 2014. 354. P. 155-161.

Статья поступила в редакцию 30.06.2016 г.

## О НАУЧНОМ ПОТЕНЦИАЛЕ НПО ИМЕНИ СЕМЁНА АЛЕКСЕЕВИЧА ЛАВОЧКИНА

## ABOUT THE SCIENTIFIC POTENTIAL OF SCIENCE AND PRODUCTION ASSOCIATION NAMED AFTER SEMEON A. LAVOCHKIN



**В.В. Ефанов<sup>1</sup>,**  
профессор, доктор  
технических наук,  
*vladimir\_efanov@laspace.ru;*

**V.V. Efanov**



**М.Б. Мартынов<sup>1</sup>,**  
кандидат технических наук,  
*maxim.martynov@laspace.ru;*  
**M.B. Martynov**



**Х.Ж. Карчаев<sup>1</sup>,**  
кандидат экономических наук,  
*kar@laspace.ru;*  
**Kh.Zh. Karchaev**

В статье приведены результаты анализа научного потенциала предприятия по таким научометрическим показателям, как публикационная активность, цитируемость и полученные патенты на изобретения за период с 2010 по 2015 гг. Проведено также сравнение востребованности ряда научных российских и международных журналов по импакт-фактору. Проведён анализ по данным Научной электронной библиотеки (*elibrary.ru*) публикационной активности ряда основных организаций Роскосмоса.

**Ключевые слова:** научный потенциал; научометрия; библиометрия; импакт-фактор; научные публикации; автоматические космические аппараты для фундаментальных научных исследований.

Общеизвестно, что космонавтика, наряду с авиацией, атомной промышленностью и другими отраслями, является одной из самых наукоёмких. Её развитие определяется как фундаментальными знаниями, так и прикладными разработками. Инновационные достижения космонавтики способствуют динамичному социальному-экономическому развитию страны.

<sup>1</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

*The article analyzes the company's scientific potential based on the following scientific metrics: publishing activity, citation ratio and invention patents issued from 2010 to 2015. It also compares the significance of Russian and international scientific journals by impact factor. In addition it analyzes publishing activity of the main Roscosmos companies based on the electronic scientific library data (*elibrary.ru*).*

*Key words:* scientific potential; scientific metrics; bibliometry; impact factor; scientific publications; automated spacecraft for fundamental space research.

В своих выступлениях, в частности на торжественном заседании учёного, научно-технического и диссертационных советов ЦНИИМаш 23 мая 2016 года, посвященном 70-летию института, заместитель Председателя Правительства Российской Федерации Дмитрий Олегович Рогозин отмечал необходимость развития научного потенциала предприятий оборонно-промышленного комплекса, привлечения

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

учёных к опытно-конструкторским работам при создании новой техники.

НПО имени С.А. Лавочкина с 1965 года является головной организацией в ракетно-космической отрасли по созданию автоматических космических аппаратов (КА); позже добавились и другие фундаментальные космические исследования (исследования Луны и планет Солнечной системы, астрофизика, солнечно-земные связи, космические плазмы и лучи и др.).

Руководство нашего предприятия, начиная с Семёна Алексеевича Лавочкина, при создании образцов новых летательных аппаратов всегда уделяло значительное внимание научно-техническому обоснованию проектов. Начало интенсивного научного развития НПО относится к середине 1950-х годов, когда на предприятии приступили к разработкам ракетной техники (зенитные управляемые ракеты и межконтинентальная баллистическая ракета «Буря») (*Филатьев А.С. и др., 2012; Гафаров А.А. и др., 2015*). Дальнейшая положительная динамика предприятия началась с созданием космической техники – как для фундаментальных исследований, так и прикладного назначения. Высокий научно-технический уровень разработок подтверждается избранием в АН СССР и РАН членами-корреспондентами руководителей ОКБ С.А. Лавочкина, Г.Н. Бабакина и В.М. Ковтуненко.

Очередным этапом научного развития предприятия следует назвать создание в 2007 году, почти одновременно, аспирантуры и специального совета по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук и учёной степени доктора наук на базе ФГУП НПО имени С.А. Лавочкина (шифр ДС403.019.01) приказом Рособрнадзора от 25.05.2007 № 103. В аспирантуре и докторской советах были представлены следующие специальности:

05.07.02 – проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки);

05.07.03 – прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки);

05.07.09 – динамика, баллистика, дистанционное управление движением летательных аппаратов (технические науки).

За это время в НПО имени С.А. Лавочкина сотрудниками защищено 20 докторских диссертаций, из них 5 докторских. Такой динамики прироста собственных учёных в истории предприятия не было.

Необходимо отметить, что в последние годы в стране уделяется значительное внимание уровню эффективности работы научных организаций. Так, во исполнение постановления Правительства Российской Федерации от 8 апреля 2009 г. № 312 «Об оценке и о мониторинге результативности деятель-

ности научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы гражданского назначения», а также согласно порядку предоставления научными организациями сведений о результатах их деятельности, утверждённому приказом Минобрнауки России от 5 марта 2014 г. № 162, запущена Федеральная система «Мониторинг результативности деятельности научных организаций, выполняющих научно-исследовательские, опытно-конструкторские и технологические работы». Оценка производится на основании анализа научометрических показателей, достигнутых организацией за отчётный год.

С 1960-х годов в мире, а в последние годы – и в Российской Федерации научометрические показатели (индикаторы) широко используются для отчётности результатов работы научных организаций и отдельных учёных. Они определяют степень востребованности полученных научных результатов другими исследователями. Объективное получение таких данных потребовало создания национальной информационно-аналитической системы.

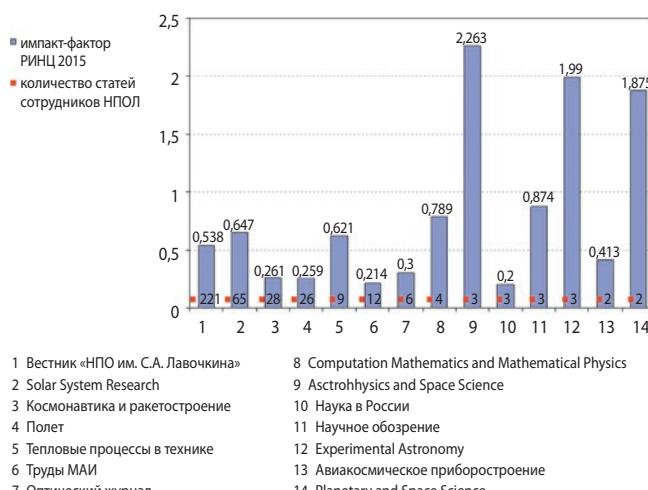
Система российского индекса научного цитирования (РИНЦ) представляет собой общедоступный инструмент измерения и анализа публикационной активности учёных и организаций. Это – национальная информационно-аналитическая система, в которой собрано более 22 миллионов научных статей и публикаций, а также информация о цитировании этих публикаций из более 4800 российских журналов. В РИНЦ зарегистрированы более миллиона индивидуальных пользователей.

Созданная система построена на платформе научной электронной библиотеки elibrary.ru. Она позволяет оперативно обеспечить научно-технические исследования актуальной информацией и осуществлять оценку результативности и эффективности деятельности научно-исследовательских и опытно-конструкторских организаций, учёных, а также уровня публикаций, востребованности научных журналов и т.д.

При определении научного уровня организаций обычно рассматриваются такие показатели, как число публикаций, цитируемость, количество созданных результатов интеллектуальной деятельности, число малых инновационных предприятий, финансово-экономические результаты, кадровое обеспечение и др. В данной статье анализируются показатели, информация по которым общедоступна.

Для проведения научометрического исследования были собраны и систематизированы обширные сведения из библиографических российской и международной баз данных, в которых индексируются статьи, публикуемые в научных журналах. Исходными данными для оценки эффективности

проведённых научно-технических работ рассматривались результаты реализации Федеральной космической программы-2015 по созданию уникальных автоматических аппаратов для научных исследований («СПЕКТР-РАДИОАСТРОН», «ЭЛЕКТРО-Л», «РЭЛЕК-ВЕРНОВ») и готовящихся к запуску в 2017 году «СПЕКТР-РГ» (первый в России полёт в точку Лагранжа L2), «АРКТИКА-М» и др. с учётом анализа предыдущих отечественных и зарубежных проектов. Инновационные проектно-конструкторские и теоретико-экспериментальные решения находят своё отражение в научных публикациях, патентах на изобретения и в других формах интеллектуальной собственности. Указанное обеспечивает как учёных, инженеров нашего НПО, так и специалистов других научных, научно-производственных ракетно-космических организаций и иных смежных отраслей новыми знаниями, проектно-конструкторскими решениями, методами расчёта, методиками наземных и лётных испытаний и др. Такие публикации позволяют сохранить созданные на предприятии ноу-хау и передавать их следующим поколениям специалистов. На рисунке 1 представлен перечень основных журналов, в которых публикуются наши статьи, их импакт-фактор и количество статей.



Приведены значения импакт-факторов за два года с учётом цитирования из всех источников (число цитирований в текущем году, опубликованных в журнале за предыдущие два года, делённое на число этих статей).

**рисунок 1.** Импакт-фактор основных изданий из Перечня ВАК (2015 г.) и количество статей в них

Достижению такого уровня научно-технического развития в немалой степени способствует участие представителей НПО в научно-технических конференциях, как российских, так и международных.

Поэтому в качестве исходных данных для оценки результативности научного потенциала НПО имени С.А. Лавочкина мы принимаем общепринятые

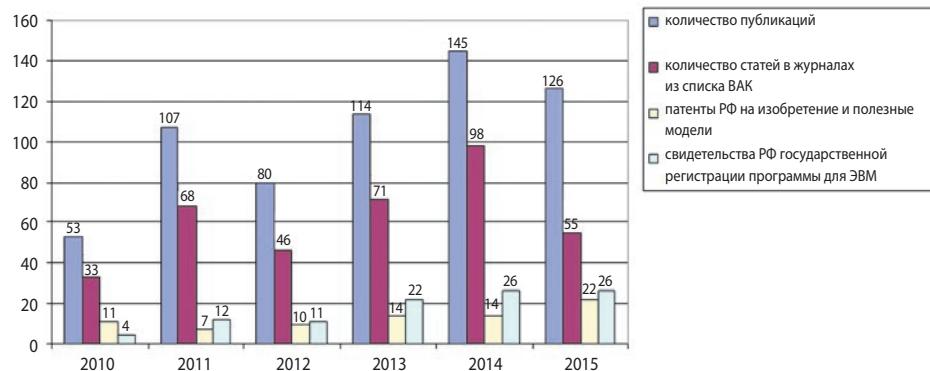
наукометрические параметры. Это – публикационная активность и количество научных публикаций (монографий, статей в рецензируемых научно-технических отечественных изданиях из Перечня ВАК (*Бюллетень...*, 2016), зарубежных научных изданиях, в сборниках научных трудов, тематических изданиях, а также выданных патентов, свидетельств на изобретения, полезную модель, программы). Достоверность полученной информации подтверждалась отечественной информационно-аналитической системой РИНЦ.

Интересно рассмотреть статистику публикаций по научным и научно-техническим изданиям с 2010 года по настоящее время. За это время, по данным российской научной электронной библиотеки ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)), в ведущих отечественных и международных высокорейтинговых рецензируемых периодических изданиях из Перечня ВАК учёными НПО имени С.А. Лавочкина опубликовано более 500 статей, из них около 90 – в международных изданиях (среднее значение импакт-фактора журналов составляет 0,543). Библиометрические показатели оценки научной результативности ряда основных предприятий Роскосмоса представлены на рисунке 2.



**рисунок 2.** Библиометрические показатели оценки научной результативности ведущих предприятий Роскосмоса (2010–2015 гг.)

Проведённый анализ количественной структуры публикаций показывает, что при определённой равномерности выпуска статей по годам выделяется группа лидеров. Таковыми являются: Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина» – 221 статья, Solar System Research – 65, Космонавтика и ракетостроение – 28, Полёт – 26, Труды МАИ – 12, Тепловые процессы в технике – 9. В других журналах – от 6 до одной публикации. По-видимому, эта группа формируется тематической направленностью проектов, разрабатываемых нашим предприятием.



**рисунок 3.** Публикационная активность в 2010–2015 гг. (в том числе статьи ограниченного распространения)

Проведённое исследование по статистическим материалам научной электронной библиотеки ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) показывает, что российские учёные мало публикуют научных работ и неактивно цитируют результаты других, значительно уступая по этим показателям зарубежным коллегам (см. рисунок 1).

При определении наукометрических показателей, таких, как публикационная активность и количество статей в изданиях из Перечня ВАК следует учитывать и статьи в сборниках ограниченного распространения. Такой рецензируемый сборник научных статей «Актуальные вопросы проектирования космических систем и комплексов» выпускается НПО имени С.А. Лавочкина с 2011 года. В сборнике публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук. В период с 2011 по 2015 годы учёными, аспирантами и соискателями опубликовано 99 рецензированных статей. Наша публикационная активность графически представлена на рисунке 3.

На предприятии создан институт рецензентов публикуемых статей из авторитетных учёных (как правило, доктора наук).

Для получения новых знаний НПО имени С.А. Лавочкина проводит конференции с международным участием:

- Инновационные автоматические космические аппараты для фундаментальных и прикладных научных исследований. Актуальные вопросы создания служебных и научных систем – г. Анапа;
- Системный анализ и управление – г. Евпатория (совместно с МАИ и рядом организаций Роскосмоса);
- секция № 18 Академических чтений по космонавтике – г. Москва.

Публикационной активности наших учёных способствуют выпускаемые предприятием периодические издания. Научно-технический журнал «Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина» входит в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК и в международную реферативную базу данных и системы цитирования Scopus.

Нами изданы также проектно-тематические монографии: «Автоматические космические аппараты для

фундаментальных и прикладных научных исследований»; «Проект космической экспедиции «ФОБОС-ГРУНТ» в 2-х томах; «Проектирование автоматических космических аппаратов для фундаментальных научных исследований» в 3-х томах. Кроме того, выпускаются учебные пособия.

В настоящее время планируется выпуск в течение ближайших двух–трёх лет книг: «Многофункциональная орбитальная платформа «НАВИГАТОР»; «Проект космической экспедиции «ЛУНА-ГЛОБ»; «Проект космической экспедиции «ЭКЗОМАРС».

В заключение отметим, что при проведении конкурсов на опытно-конструкторские работы учитывается научный потенциал предприятия по количеству докторов и кандидатов наук. Это, по нашему мнению, не в полной мере отражает реальный научный уровень организации на момент проведения тендера. Представляется целесообразным, помимо указанного, учитывать публикационную активность организации за последние пять лет, так как научный уровень быстро падает без исследовательских работ, результаты которых всегда отражаются в публикациях, в том числе и ограниченного распространения.

Авторы выражают благодарность Ольге Сергеевне Мазуровой за подготовку статистических библиографических материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бюллетень Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации. 2016. № 2. С. 1-60.

Гафаров А.А., Головин Ю.М., Пономарев Н.Б., Ребров С.Г. Пятьдесят лет сотрудничества в космической деятельности НПО имени С.А. Лавочкина и Центра Келдыша // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 3. С. 39-44.

Филатьев А.С., Финченко В.С. ЦАГИ и НПО имени С.А. Лавочкина – соприкасающиеся параллели науки и техники // Вестник ФГУП НПО имени С.А. Лавочкина. 2012. № 4. С. 108-117.

Статья поступила в редакцию 25.05.2016 г.

# ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ «ЛАПЛАС-П» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ ЮПИТЕРА. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНЫХ ОБЛИКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**М.Б. Мартынов<sup>1</sup>,**  
кандидат технических  
наук,  
*maxim.martynov@laspace.ru;*  
**М.В. Martynov**

**И.В. Платов<sup>1</sup>,**  
кандидат технических  
наук, *aia@laspace.ru;*  
**I.V. Platov**

**П.В. Меркулов<sup>1</sup>,**  
*merkulov@laspace.ru;*  
**P.V. Merkulov**

**Е.В. Леун<sup>1</sup>,**  
кандидат технических  
наук,  
*leun@laspace.ru;*  
**E.V. Leun**

В России началось осуществление перспективного космического проекта «ЛАПЛАС-П», связанного с исследованиями планетной системы Юпитера и его спутника Ганимеда. Эта миссия в основном нацелена на исследования поверхности Ганимеда с поиском следов жизни на нём. В рамках проекта были разработаны проектные облики двух научных космических аппаратов (КА): «ЛАПЛАС-П1» (КА «ЛП1») и «ЛАПЛАС-П2» (КА «ЛП2»), включающие соответственно орбитальный и посадочный аппараты.

После прилёта к Ганимеду орбитальный аппарат должен обеспечить сбор данных для выбора места посадки на нём посадочного аппарата для проведения контактных исследований поверхности Ганимеда.

**Ключевые слова:** проект «ЛАПЛАС-П»; орбитальный аппарат; посадочный аппарат; двигательная установка; антенно-фидерная система; фотоэлектрическая батарея; радионуклидный электрический генератор.

## введение

При проектной проработке миссии «ЛАПЛАС-П» для исследования планетной системы Юпитера контактными и дистанционными методами (Martynov M.B. et al., 2009; Zelenyi L. et al., 2011; Мартынов М.Б. и др., 2016) был предложен космический комплекс из двух космических аппаратов: КА «ЛП1» и КА «ЛП2», включающих соответственно орбитальный (ОА) и посадочный аппараты (ПА).

<sup>1</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

# «LAPLACE-P» AN ADVANCED RUSSIAN PROJECT AIMED AT JUPITER PLANETARY SYSTEM RESEARCH. DEVELOPMENT OF SPACECRAFT CONCEPTUAL DESIGN

**И.В. Ломакин<sup>1</sup>,**  
*ilya\_lomakin@laspace.ru;*  
**I.V. Lomakin**

**А.Ф. Насыров<sup>1</sup>,**  
*naf@laspace.ru;*  
**A.F. Nasyrov**

**П.А. Вятлев<sup>1</sup>,**  
кандидат технических  
наук,  
*vyatlev@laspace.ru;*  
**P.A. Vyatlev**

Russia has started implementation of advanced «Laplace-P» project related to research of the Jupiter planetary system and its moon Ganymede. Basically the mission is aimed at study of Ganymede surface with emphasis on search of life signs. Within the framework of the project conceptual designs of two spacecraft (SC) «LAPLACE-P1» («LP1» SC) and «LAPLACE-P2» («LP2» SC) were developed including the Orbiter and the Lander respectively. Once arrived to Ganymede, the Orbiter shall provide data collection to support the landing place selection for the Lander, which is designed for the contact studies of Ganymede surface.

**Key words:** «Laplace-P» project; Orbiter; Lander; Propulsion System; antenna-feeder system; photovoltaic array; radionuclide electric generator.

Институтом космических исследований Российской академии наук сформированы основные научные задачи этой миссии, нацеленные в основном на поиск следов жизни контактными исследованиями поверхности Ганимеда с помощью ПА.

Выбор лучшего места посадки ПА по результатам картографирования поверхности Ганимеда, сопровождение при спуске и посадке, а также дистанционные исследования возложены на ОА.

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

# ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ «ЛАПЛАС-П» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ ЮПИТЕРА. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНЫХ ОБЛИКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В данной статье представлены проектные облики КА «ЛП1» и КА «ЛП2», созданные в результате проектировки миссии «ЛАПЛАС-П», с описанием их наиболее важных систем и узлов.

## 1. Общие сведения миссии «ЛАПЛАС-П»

Экспедицию «Лаплас-П» можно разделить на четыре основных этапа.

1. Выведение КА «ЛП1» и КА «ЛП2» на отлёгочные траектории с помощью перспективных российских средств выведения: ракеты-носителя «Ангара-А5» и разгонного блока «КВТК».

2. Межпланетный этап в течение шести лет с гравитационными манёврами у Венеры и Земли, заканчивающийся прилётом к Юпитеру.

3. Тур в системе Юпитера в течение более двух лет с последующим выходом на орбиту искусственного спутника (ИС) Ганимеда.

4. Полёт ОА и ПА по орбитам ИС Ганимеда, посадка ПА.

Запуски КА «ЛП1» и КА «ЛП2» с Земли планируется произвести в одно стартовое окно с интервалом примерно в одну неделю. Предполагается, что первым на орбиту ИС Ганимеда выходит КА «ЛП1» и проводит дистанционные исследования Ганимеда, по данным которых выбирается место посадки для ПА.

Отличительная особенность миссии «ЛАПЛАС-П», являющейся, вероятно, самым перспективным проектом для НПО имени С.А. Лавочкина за всю историю его разработок в области дальнего космоса, заключается в повышенных требованиях к надёжности конструкции, элементной базе и ко всем системам КА «ЛП1» и КА «ЛП2».

## 2. Состав КА «ЛП1» и КА «ЛП2»

В КА «ЛП1» и КА «ЛП2» входят соответственно ОА и ПА, в составе каждого из них маршевая двигательная установка и адAPTERы.

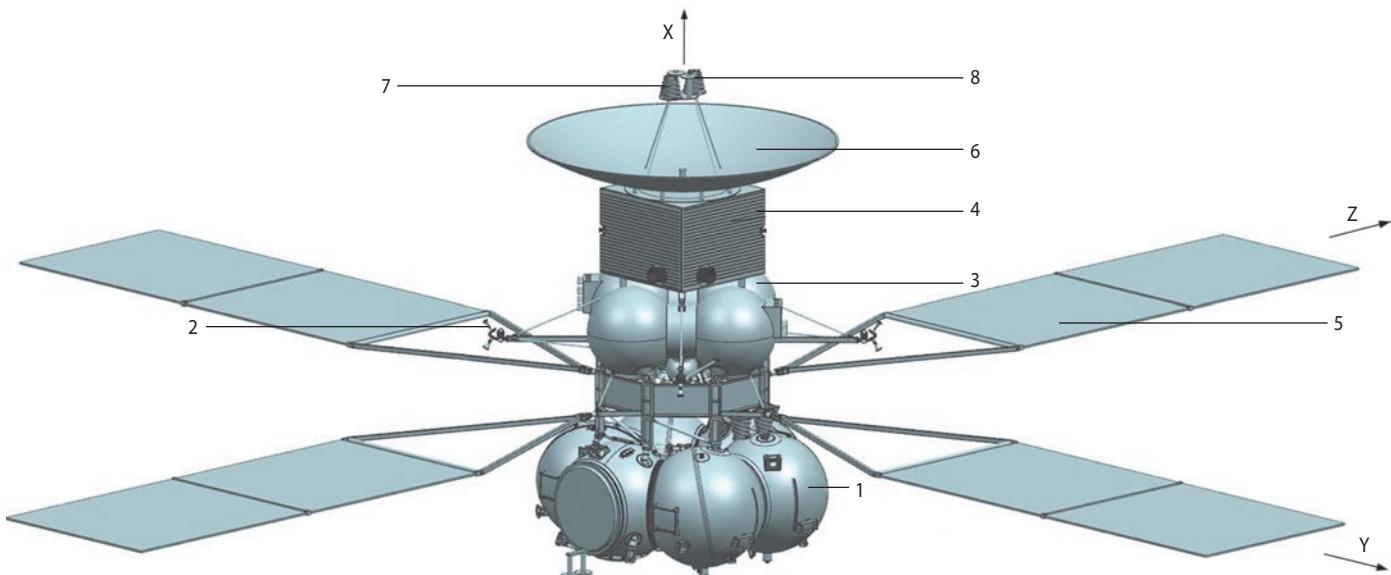
ОА и ПА включают в себя следующие системы: двигательную установку, антенно-фидерную систему, систему электроснабжения, комплекс научной аппаратуры, бортовой радиокомплекс, бортовой комплекс управления, бортовую кабельную сеть, систему контроля электризации, конструкцию, телеметрическую систему, средства обеспечения теплового режима.

Наиболее полно в данной статье рассмотрены конструкции, конструктивные особенности двигательных установок, систем электроснабжения, антенно-фидерных систем, используемых в проектируемом комплексе.

### 2.1. Конструкция, основные характеристики и состав КА «ЛП1»

В рамках проекта «Лаплас-П» разработана конструкция КА «ЛП1», общий вид и основные узлы с базовыми осями X, Y, Z представлены на рисунке 1. Высота КА «ЛП1» (без учёта адаптера для соединения с разгонным блоком) не превышает 5600 мм, а диаметр в зачекованном и раскрытом состоянии соответственно не более 4500 мм и 19300 мм. Масса заправленного КА «ЛП1» не превышает 7000 кг.

В конструкцию КА «ЛАПЛАС-П1» входят адAPTER, маршевая двигательная установка (МДУ), отделяемая ферма, ферма ОА, фотоэлектрическая батарея, двигательная установка (ДУ) ОА и приборный отсек.



1 – топливные баки МДУ; 2 – блок двигателей коррекции ДУ; 3 – топливные баки ДУ ОА; 4 – приборный отсек; 5 – фотоэлектрическая батарея; 6 – ОНА; 7, 8 – МНА.

рисунок 1. Общий вид и основные узлы КА «ЛП1»

МДУ прикреплена с помощью отделяемой фермы, выполненной по схеме «пила», к ферме ОА, которая, в свою очередь, прикрепляется к топливным бакам двигательной установки ОА. Сверху на них установлен прямоугольный приборный отсек на основе тепловых сотопанелей (ТСП) для обеспечения заданного теплового режима размещенной внутри служебной и научной аппаратуры. На приборном отсеке неподвижно закреплена остронаправленная антенна (ОНА). Малонаправленные антенны (МДА) установлены на МДУ и на ДУ ОА и ОНА.

### **2.1.1. Маршевая двигательная установка КА «ЛП1»**

МДУ КА «ЛП1» предназначена для проведения коррекций траектории на этапе перелёта, начиная с момента отделения от разгонного блока и до торможения перед выходом на орбиту в качестве искусственного спутника Ганимеда, а также для стабилизации по каналам тангажа и рысканья при работе маршевого двигателя.

МДУ КА «ЛП1» разрабатывается на основе разгонного блока «Фрегат», а в качестве двигателя на ней предполагается использовать доработанный в части увеличения времени работы и ресурса двигатель С5.92 разработки «КБ Химмаш имени А.М. Исаева» на компонентах топлива несимметричный диметилгидразин и амилин.

Обеспечение условий запуска МДУ, а также ориентация и стабилизация осуществляются с помощью двигателей малой тяги (ДМТ) ОА, управление МДУ – от КА «ЛП1».

### **2.1.2. Двигательная установка ОА**

Двигательная установка ОА предназначена для создания реактивных управляющих моментов вокруг трёх его осей при разворотах, для ориентации и стабилизации на пассивных и активных участках полёта и импульсов тяги – при проведении коррекций орбиты в качестве ИС Ганимеда.

Разработка ДУ ОА предполагает максимальное использование задела, созданного ранее от разработки ДУ перелётного модуля на двухкомпонентных жидкостных ракетных двигателей, производства «НИИМаш» (Н. Салда), проектов «ФОБОС-Грунт» и «ЛУНА-ГЛОБ» (Ефанов В.В. и др., 2012; Полищук Г.М. и др., 2009).

Несущей конструкцией для данной ДУ служит блок баков, представляющих собой сварную конструкцию из четырёх сферических топливных баков с цилиндрическими приставками между ними. Топливные баки имеют внутренний диаметр 830 мм и объём внутренней полости ( $0,3 \pm 0,002 \text{ м}^3$ ) [ $(300 \pm 2) \text{ л}$ ] каждый: два – для хранения и подачи горючего (не-

симметричного диметилгидразина) и два бака – для окислителя (амилина).

На каждом баке крепятся: датчик давления, температурные датчики, пироклапан, фильтр, клапан магистральный пневматический, клапаны проверочные, дискретный сигнализатор уровня, электронагреватель с тремя управляющими термодатчиками. Каждый бак имеет: два установочных кронштейна, которыми он крепится к восьмиугольному каркасу; элементы для установки панелей заправки и агрегатов; ложементы крепления четырех композитных баллонов высокого давления СМКБ 25-340.

К цилиндрическим приставкам блока баков приварены кронштейны для крепления панели блока клапанов, штанг блоков двигателей стабилизации и ферма блоков двигателей коррекции.

Блоки ДМТ устанавливаются на четырёх штангах, выполненных из АМг6. На каждом кронштейне устанавливается по четыре ДМТ: три двигателя стабилизации 17Д58ЭФ и один двигатель 11Д457Ф.

Блок двигателей коррекции представляет собой сборку из четырёх двигателей 11Д458Ф на круговой плате, которая крепится к остальной конструкции фермой из углепластика. Отвод тепла от работающих двигателей осуществляется тепловым аккумулятором с последующим сбросом через тепловую трубу на радиатор, закреплённый с помощью кронштейна на плате двигательного блока коррекции. Монтаж топливных и газовых магистралей выполнен по внешней поверхности баков и элементов конструкции двигательной установки.

### **2.1.3. Система электроснабжения КА «ЛП1»**

В состав системы электроснабжения КА «ЛП1» входят фотоэлектрическая и аккумуляторная батареи, а также комплекс автоматики и стабилизации.

Фотоэлектрическая батарея представляет собой первичный источник электроэнергии, преобразующий энергию излучения Солнца в электрическую энергию на базе арсенид-галлиевых фотопреобразователей, традиционно разрабатываемых ПАО «Сатурн» (Краснодар). Для данного проекта будут использованы фотопреобразователи с повышенным КПД не менее 35%, общей мощностью 400 Вт в окрестности Юпитера.

Фотоэлектрическая батарея состоит из четырёх раскрывающихся крыльев общей площадью  $50 \text{ м}^2$ , расположенных крестообразно и перпендикулярно оси X. Каждое такое крыло состоит из V-образной рамы, двух складывающихся створок, узла поворота и системы синхронизации, обеспечивающей одновременное раскрытие крыльев.

Из-за высокого уровня радиации в окрестностях Юпитера обеспечение радиационной стойкости и

# ПЕРСПЕКТИВНЫЙ РОССИЙСКИЙ ПРОЕКТ «ЛАПЛАС-П» ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ПЛАНЕТНОЙ СИСТЕМЫ ЮПИТЕРА. РАЗРАБОТКА ПРОЕКТНЫХ ОБЛИКОВ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

электростатической защиты этих фотопреобразователей планируется за счёт использования специальных перспективных радиационно-стойких стекол, производимых ООО «Центр оптического стекла» (Москва) или ОАО «Техномаш» (Москва), запатентованных в России техническими решениями (Гончаров К.А. и др., 2015).

В качестве аккумуляторных батарей планируется использовать никель-водородные или литий-ионные батареи.

## 2.1.4. Антенно-фидерная система КА «ЛП1»

Значительное расстояние ≈980 млн. км от Земли до ОА и ПА после их прилёта к Ганимеду, характерное для дальнего космоса, обусловило разработку АО «Российские космические системы» оригинального бортового радиокомплекса с максимальной мощностью передатчика ≈40 Вт.

Антенно-фидерная система (АФС) КА «ЛП1» разработана для приёма-передачи информации между КА «ЛП1», КА «ЛП2» и Землём при перелёте к Ганимеду и создания основного и резервного каналов между Землёй, ОА и ПА после посадки последнего на поверхность Ганимеда и начала проведения научных исследований.

АФС КА «ЛП1» включает остронаправленную и малонаправленные антенны. При перелёте к Ганимedu и гравитационных манёврах, когда расстояние до Земли не превышает ≈100 тыс. км, планируется использовать МНА на основе коаксиального цилиндрического резонатора для диапазона частот 7–8 ГГц из титанового сплава с минимальной массой и высокой термостойкостью.

Во время обеспечения приёма-передачи информации между ОА и ПА при спуске последнего на поверхность Ганимеда планируется использовать квадрофилярную МНА, работающую в диапазоне частот 400–435 МГц. В других случаях приёма-передачи радиосигналов применяется ОНА с узкой диаграммой направленности. Антenna устанавливается в конструкции КА «ЛП1» неподвижно, и поэтому прием-передача информации между КА «ЛП1» и Землёй на расстояниях более 100 тыс. км при перелёте к Ганимеду или при полёте ОА по его орбите обеспечивается за счёт соответствующих поворотов и нацеливания на Землю.

В качестве ОНА выбрана конструкция двухзеркальной осесимметричной антенны по схеме Кассегрена с рефлектором Ø3500 мм. Её облучатель представляет собой открытый конец волновода с дроссельной насадкой. С тыльной стороны облучатель оканчивается фланцем для крепления поляризационного селектора. Контррефлектор представляет собой гиперболоид вращения и крепится к внешней дроссельной насадке облучателя.

## 2.2. Конструкция и основные характеристики и состав КА «ЛП2»

В проекте «Лаплас-П» была разработана конструкция КА «ЛП2», общий вид и основные узлы с базовыми осями X, Y, Z представлены на рисунке 2. Высота разработанного КА «ЛП2» (без учёта адаптера для соединения с разгонным блоком) не превысила 5250 мм, а диаметр – 4300 мм. Масса заправленного КА «ЛП2» не превышает 6800 кг.

Конструкция КА «ЛП2» имеет много общего с конструкцией КА «ЛП1», описанного выше. В неё входят следующие элементы: адаптер, МДУ «ЛП2», отделяемая ферма, ферма посадочного аппарата, посадочные опоры, ДУ ПА «ЛП2», приборный отсек.

Несущей конструкцией для ДУ «ЛП2» служит сварная ферма, которая представляет собой усечённую пирамиду с четырьмя вершинами в верхней части и восемью – в нижней. На ферму устанавливаются посадочные опоры, топливные баки, шаробаллоны, баки-компенсаторы, кронштейны и плиты для крепления двигательных блоков и другие элементы конструкции.

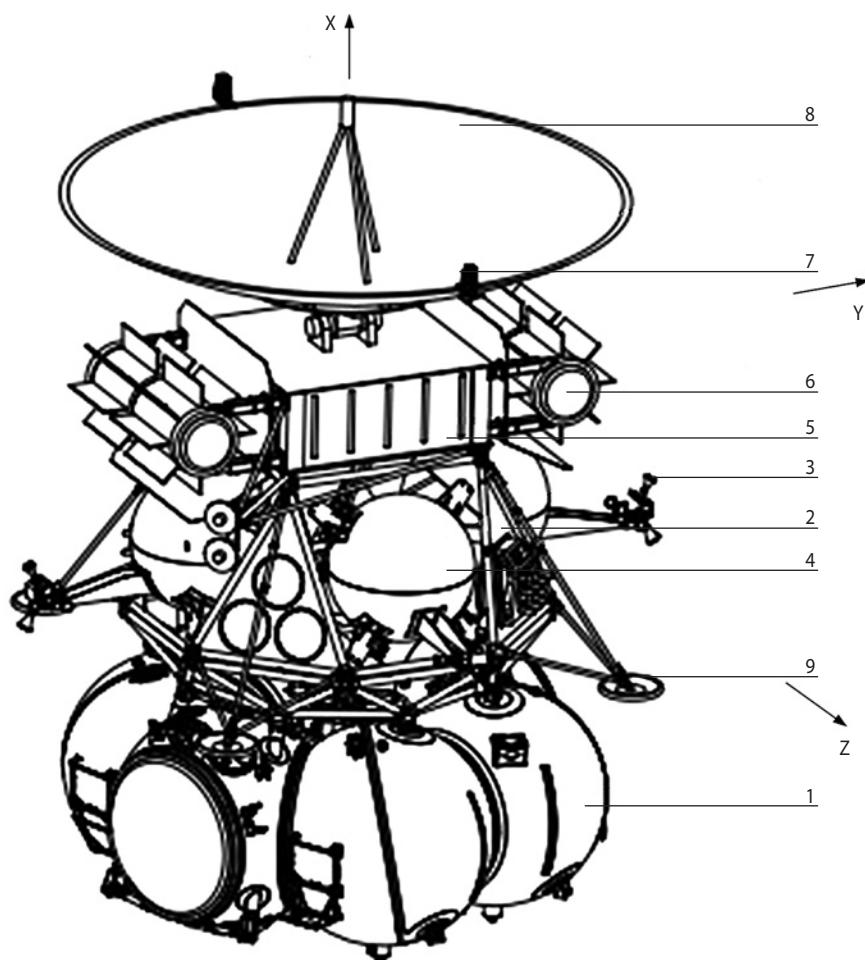
На ферму ПА установлен прямоугольный приборный отсек из ТСП с размещёнными по бокам двумя блоками радионуклидного электрического генератора (РЭГ). Сверху к приборному отсеку прикреплена с помощью двухкоординатного привода ОНА.

В связи с необходимостью посадки на поверхность Ганимеда и проведения контактных исследований одним из основных условий при выполнении проекта было уменьшение вероятности опрокидывания ПА после посадки. В результате проектирования эта цель была достигнута, что позволило уменьшить высоту центра масс ПА до 0,624 м и, таким образом, уменьшить осевые центральные моменты инерции для  $J_x$ ,  $J_y$  и  $J_z$  ( $\text{кгм}^2$ ) соответственно до 1803, 1973 и 2054.

В конструкцию ПА входят посадочные опоры, используемые для поглощения кинетической энергии при посадке на поверхность Ганимеда с заданными нагрузками и для уменьшения клиренса до заданного значения. Посадочные опоры состоят из четырёх стоек. Каждая стойка состоит из амортизатора, V-образного подкоса и опоры. Верхние концы подкоса и амортизатора шарнирно крепятся к кронштейнам, расположенным на боковых пластинах/стенках фермы посадочного аппарата, нижний конец амортизатора шарнирно закреплен к V-образному подкосу.

## 2.2.1. Маршевая двигательная установка КА «ЛП2»

В связи с тем, что межпланетные перелёты КА «ЛП1» и КА «ЛП2» идентичны, и конструкция МДУ для КА «ЛП2» подобна маршевой двигательной установке КА «ЛП1», описанной выше.



**1** – топливные баки МДУ; **2** – ферма ПА; **3** – блок ДМТ; **4** – топливные баки ДУ ПА; **5** – приборный отсек; **6** – радионуклидный электрический генератор; **7, 8** – МНА; **9** – ОНА.

**рисунок 2.** Общий вид и основные узлы КА «ЛП2»

### 2.2.2. Двигательная установка ПА

Двигательная установка ПА предназначена для выполнения следующих операций:

1. Создание импульсов тяги при проведении следующих активных манёвров ПА:

- коррекций орбиты ИС Ганимеда;
- коррекции для формирования посадочной орбиты;
- схода с орбиты и основного торможения для перехода на траекторию снижения в заданный район посадки;
- грубого торможения;
- прецизионного торможения;
- спуска с постоянной скоростью.

2. Создание реактивных управляемых моментов вокруг трёх осей КА «ЛП2» при проведении следующих маневров:

- при разворотах, ориентации и стабилизации на пассивных участках полёта;
- при стабилизации на активных участках полёта;
- стабилизации по каналу крена при работе МДУ;
- обеспечения запуска маршевого двигателя МДУ.

Топливные баки имеют внутренний диаметр 900 мм и объём внутренней полости ( $0,340 \pm 0,002 \text{ м}^3$ ) [ $(340 \pm 2) \text{ л}$ ] каждый: два – для хранения горючего (несимметричного диметилгидразина) и два бака – для окислителя (амилина). Бак состоит из цилиндрической обечайки, к которой с двух сторон приварены полусферы. Внутри расположена металлическая диафрагма, разделяющая бак на топливную и наддувную полости. Основной конструктивный материал баков – сплав АМг6.

Компенсатор температурного изменения объёма топлива состоит из цилиндрической обечайки, к которой с двух сторон приварены днища. Внутри расположены сильфоны, разделяющие компенсатор на две топливные и наддувную полости. Два компенсатора расположены в ложементах на двух топливных баках. Каждый компенсатор устанавливается на двух кронштейнах-ложементах из АМг6 с использованием резиновых амортизационных прокладок и зафиксирован титановой лентой. Клапан-переключатель предназначен для регулирования расходов КРТ из соответствующей пары топливных баков.

Блоки ДМТ устанавливаются на четырёх кронштейнах, прикрепленных к топливным бакам. На каждом кронштейне устанавливаются три двигателя С5.140.00A2-01 и один двигатель С5.145.00-0. Два двигателя мягкой посадки 255У.487.00-0 и корректирующий тормозной двигатель (КТД) устанавливаются на плате, которая фиксируется к остальной конструкции кронштейнами. Монтаж топливных и газовых магистралей выполнен по внешней поверхности баков и элементов конструкции.

Двигатели 255У.487.00-0, С5.145.00-0, С5.140.00A2-01 и вновь разрабатываемый КТД поставляются «КБ Химмаш имени А.М. Исаева» – филиалом ФГУП «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева».

### **2.2.3. Система электроснабжения КА «ЛП2»**

В системе электроснабжения КА «ЛП2» применены РЭГ, аккумуляторная батарея и КАС.

РЭГ относится к средствам радионуклидной малой энергетики, по которым в России уже накоплен опыт разработки, производства и использования (Завалишин Ю.К. и др., 2004). Эти устройства начали применяться еще в 1965 году на искусственных спутниках Земли «Космос-84» и «Космос-90», потом использовались на аппаратах «Луноход-1» и «Луноход-2». В рамках выполнения проекта «Марс-96» в середине 90-х годов в НПО имени С.А. Лавочкина подобные устройства разработки ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (Саров) также применялись для обогрева научных приборов и аппаратуры малой автоматической станции и пенетратора миссии.

Конструктивно РЭГ может быть реализован для данного проекта в виде моноблока или двух блоков, которые должны обеспечить электроэнергией с суммарной генерируемой мощностью на конец срока эксплуатации не менее 140 Вт. Для данной миссии заложено достижение РЭГом удельной мощности до 9 Вт/кг со сроком службы не менее 14 лет.

Как и в КА «ЛП1», в качестве аккумуляторных батарей планируется использовать никель-водородные или литий-ионные батареи.

### **2.2.4. Антенно-фидерная система КА «ЛП2»**

Узел ОНА закреплен на КА «ЛП2» с помощью двухкоординатного привода с возможностью поворота в секторе  $\pm 60^\circ$  по двум осям. Приём-передача между ПА после его посадки на поверхность Ганимеда и начала проведения научных исследований с движущимся ОА по основному каналу или Землëй – по резервному каналу осуществляется поворотом ОНА.

В остальном конструкция АФС, используемая в КА «ЛП2», подобна АФС, входящей в состав КА «ЛП1».

## **заключение**

В статье представлены проектные облики КА «ЛП1» и КА «ЛП2» российской научной миссии «Лаплас-П», предназначенных для проведения дистанционных и контактных исследований планетной системы Юпитера. Описаны двигательные установки КА «ЛП1» и КА «ЛП2», в составе каждой из которых маршевая двигательная установка и соответственно двигательные установки ОА и ПА, а также бортовой радиокомплекс, антенно-фидерная система, источники электрической энергии, используемые в системе электроснабжения: фотоэлектрическая батарея, аккумуляторная батарея, радионуклидный электрический генератор.

## **список литературы**

Гончаров К.А., Савельев А.А., Вятлев П.А., Леун Е.В. и др. Патент РФ на полезную модель № 150834. Стеклянная пластина для радиационной и электростатической защиты фотоэлектрических преобразователей космических аппаратов. МПК B64G 1/54, G21F 1/06, G02B 1/10 Опубл. 27.02.2015. Бюл. № 6.

Завалишин Ю.К., Пустовалов А.А., Дербунович Б.В., Акимов И.М. и др. Технологические возможности производства источников тепла на основе plutonия-238 // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». НТЦ ТАТА. 2004. № 11(19). С.27-31.

Ефанов В.В., Мартынов М.Б., Пичхадзе К.М. Космические роботы для научных исследований // Наука в России. 2012. № 1. С. 4-14.

Мартынов М.Б., Меркулов П.В., Ломакин И.В., Вятлев П.А. и др. Перспективный российский проект «ЛАПЛАС-П» для исследований планетной системы Юпитера: цели научной миссии и её особенности. Схема полёта // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2. С. 3-10.

Полищук Г.М., Пичхадзе К.М., Ефанов В.В., Мартынов М.Б. Космические модули комплекса «Фобос-Грунт» для перспективных межпланетных станций. Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2009. № 2. С. 3-7.

Martynov M.B., Lomakin I.V., Simonov A.V., Zelenyi L.M. et al. The Concept of expedition to Europa, the Jupiter's satellite // International workshop «Europa Lander: science goals and experiments». Abstract book. 2009. P. 53-54.

Zelenyi L., Korablev O., Martynov M., Popov G. et al. Europa Lander mission and the context of international cooperation // Advances in Space Research. 2011. V. 48, issue 4. P. 615-628.

*Статья поступила в редакцию 18.04.2016 г.*

# МЕТОД ЛИНЕАРИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ КА С МАЛОЙ ТЯГОЙ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

# THE METHOD OF LINEARIZATION IN OPTIMIZATION PROBLEMS OF LOW THRUST SPACECRAFT TRAJECTORIES. COMPUTATIONAL ASPECTS



**П.В. Казмерчук<sup>1</sup>,**  
 кандидат технических наук,  
*pavel.kazmerchuk@gmail.com;*  
**P.V. Kazmerchuk**

В работе рассматриваются вычислительные аспекты модифицированного метода линеаризации (ММЛ), который позволяет решать довольно широкий класс нелинейных оптимизационных задач, возникающих при оптимизации траекторий КА с малой тягой. Под вычислительными аспектами понимается совокупность второстепенных вычислительных задач метода линеаризации и конкретные варианты их решения.

*Ключевые слова:* малая тяга;  
 нелинейная оптимизация; C++.

## введение

В работе (Казмерчук П.В., 2015) были рассмотрены основные теоретические аспекты реализации и алгоритм модифицированного метода линеаризации (ММЛ) применительно к задачам оптимизации траекторий КА с малой тягой. Однако практическая реализация ММЛ сталкивается с необходимостью решения различных второстепенных задач, успешное решение которых напрямую связано с эффективностью метода. Особенность этих второстепенных задач состоит в том, что существует большое количество вариантов их решения и окончательный выбор варианта часто невозможно формализовать (Ефанов В.В., Семункина В.И., 2008). В этом случае приходится использовать качественные соображения,

*In article, computational aspects of the modified linearization method (MLM) which allows to solve wide class of nonlinear optimization tasks with nonlinear constraints arising in the optimization of low thrust spacecraft trajectories are considered. Under the computational aspects understood as a set of secondary computing tasks linearization method and specific options for their solutions.*

*Keywords:* low thrust;  
 nonlinear constrained optimization; C++.

опыт решения оптимизационных задач (Ефанов В.В., Семункина В.И., 2009) и различные эвристики. Под вычислительными аспектами метода будем понимать совокупность второстепенных задач и конкретные варианты их решения. В данной работе рассматриваются основные вычислительные аспекты, с которыми пришлось столкнуться в процессе разработки, отладки и тестирования ММЛ.

## 1. Язык программирования

Современная оптимизация невозможна без ЭВМ, а её реализация – без программирования. Выбор языка программирования для реализации алгоритма зача-

<sup>1</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

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

стую не очевиден. Основными критериями при выборе, как правило, являются:

- целевая платформа;
- гибкость языка;
- время разработки;
- производительность;
- поддержка и сообщество.

Каждый вычислитель индивидуально решает, какой критерий для него важнее. Однако главным критерием эффективности оптимизационного метода является вычислительное время, за которое может быть получено решение, поэтому основное требование к языку – производительность исполняемого кода.

По ссылке <http://benchmarksgame.alioth.debian.org/u32/which-programs-are-fastest.php> можно найти сравнение производительности различных языков программирования на группе тестовых задач. Интерпретируемые языки существенно проигрывают компилируемым в производительности. Из компилируемых языков лидируют С и С++. Имея опыт разработки программ на С++ и задел по различным подпрограммам (матричная алгебра, численные методы и др.), для реализации ММЛ был выбран язык С++.

## 2. Интегрирование

Использование ММЛ для решения задач оптимизации траекторий КА с малой тягой предъявляет высокие требования к производительности программы. На первый взгляд, вопросы интегрирования уравнений движения не имеют отношения к методу оптимизации. Хороший оптимизационный инструмент (библиотека) должен позволять пользователю выбрать метод интегрирования под свою конкретную задачу. С другой стороны, для реализации ММЛ требуется интегрирование составной динамической системы и сопряжённых систем (для каждого функционала), что занимает около 92% от всего времени итерации. Поэтому эффективность интегрирования является определяющей в эффективности всего метода. Специфика интегрирования составной системы, а также некоторые требования к интегратору со стороны алгоритма ММЛ не позволяют полностью развязать процесс оптимизации и непосредственно интегрирования. Существенно на процесс оптимизации влияют и точность метода интегрирования, и его параметры. Неудачный выбор пользователем метода интегрирования либо его параметров может привести к неоправданному увеличению времени расчёта или же к невозможности решения оптимизационной задачи в целом.

При интегрировании следует соблюдать предосторожность: если для аппроксимации управления используются функции, имеющие разрывы (кусочно-постоянные, кусочно-линейные), то шаги

интегрирования должны попадать в узлы аппроксимирующей функции. В противном случае методы интегрирования будут терять свою точность.

Принимая во внимание физику движения КА с малой тягой, для интегрирования составной динамической системы и сопряжённых систем выгодно использовать методы высокого порядка точности с автоматической регулировкой шага. Несмотря на повышенную вычислительную сложность, такие методы позволяют выбрать больший шаг интегрирования и в конечном счёте сократить общее время расчёта. Были проведены численные эксперименты для сравнения различных методов интегрирования: классический метод Рунге – Кутты 4-го порядка, метод Фелберга 4-го порядка, метод Дорманда – Принса 5-го порядка, метод Дорманда – Принса 8-го порядка (*Hairer E., Wanner G., 2008*). Сравнение проводилось на задаче оптимизации перелёта КА с солнечным парусом на орбиту Марса (*Жуков А.Н., Лебедев В.Н., 1964*). Метод Дорманда – Принса 8-го порядка оказался наилучшим с точки зрения вычислительной эффективности. В работе (*Петухов В.Г., 1996*) получены аналогичные результаты в части эффективности метода Дорманда – Принса 8-го порядка.

Другим необходимым элементом используемого метода интегрирования является возможность получения (путем интерполяции) значений в промежуточных (между узлами интегрирования) точках. Как правило, большинство современных методов интегрирования обладают такой возможностью. Для них построены эффективные интерполяционные процедуры, использующие вычисленные в процессе интегрирования коэффициенты (*Hairer E., Wanner G., 2008*). Значения в промежуточных точках требуются для численного вычисления интегралов, входящих в выражения для функциональных производных (*Казмерчук П.В., Усачов В.Е., 2011*), а также при локализации точек разрывов фазового вектора.

## 3. Дифференцирование

Линеаризация исходной нелинейной оптимизационной задачи требует вычисления на каждой итерации функциональных производных (производных Фреше) (*Казмерчук П.В., 2015*). Для их вычисления требуются частные производные от правых частей составной динамической системы и других функций, входящих в постановку задачи (*Казмерчук П.В., Усачов В.Е., 2011*). Получение частных производных в аналитическом виде с последующим их переносом в программу является оптимальным с точки зрения производительности исполняемого кода решением. Однако в случае нетривиальных моделей, используемых в составной динамической системе, аналитическое получение указанных производных может

быть очень трудоёмким. С другой стороны, даже для простых задач заставлять пользователя библиотеки вручную выписывать частные производные не гуманно и повышает вероятность банальных ошибок. Лучшим решением будет предусмотреть возможность численного получения производных, а пользователю предоставить право выбора: использовать её или ручной труд.

Реализация численного дифференцирования, основанная на конечно-разностных схемах (были опробованы схемы с количеством точек до четырёх включительно), ожидаю натолкнулась на проблему выбора оптимального шага, который приходилось экспериментально подбирать для получения удовлетворительных результатов в различных случаях.

После исследования различных источников и реализаций удалось достичь стабильных результатов при использовании метода Риддера (*Ridders C.J.F.*, 1982). Не вдаваясь в математические подробности, которые можно найти по ссылке, скажем, что метод Риддера представляет собой адаптивный алгоритм дифференцирования, оценивающий оптимальный шаг после проведения дополнительных вычислений. Алгоритм позволяет получать значение производных с точностью 7–8 знаков после запятой. Метод Риддера показал исключительную стабильность и надёжность. Однако платой за высокую точность является его низкая производительность, особенно при вычислении производных вектор-функции по векторному аргументу (матриц Якоби).

Окончательный выбор был сделан в пользу методики, позволяющей вычислять производные первого порядка от функций за время, не превышающее трёхкратного времени вычисления самой функции, причём с машинной точностью (*Евтушенко Ю.Г.*, 2013). В литературе этот подход называется «Автоматическое дифференцирование».

## 4. Автоматическое дифференцирование

Основу методики составляет правило дифференцирования сложной функции (цепное правило). В простейшем одномерном случае производная сложной функции

$$f(x)=w_2(w_1)f(x) \quad (1)$$

имеет вид

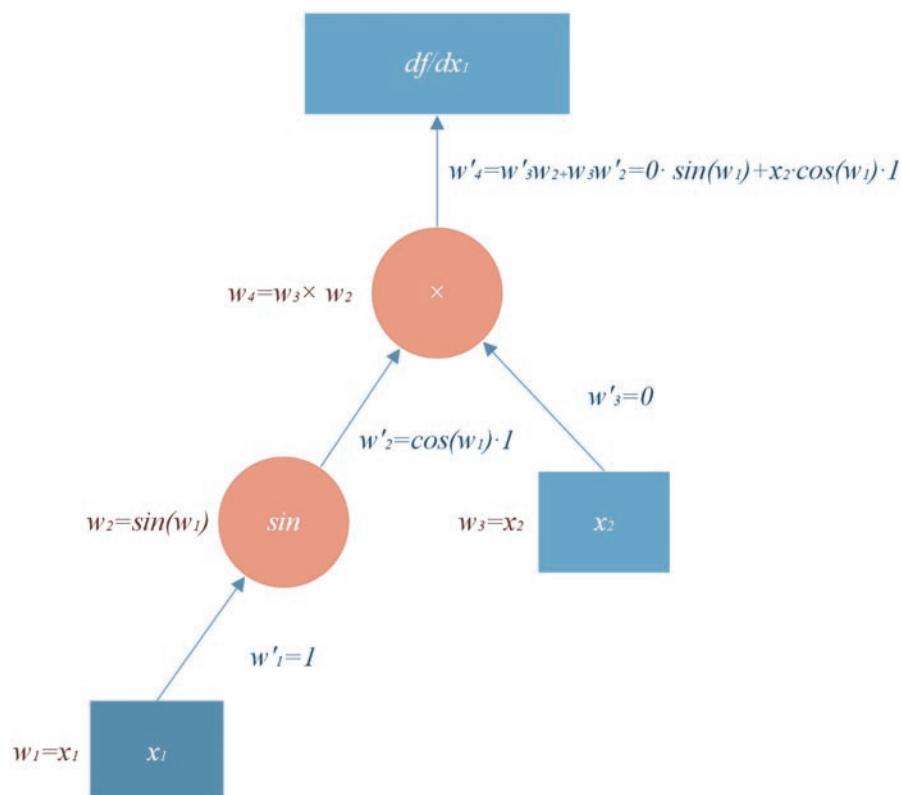
$$\frac{df}{dx} = \frac{dw_2}{dw_1} \frac{dw_1}{dx}. \quad (2)$$

Например, пусть дана функция

$$f(x_1, x_2) = x_2 \cdot \sin(x_1). \quad (3)$$

Рассматривая её как сложную функцию и применяя цепное правило получим

$$\begin{aligned} \frac{df}{dx_1} &= \frac{dw_3}{dx_1} w_2 + w_3 \frac{dw_2}{dx_1} = \frac{dw_3}{dx_1} w_2 + \\ &+ w_3 \frac{dw_2}{dw_1} \frac{dw_1}{dx_1} = x_2 \cos(x_1), \end{aligned} \quad (4)$$



**рисунок.** Вычислительный граф автоматического дифференцирования (прямой ход)

# МЕТОД ЛИНЕАРИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ КА С МАЛОЙ ТЯГОЙ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

где

$$\begin{aligned} w_1 &= x_1, \frac{dw_1}{dx_1} = 1; \\ w_2 &= \sin(w_1), \frac{dw_2}{dw_1} = \cos(w_1) \cdot 1; \\ w_3 &= x_2, \frac{dw_3}{dx_1} = 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Указанные вычисления удобно представить в виде графа, узлами которого являются элементарные операции и функции (рисунок).

Процесс вычисления производной можно рассматривать как обход вычислительного графа с последовательным вычислением промежуточных производных, причем обходить его можно как снизу–вверх (прямой ход), так и сверху–вниз (обратный ход).

С вычислительной точки зрения прямой ход эффективнее в случае дифференцирования функций  $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, n \gg 1$ , а обратный ход – для функций  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^m, m \gg 1$ .

Программная реализация автоматического дифференцирования базируется на двух различных подходах:

- преобразование исходного кода программы;
- переопределение («перегрузка») операторов.

Преобразование исходного кода программы предполагает дополнительную обработку исходного текста программы с последующей генерацией кода (прямого или обратного хода) для автоматического дифференцирования. Ключевым недостатком является сложность реализации дополнительных процедур, осуществляющих обработку исходного кода программы. К достоинствам можно отнести реализуемость на любом языке программирования и более широкие возможности для оптимизации вычислений при обходе графа.

Переопределение операторов (для языков, поддерживающих данную функциональность) предполагает замену встроенных числовых типов новым пользовательским типом, для которого «перегружены» элементарные операции и функции. Производные для них вычисляются одновременно с результатом операции/функции. В этом случае формируемое компилятором синтаксическое дерево для выражения будет соответствовать прямому обходу вычислительного графа автоматического дифференцирования (см. рисунок). Из плюсов данного подхода отметим простоту реализации для прямого хода. Реализация обратного хода также возможна, но требует дополнительного расхода памяти для хранения промежуточных результатов и усложняет программирование из-за несоответствия направления обхода вычислительного графа автоматического дифференцирования потоку выполнения программы. К недостаткам

следует отнести наличие большого количества временных переменных и многократное вычисление одинаковых и тех же промежуточных результатов.

Однако, используя современные возможности языка C++, можно эти недостатки существенно нивелировать. С помощью шаблонов выражений («expression templates») можно реализовать «ленивые» перегруженные операции, которые откладывают вычисление промежуточных выражений до момента присваивания результата, когда все аргументы уже известны. Доступность компилятору всех аргументов выражения в точке присваивания позволяет ему (компилятору) использовать агрессивную оптимизацию с исключением временных переменных и повторяющихся вычислений.

Рассмотрим одну из возможных реализаций с использованием стандарта языка C++11 (ISO/IEC 14882:2011). Ограничимся только конструкциями, необходимыми для рассматриваемого примера (3). Как уже было сказано выше, необходимо определить новый пользовательский тип для замены встроенных числовых типов и переопределить для него операции:

```
template <class T>
struct Value {};
```

Не конкретизируя пока содержимое класса `Value`, запишем дифференцируемую функцию из примера:

```
typedef Value<double> real;
real f(real const& x1, real const& x2) {
    return x2 * sin(x1);
}
```

Элементарная операция в нашем случае одна – умножение. Её и требуется перегрузить.

```
template <class T>
Value<T> operator*(Value<T> const& lhs, Value<T> const& rhs) {
    //...
}
```

Основная идея отложенных вычислений состоит в том, что каждая элементарная операция вместо непосредственного вычисления и возврата результата возвращает специальный объект, который только сохраняет ссылки на аргументы операции.

Создадим класс для хранения аргументов:

```
template<class A, class B>
struct Expression {
    Expression(A const& lhs, B const& rhs)
        : lhs_(lhs)
        , rhs_(rhs)
    {}

protected:
    A const& lhs_;
    B const& rhs_;
};
```

Теперь можно записать отложенную операцию умножения:

```
template <class T>
Expression<Value<T>, Value<T>>
operator*(Value<T> const& lhs, Value<T> const& rhs) {
    return Expression<Value<T>, Value<T>>(lhs, rhs);
}
```

Однако в таком виде теряется информация о самой операции. Для её хранения добавим в класс Expression дополнительный параметр шаблона:

```
template<class O, class A, class B>
struct Expression {
    Expression(A const& lhs, B const& rhs)
        : lhs_(lhs), rhs_(rhs)
    {}

    double value() const {
        return O::value(lhs_, rhs_);
    }

    double derivative() const {
        return O::derivative(lhs_, rhs_);
    }

protected:
    A const& lhs_;
    B const& rhs_;
};
```

Так же добавлены функции, которые непосредственно вычисляют результат операции и её производную, делегируя вызов объекту, хранящему тип операции.

Теперь отложенная операция умножения примет вид

```
template <class T>
Expression<Mul, Value<T>, Value<T>>
operator*(Value<T> const& lhs, Value<T> const& rhs) {
    return Expression<Mul, Value<T>, Value<T>>(lhs, rhs);
}
```

Объект, хранящий тип операции умножения и производящий непосредственные вычисления, может выглядеть следующим образом:

```
struct Mul {
    template<class A, class B>
    static double value(A const& lhs, B const& rhs) {
        return val(lhs) * val(rhs);
    }

    template<class A, class B>
    static double derivative(A const& lhs, B const& rhs) {
        return der(lhs) * val(rhs) + val(lhs) * der(rhs);
    }
};
```

Функция `value` возвращает непосредственно произведение аргументов, функция `derivative` возвращает производную, вычисленную по правилу дифференцирования произведения. Вспомогательные функции `val` и `der` предназначены для диспетчирования вызовов в случае когда в качестве аргумента приходит числовая константа, например типа `double`.

```
template<class T>
auto val(T const a) -> decltype(a.value()) {
    return a.value();
}

template<class T>
auto der(T const a) -> decltype(a.derivative()) {
    return a.derivative();
}

inline double val(double const& f) {
    return f;
}

inline double der(double const& f) {
    return 0.0;
}
```

Здесь использованы возможности C++11 по автоматическому выводу типа возвращаемого функцией значения. С использованием аналогичного приёма можно переписать и перегруженную операцию умножения.

```
// создать объект для хранения бинарной операции
template <class O, class A, class B>
Expression<O, A, B> binary(A const& lhs, B const& rhs) {
    return Expression<O, A, B>(lhs, rhs);
}

template <class T>
auto operator*(Value<T> const& lhs, Value<T> const& rhs) ->
decltype(binary<Mul>(lhs, rhs)) {
    return binary<Mul>(lhs, rhs);
}
```

Конечно, в данном случае это всего лишь синтаксический «сахар», но код выглядит намного «чище» и лаконичнее.

Далее необходимо перегрузить функцию синуса, чтобы она могла работать с аргументами типа `Value<T>` и `Expression<O, A, B>`:

```
template<class T>
auto sin(Value<T> const& arg) -> decltype(detail::unary<Sin>(arg)) {
    return detail::unary<Sin>(arg);
}

template<class O, class A, class B>
auto sin(Expression<O, A, B> const& arg) -> decltype(unary<Sin>(arg)) {
    return unary<Sin>(arg);
}
```

Здесь `unary` – вспомогательная функция, создающая объект типа `Expression` для хранения унарной операции; `Sin` – класс, реализующий вычисление значения и производной синуса.

```
struct Void {};
// создать объект для хранения унарной операции
template <class O, class A>
Expression<O, A, Void> unary(A const& a) {
    return Expression<O, A, Void>(a, Void());
}

struct Sin {

    template<class A, class B>
    static double value(A const& lhs, B const& rhs) {
        return ::sin(val(lhs));
    }

    template<class A, class B>
    static double derivative(A const& lhs, B const& rhs) {
        return ::cos(val(lhs)) * der(lhs);
    }
};
```

Теперь выражение

```
return x2 * sin(x1);
```

производную которого мы хотим получить, после инстанцирования шаблонов развернется в следующее:

```
return Expression<Mul, real, Expression<Sin, real, Void>>(x2,
Expression<Sin, real, Void>(x1));
```

# МЕТОД ЛИНЕАРИЗАЦИИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ ТРАЕКТОРИЙ КА С МАЛОЙ ТЯГОЙ. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ

Этот сложный объект хранит всю последовательность операций и их аргументы, но непосредственно вычислений не производит. Заметим, что класс Expression хранит аргументы выражений по константной ссылке, а из дифференцируемой функции f экземпляр класса Expression возвращается по значению. Поэтому объект класса Expression нельзя сохранять, так как ссылки станут невалидными. Необходимо в точке присваивания вычислить результат.

Осталось только «объяснить» программе, по какой переменной вычислять производную, т.е. какая переменная является независимой. Для этого достаточно переменной объекта типа Value<T>, в которой хранится значение производной, присвоить значение единицы, а для всех остальных объектов – ноль.

Ниже приведена минимальная реализация класса value<T>.

```
template <class T>
struct Value {
    typedef T value_type;

    Value()
        : value_(0)
        , derivative_(0)
    {}

    Value(value_type const& v)
        : value_(v)
        , derivative_(0)
    {}

    // копирующий конструктор
    Value(Value const& v)
        : value_(v.value())
        , derivative_(v.derivative())
    {}

    // создание из отложенного выражения
    template <class O, class A, class B>
    Value(Expression<O, A, B> const& e)
        : value_(e.value())
        , derivative_(e.derivative())
    {}

    // присваивание отложенного выражения
    template <class O, class A, class B>
    Value& operator=(Expression<O, A, B> const& e) {
        value_ = e.value();
        derivative_ = e.derivative();
        return *this;
    }

    value_type value() const {
        return value_;
    }

    value_type derivative() const {
        return derivative_;
    }

    void dependent() const {
        derivative_ = value_type(0);
    }

    // считать переменную независимой
    void independent() const {
        derivative_ = value_type(1);
    }

private:
    T value_;
    mutable T derivative_;
};
```

Теперь, для того чтобы вычислить значение производной нашей функции f, например по переменной x1 в точке (3,5), достаточно написать:

```
real x1 = 3, x2 = 5;
x1.independent();
double df = f(x1, x2).derivative();
```

По ссылке <http://www.autodiff.org/?module=Tools> можно найти готовые реализации автоматического дифференцирования для различных языков программирования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Евтушенко Ю.Г. Оптимизация и быстрое автоматическое дифференцирование. М.: ВЦ РАН, 2013. 144 с.

Ефанов В.В., Семункина В.И. Выбор типа орбит космических систем оптико-электронного наблюдения // Полёт. 2008. № 3. С. 12-17.

Ефанов В.В., Семункина В.И., Шостак С.В. Особенности баллистического проектирования КС Д33 оптико-электронного наблюдения типа «Аркон-1» // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2009. № 1. С. 46-52.

Жуков А.Н., Лебедев В.Н. Вариационная задача о перелёте между гелиоцентрическими круговыми орбитами с помощью солнечного паруса // Космические исследования. 1964. Т. 2, № 1. С. 46-50.

Казмерчук П.В. Метод линеаризации в задачах оптимизации траекторий КА с малой тягой. Теоретические аспекты // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 4. С. 37-42.

Казмерчук П.В., Усачов В.Е. Вычисление производных Фреше в задачах оптимизации сложных траекторий КА с малой тягой // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2011. № 4. С. 44-54.

Петухов В.Г. Оптимизация траекторий и эволюция движения космических аппаратов с двигательными установками малой тяги: дис. ... канд. техн. наук. М., 1996. С. 21-22.

Hairer E., Wanner G. Solving Ordinary Differential Equations I. Nonstiff Problems // Springer. 2008.

Ridders C.J.F. Accurate computation of F'(x) and F'(x)F''(x) // Advances in Engineering Software. 1982. V. 4, № 2. P. 75-76.

Статья поступила в редакцию 14.01.2016 г.

# РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ: КОНЦЕПЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ И КОНФИГУРАЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ

**А.А. Барабанов<sup>1</sup>,**  
*barabanov@laspace.ru;*  
**А.А. BarabanoV**

**И.М. Нестерин<sup>1</sup>,**  
*nesterin@laspace.ru;*  
**I.M. Nesterin**

**В.К. Милюков<sup>2</sup>,**  
*доктор физико-математических наук,*  
*milyukov@sai.msu.ru;*  
**V.K. Milyukov**

**В.К. Сысоев<sup>1</sup>,**  
*доктор технических наук,*  
*sysoev@laspace.ru;*  
**V.K. Sysoev**

**И.В. Москатиньев<sup>1</sup>,**  
*miv@laspace.ru;*  
**I.V. Moskatinev**

**А.Д. Юдин<sup>1</sup>,**  
*yudin@laspace.ru;*  
**A.D. Yudin**

В статье представлено предложение по организации орбитального эксперимента по измерению задержки распространения света в гравитационном поле Земли (эффект Шапиро) с помощью лазерной интерферометрии на основе кластера малых космических аппаратов (МКА). Рассматриваются компоновочные схемы МКА, технология запуска и высокоточные измерения их орбитальных параметров.

**Ключевые слова:**  
 фундаментальные гравитационные эксперименты;  
 постньютонаовские параметры;  
 лазерная интерферометрия;  
 малые космические аппараты.

## введение

11 февраля 2016 года произошло событие, значение которого для фундаментальной физики трудно переоценить. В этот день было объявлено, что наземная гравитационно-волновая обсерватория LIGO зарегистрировала гравитационный сигнал, по предположению, от слияния двух чёрных дыр с массами порядка 30 масс Солнца (*Abbott B.P. et al., 2016*), что блестяще подтвердило предсказание общей теории относительности (ОТО). Таким образом, начата эра гравитационно-волновой астрономии.

Развитие космических технологий, в частности кластерных спутниковых систем, открывает новые перспективы в измерении тонких гравитационных эффектов, лежащих в основе релятивистских теорий гравитации, в том числе и ОТО.

<sup>1</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

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

# RELATIVISTIC GRAVITATIONAL EXPERIMENT IN THE EARTH ORBIT: CONCEPT, TECHNOLOGY AND CONFIGURATION OF SATELLITE CONSTELLATION

**В.К. Милюков<sup>2</sup>,**  
*доктор физико-математических наук,*  
*milyukov@sai.msu.ru;*  
**V.K. Milyukov**

**В.К. Сысоев<sup>1</sup>,**  
*доктор технических наук,*  
*sysoev@laspace.ru;*  
**V.K. Sysoev**

**И.В. Москатиньев<sup>1</sup>,**  
*miv@laspace.ru;*  
**I.V. Moskatinev**

**А.Д. Юдин<sup>1</sup>,**  
*yudin@laspace.ru;*  
**A.D. Yudin**

*In the article one can find an approach concerning the arrangement of the orbital experiment aimed at measuring of light propagation delay in the Earth gravitational field (so called Shapiro effect) by means of laser interferometry based on the small spacecraft cluster. The small SC layouts and launch procedure as well as high-precision measurements of the orbital parameters are provided.*

**Keywords:**  
*fundamental gravitational experiments;*  
*postnewtonian parameters;*  
*laser interferometry;*  
*small spacecraft.*

Размещение инструментов в космосе обеспечивает доступ к условиям с особой динамической «чистотой», не достижимым в земных лабораториях, но имеющим важнейшее значение для успешного проведения прецизионных экспериментов. В частности, для многих экспериментов в области фундаментальной гравитации космическое базирование становится неизбежным.

Наиболее известный из космических проектов, имеющий целью регистрацию и наблюдение гравитационных волн в частотной области  $10^{-4} \div 1$  Гц, – это обсерватория LISA (The Laser Interferometer Space Antenna), совместная миссия ESA-NASA, её запуск планируется в 2034 году. LISA состоит из трёх идентичных космических аппара-

<sup>2</sup> Государственный Астрономический Институт имени П.К. Штернберга МГУ, Россия, г. Москва.

Sternberg Astronomical Institute Moscow University, Russia, Moscow.

# РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ: КОНЦЕПЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ И КОНФИГУРАЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ

тов, размещённых на гелиоцентрической орбите на расстоянии 5 миллионов километров друг от друга. Флуктуации расстояния между двумя КА, вызванные прохождением гравитационно-волнового излучения, будут измеряться лазерными интерферометрами с пикометровой точностью (*LISA: Probing the Universe with Gravitational Waves*, 2007; *Laser Interferometer Space Antenna...*, 2009; *LISA Spacecraft Description*, 2009). 3 декабря 2015 года осуществлён запуск экспериментального спутника «LISA Pathfinder». Целью данной миссии является проверка в условиях космического полёта измерительной аппаратуры для гравитационно-волнового эксперимента. На борту КА находятся два инерциальных сенсора, лазерный интерферометр, измеряющий расстояние между ними, система контроля сноса и сверхточная система двигателей микротяги (<http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/>).

С точки зрения экспериментальной проверки теорий гравитации, наша Солнечная система является уникальной «лабораторией», в которой присутствуют условия, необходимые для проведения важнейших фундаментальных исследований. Солнце обладает значительно более мощным гравитационным полем, чем Земля, следовательно, эффекты релятивистской гравитации там выражены значительно сильнее (потенциалы около Солнца и в земных условиях различаются в 3000 раз). Однако оценки показывают, что и на околоземных орбитах возможна постановка прецизионных гравитационных экспериментов, а вывод спутника на орбиту вокруг Земли – задача значительно более доступная, чем вывод спутника на орбиту вокруг Солнца. В частности, предложена идея гравитационно-волнового эксперимента, который в общих чертах повторяет концепцию проекта LISA в гравитационном поле Земли (*Luo J., Milyukov V., Sazhin M. et al.*, 2016).

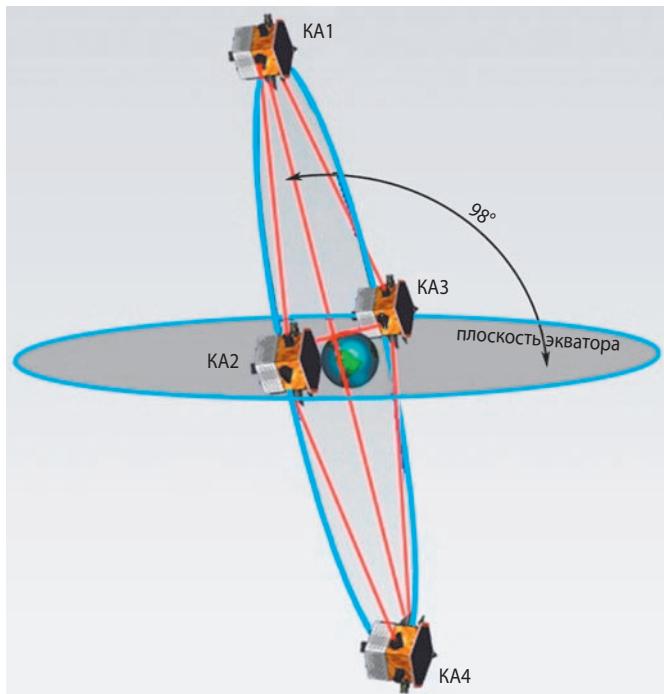
Кластерные технологии и прецизионная лазерная интерферометрия могут быть применены и в гравитационных экспериментах другого типа – измерение параметров параметризованного постニュтонаовского формализма (ППН-параметров). Измеряемой величиной в данном эксперименте является задержка распространения света в гравитационном поле (эффект Шапиро) (*Will C.M.*, 1993).

Современные технологии измерения времени и расстояний позволяют проводить эксперименты по измерению постニュтоновских эффектов (ППН-параметров) в ближнем космосе, на орбите вокруг Земли с точностью, которая позволит сделать выводы о возможности существования новой физики со скалярными полями. В настоящее время наиболее точное значение наиболее фундаментального ППН-параметра  $\gamma$  получено по данным миссии CASSINI  $\gamma=1+(2.1\pm 2.3)\times 10^{-5}$  (*Bertotti B., Iess L., Tortora P.*, 2003).

В данной статье рассматривается построение кластерной системы в гравитационном поле Земли на основе космических аппаратов НПО имени С.А. Лавочкина для реализации эксперимента по измерению параметра  $\gamma$  на уровне точности порядка  $10^{-9}$  на основе методических предложений ГАИШ МГУ.

## 1. Конфигурация кластера малых космических аппаратов на околоземной круговой орбите в гравитационном поле Земли

Детальная разработка схемы орбитального эксперимента по определению ППН-параметра  $\gamma$  показала, что оптимальной с точки зрения реализуемости эксперимента и обеспечения измерений с необходимой точностью, является конфигурация четырёх спутников на круговых орbitах (рисунок 1).



**рисунок 1.** Схема космического эксперимента по измерению релятивистской задержки света

Такая конфигурация формирует избыточную архитектуру оптических связей, устраниющую необходимость в очень дорогих «безносовых» космических системах. Все четыре КА выведены в одну плоскость и отделены друг от друга расстоянием до 200000 км. Аппараты распределены по орбите в форме креста, исходные истинные аномалии аппаратов: для КА 1=0°, для КА 2=315°, для КА 3=45° и для КА 4=185÷195°. В евклидовом пространстве такая геометрия избыточна, и, измеряя только пять из шести расстояний, можно вычислить шестое. Геометрическая избыточность является ключевым элементом, дающим возможность выявить отклонение

от евклидовой геометрии. Измеряется также шестое расстояние КА 1–КА 4. Эта траектория светового луча проходит близко к Земле, и поэтому гравитационное поле Земли вдоль неё самое сильное. Разность измеренной и вычисленной величин расстояния КА 1–КА 4 даёт оценку эффекта задержки Шапиро. Однако постоянную задержку измерить трудно, она будет «перенормироваться» в обычную ньютоновскую задержку. Для измерения релятивистской задержки необходимо модулировать её по времени. Модуляция может быть достигнута за счёт небольшого изменения радиуса четвёртого спутника, поэтому в процессе эксперимента аппарат КА 4 периодически, один раз в 10–30 дней, меняет орбиту.

Каждый КА оборудован тремя наборами приёмо-передатчиков (трансиверов) лазерной интерферометрии, используемых для измерения взаимных расстояний с высокой точностью ( $\sim 0.1$  нм). Для достижения точности измерения параметра  $\gamma$  порядка  $10^{-9}$  ошибка измерения взаимных расстояний при накоплении сигнала в течение 1 с должна быть не более 0.1 нм (соответственно 10 нм за время накопления  $\sim 10^4$  с).

Для обеспечения указанной точности измерения межспутниковых расстояний все четыре КА должны находиться в одной плоскости и положения КА должны быть известны относительно центра масс Земли, что приводит к требованию контроля положения КА в пространстве с точностью на уровне  $\sim 10$  см.

В таблице 1 приводятся орбитальные параметры КА в эксперименте по измерению релятивистской задержки света в гравитационном поле Земли (определение ППН-параметра  $\gamma$ ).

**таблица 1** – Базовые параметры КА орбитального эксперимента по измерению релятивистской задержки света в гравитационном поле Земли

круговая околоземная орбита радиусом	$\sim 100000$ км
расстояние между спутниками (макс)	$\sim 200000$ км
наклонение орбиты	$\sim 98^\circ$
угловое положение аппаратов КА 1; КА 2; КА 3; КА 4	$0^\circ; 45^\circ; 315^\circ;$ $185^\circ \div 195^\circ$

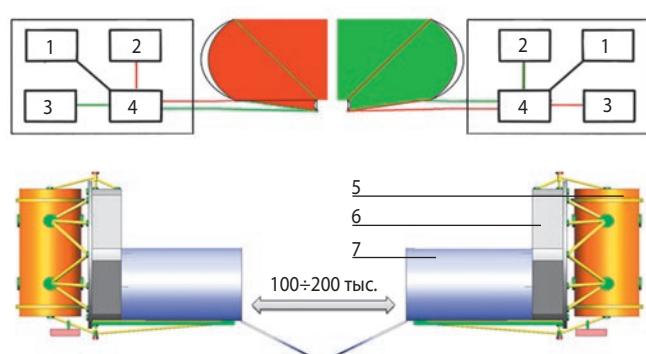
## 2. Инструментальная база для измерения межспутниковых расстояний

Основным инструментом измерения расстояния между спутниками является гетеродинная лазерная интерферометрическая система ретрансляционного типа. В ППН-эксперименте лазерная система работает в режиме дальномера, который измеряет кумулятивный набег фазы при многократном проходе светового луча между спутниками. Смещение (межспутниковое расстояние) определяется измерением

разности фаз между опорным и измеренным сигналом. В состав инструментальной базы, обеспечивающей требуемые измерения, входят:

- лазерный интерферометр (точность до 0.1 нм на расстоянии до  $10^5$  км за 1 с);
- высокоточный стандарт частоты (точность воспроизведения  $10^{-13}$ );
- система редукции (компенсации) негравитационных возмущений, основанная на высокоточных трёхосевых электростатических акселерометрах (не хуже  $10^{-9}$  м/с<sup>2</sup>).

Оптическая схема такой платформы представлена на рисунке 2.



**1** – водородный стандарт частоты; **2** – лазерная система; **3** – пробная масса акселерометра; **4** – оптико-электронный комплекс; **5** – акселерометр; **6** – оптическая платформа; **7** – телескоп.

**рисунок 2.** Схема оптических измерений

## 3. Компоновочная схема малого КА с измерительной апертурой для лазерной интерферометрии гравитационных эффектов

Каждый из четырёх КА кластера для проведения измерения релятивистской задержки света на околоземной круговой орбите несёт одинаковый комплект научной аппаратуры, который состоит из трёх телескопов апертурой 20 см, связанных оптически с пробными массами электростатических акселерометров. Зеркала телескопа имеют в своей основе облегчённую конструкцию с малым коэффициентом линейного теплового расширения. Оптическая система телескопа – классическая схема внеосевого телескопа Кассегрена. Расстояние между зеркалами 300 мм. Указанные пробные массы являются контрольными массами КА – носителями геодезического движения.

Пробные массы тщательно экранируются от внешних и внутренних возмущений, так что в конечном итоге они могут двигаться только под действием гравитационных сил (т.е. по геодезической траектории). Относительные микроперемещения пробных масс

## РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ: КОНЦЕПЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ И КОНФИГУРАЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ

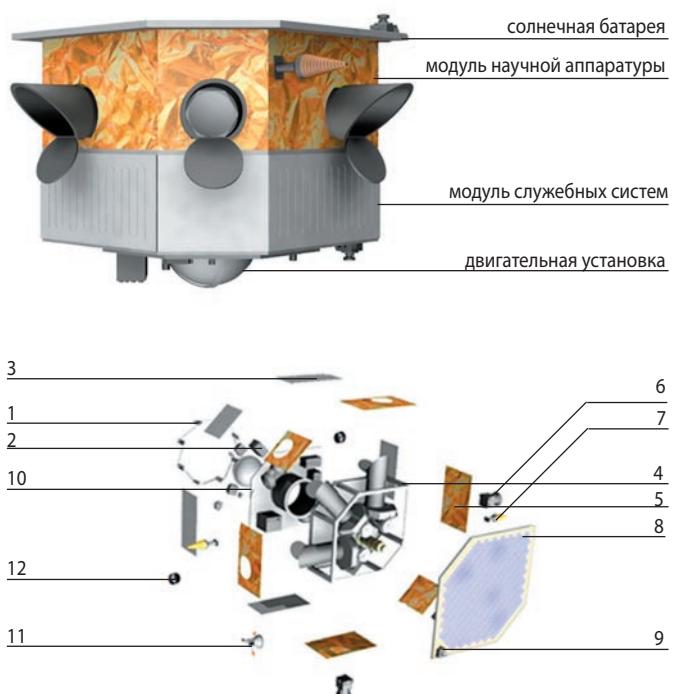
на разных КА будут регистрировать факт измерения задержки Шапиро.

Кроме того, в состав научной аппаратуры (НА) каждого КА входит водородный стандарт частоты, предназначенный для формирования высокостабильных по частоте спектрально чистых сигналов, а также для проведения частотных и временных измерений.

Контур из трёх телескопов одного КА наводится на каждый из трёх КА космического кластера в два этапа. Грубое наведение осуществляется с помощью ориентации КА, а контур точного наведения осуществляется прецизионными двигателями быстрого управления поворота телескопов с угловым разрешением  $\sim 0.2$  угл. с. Компоновка блока научной аппаратуры КА показана на рисунке 3, основной состав – на рисунке 4.

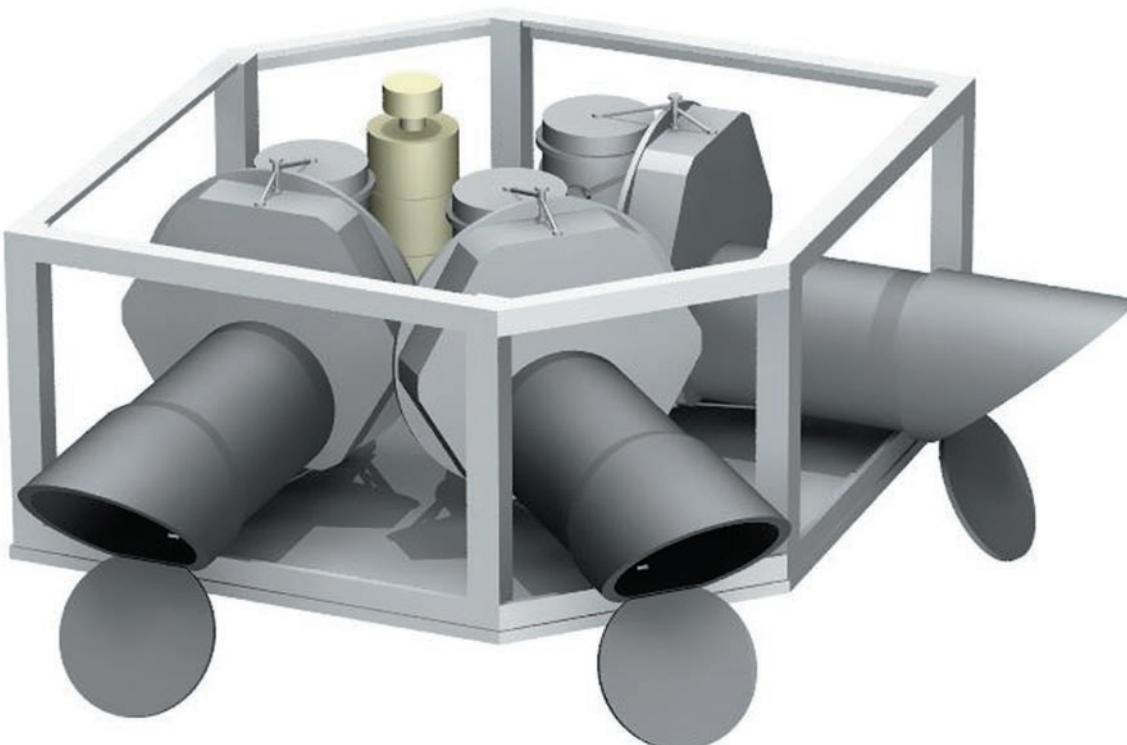
Космический аппарат будет представлять собой шестигранную призму. «Крыша» аппарата – тепловая сотовая панель (ТСП), которая выступает относительно граней призмы, создавая тень и защищая тем самым телескопы лазерного интерферометра от прямого попадания на них солнечного излучения. На верхней части ТСП располагаются фотопреобразователи солнечной батареи и солнечный датчик.

Ферма отделяемая является силовым элементом конструкции и необходима для крепления КА к установочной плате, расположенной на маршевой двигательной установке (ДУ). Ферма отделяемая представляет собой сварную конструкцию в виде восьмигранной призмы и выполнена по схеме «пиля».



- 1** – ферма отделяемая; **2** – двигательная установка;  
**3** – радиаторы системы обеспечения теплового режима;  
**4** – модуль научной аппаратуры;  
**5** – экранно-вакуумная теплоизоляция;  
**6** – звездный датчик; **7** – малонаправленная антенна;  
**8** – панель солнечных батарей;  
**9** – солнечный датчик; **10** – модуль служебных систем;  
**11** – радиомаяк; **12** – уголковый отражатель.

**рисунок 4.** Составные части малого КА



**рисунок 3.** Общий вид блока научной аппаратуры КА

Модуль служебных систем (СС) состоит из ТСП, на которую установлена углепластиковая силовая труба круглого сечения, присоединённая при помощи шпангоутов, и основных служебных систем, расположенных на ней (рисунок 5).

К нижней части нижней плиты ТСП модуля СС присоединена металлическая часть в виде восьмигранника для крепления КА с отделяемой фермой. Также на нижней части этой ТСП закреплена ДУ. На боковых гранях модуля СС располагаются радиаторы системы обеспечения теплового режима.

Модуль НА состоит из ТСП, которая установлена на силовую трубу, конструкции силовой рамы и листов, расположенных на гранях силовой рамы. На плате ТСП находится научная аппаратура, которая состоит из трёх телескопов и водородного стандарта частоты. К вертикальной стойке силовой рамы присоединены малонаправленные антенны и радиомаяк. Звёздные датчики устанавливаются на боковые грани модуля НА. Также на боковых гранях, обращённых во время полёта к Земле, располагаются уголковые отражатели. Модуль НА обтянут экранно-вакуумной теплоизоляцией.

Сверху на силовую раму модуля НА устанавливается панель солнечных батарей, которая представляет собой плиту ТСП, на которую установлены фотопреобразователи солнечной батареи и солнечный датчик. Ещё один солнечный датчик расположен на обратной стороне КА – на нижней части платы ТСП модуля СС. Площадь фотопреобразователей солнечной батареи составляет 1.5 м<sup>2</sup>.

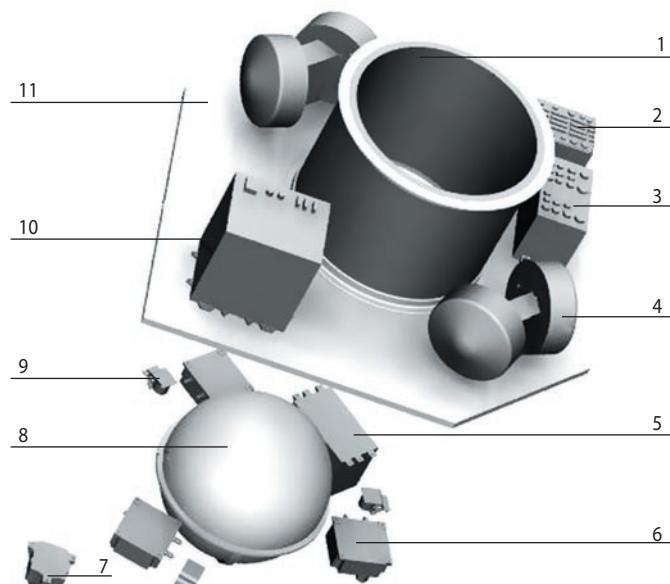
Модуль СС и ДУ (рисунок 5) состоит из силовой трубы, плиты ТСП, бортового радиокомплекса, комплекса автоматики и стабилизации, двух блоков двигателей маховиков, системы преобразования и управления, трёх модулей газораспределения, блока подачи ксенона, блока хранения ксенона, трёх стационарных плазменных двигателей, аккумуляторной батареи и цифровой вычислительной машины, расположенных на плате ТСП.

Для выведения четырёх МКА предполагается использовать в качестве головного обтекателя от РН, принадлежащего семейству трёхступенчатых ракетносителей среднего класса «Союз-2», модификация «Союз-2.1б».

Для установки КА на РН предполагается использовать адаптер, который представляет собой металлическую конструкцию с местами для крепления выводимых КА.

Состав основных элементов при горизонтальном размещении четырёх КА показан на рисунке 6.

Массовая сводка компонентов КА представлена в таблице 2.



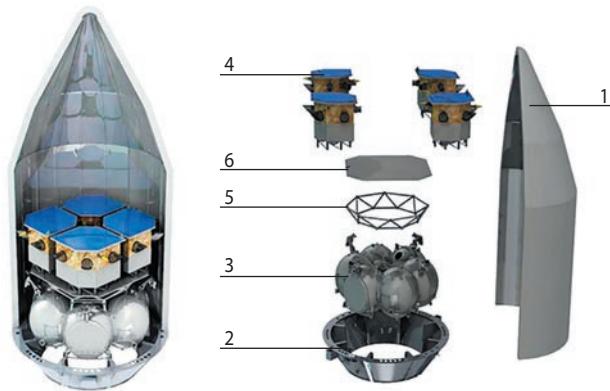
**1 – силовая труба; 2 – бортовой радиокомплекс;**  
**3 – комплекс автоматики и стабилизации;**  
**4 – блок двигателей маховиков; 5 – система преобразования и управления; 6 – модуль газораспределения;**  
**7 – блок подачи ксенона; 8 – блок хранения ксенона;**  
**9 – стационарный плазменный двигатель;**  
**10 – аккумуляторная батарея; 11 – плита ТСП.**

**рисунок 5.** Модуль служебных систем и двигательной установки МКА

**таблица 2 –** Массовая сводка компонентов КА

№	наименование	масса, кг	кол-во
1.	оптическая система	20	3
1.1	лазер + оптическая платформа	10	3
1.2	акселерометр	10	3
2.	электроника научного комплекса	15	3
3.	водородный стандарт частоты	25	1
4.	силовая конструкция	8	1
5.	двигательная установка	13	1
6.	бортовой комплекс управления	17	1
7.	система электроснабжения	20	1
8.	бортовая кабельная сеть	2	1
9.	средство обеспечения теплового режима	4	1
10.	антенно-фидерная система	1	1
11.	бортовой радиокомплекс	2	1
12.	телеметрическая система	1	1
13.	уголковый отражатель	0.5	2
14.	радиомаяк	1	1
Примечание – научная аппаратура 130 кг; служебные системы 70 кг; итого 200 кг			

# РЕЛЯТИВИСТИЧЕСКИЙ ГРАВИТАЦИОННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ НА ОКОЛОЗЕМНОЙ ОРБИТЕ: КОНЦЕПЦИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ И КОНФИГУРАЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ ГРУППИРОВКИ



**1** – головной обтекатель; **2** – адаптер; **3** – маршевая двигательная установка; **4** – космический аппарат (4 шт.); **5** – ферма отделяемая; **6** – установочная плита.

**рисунок 6.** Состав основных элементов при горизонтальном размещении четырёх КА

## 4. Технология выводения кластера КА для осуществления лазерного измерения гравитационных эффектов

Для выводения двух КА рассматривается однопусковая схема с использованием РН «Союз» и РБ «ФРЕГАТ» (Асюшкин В.А. и др., 2014). На рисунке 7 показана схема выводения первого КА на рабочую орбиту.

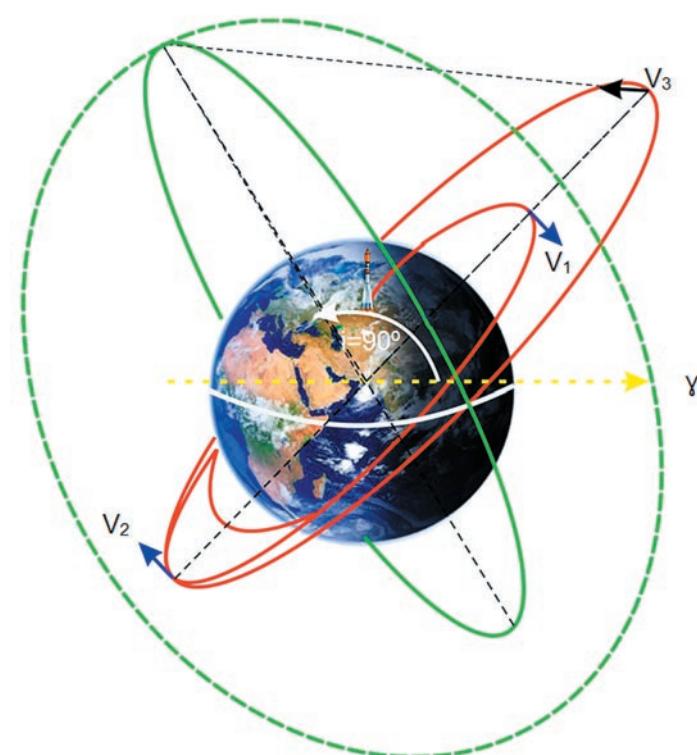
РН выводит головную часть (КА и РБ) на круговую опорную орбиту ИСЗ высотой 200 км. На первом витке опорной орбиты производится первое включение

РБ ( $V_1$ ), в результате чего головная часть переводится на первую переходную орбиту, у которой высота апогея равна 350 км, а аргумент перигея отличается от аргумента перигея рабочей орбиты первого типа на  $180^\circ$ . На этой орбите в районе апогея производится второе включение РБ ( $V_2$ ), и головная часть переводится на вторую переходную орбиту. Высота апогея этой орбиты равна высоте апогея рабочей орбиты первого типа. РБ с четырьмя КА продолжает формирование рабочей орбиты с другим наклонением. Для этого в районе нисходящего узла второй переходной орбиты производится третье включение ДУ РБ, и головная часть переводится на четвёртую переходную орбиту, которая расположена практически в плоскости Земли с наклонением  $\sim 98$  градусов. Затем все КА, выводимые на рабочую орбиту, отделяются от разгонного блока. Дальнейшие манёвры этого КА осуществляются с помощью собственной двигательной установки.

Масса полезного груза при выводении на заданные орбиты приведена в таблице 3.

**таблица 3** – Масса полезного груза при выводении на заданные орбиты

высота перигея, км	высота апогея, км	наклонение, град	масса полезного груза, кг	время выводения, ч
100000	100000	54.6	850	$\sim 17.04$
100000	100000	90		



**рисунок 7.** Схема выводения первого КА на рабочую орбиту

## 5. Схема определения высокоточных координат КА для проведения гравитационных измерений

После установления состояния КА и измерения по радиотелеметрии их координат производится наведение лазерных пучков друг на друга и последующее измерение.

На КА как дополнительная опция к лазерной системе установлены высокостабильные радиомаяки (*Косов А.С. и др., 2011*), которые в совокупности с наземным радиоинтерферометром позволят определять положение космических аппаратов КА 1÷КА 4 с точностью 1÷2 см. На КА также устанавливаются лазерные уголковые отражатели – подобные устанавливаются на ГЛОНАСС (*Шаргородский В.Д. и др., 2013*), которые позволяют определять расстояния до КА данного предложения с точностью до 1÷10 мм.

Схема измерения показана на рисунке 8.

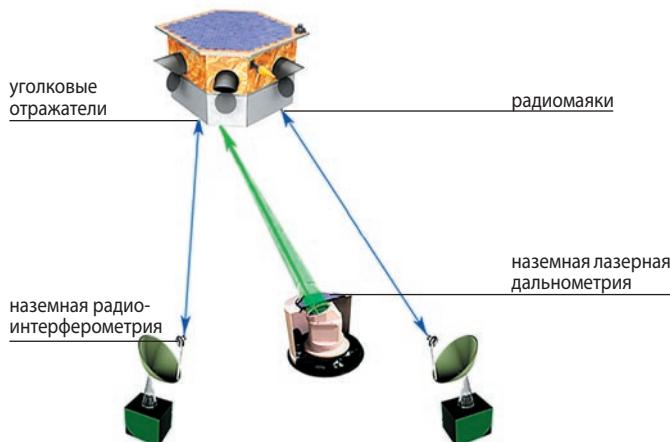


рисунок 8. Схема определения расстояний Земля – КА

## заключение

Для реализации космических проектов, имеющих целью измерения тонких гравитационных эффектов, лежащих в основе релятивистских теорий гравитации, необходимо создание кластерной спутниковой системы. Такие системы требуют высокоточного измерения межспутниковых характеристик.

Высокие требования, предъявляемые к точности определения параметров траекторий космических аппаратов и спутников, делают необходимым наличие на борту любого КА акселерометра, способного эффективно измерять все негравитационные ускорения, действующие на КА. Совместное применение современных средств многочастотного радиоследования и бортовой акселерометрии позволяет в идеале сделать КА виртуально нечувствительным к эффектам негравитационных возмущений, т.е. рассматривать КА виртуально свободным от сноса.

Развитие технологии измерения межспутниковых расстояний на уровне точности 0.1÷0.01 нм, основанной на лазерной интерферометрии транс-

пондерного типа (*LISA system and technology study report, 2000; Yeh H.C. et al., 2011*), а также технологии компенсации негравитационных ускорений (технология «спутника, свободного от сноса»), основанной на акселерометрах с чувствительностью порядка  $10^{-10}$  м/с<sup>2</sup>/Гц<sup>1/2</sup>– $10^{-15}$  м/с<sup>2</sup>/Гц<sup>1/2</sup> (*LISA system and technology study report, 2000; Hu M. et al., 2014*), позволяют планировать космические проекты в области фундаментальной гравитации.

Данная статья показывает возможность создания кластерной спутниковой системы для измерения релятивистской задержки света в гравитационном поле Земли на основе имеющихся МКА.

## список литературы

*Асишкин В.А., Викуленков В.П., Ишин С.В.* Итоги создания и начальных этапов эксплуатации межорбитальных космических буксиров типа «Фрегат» // Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2014. № 1. С. 3-9.

*Косов А.С., Готлиб В.М., Зотов В.А., Корогод В.В. и др.* ФОБОС-ГРУНТ. Проект космической экспедиции // Научное издание в двух томах. ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» Роскосмоса, Учреждение Российской академии наук Институт космических исследований РАН.М., 2011. Т. 2. С. 432-444.

*Шаргородский В.Д., Косенко В.Е., Садовников М.А., Чубыкин А.А и др.* Лазерный ГЛОНАСС // Вестник СибГАУ. 2013. № 6. С. 50-55.

*Abbott B.P. et al.* Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger // Phys. Rev. Lett. 2016. 061102. P. 116.

*Bertotti B., Iess L., Tortora P.* A test of general relativity using radio links with Cassini spacecraft // Nature. 2003. V. 425. P. 374-376.

*Hu M., Bai Y.Z., Zhou Z.B et al.* Resonant frequency detection and adjustment method for a capacitive transducer with differential transformer bridge // Rev. Sci. Instrum. 2014. № 5. P. 85.

*Laser Interferometer Space Antenna (LISA) Mission Concept* // LISA Project internal report, 2009. LISA-PRJ-RP-0001. P. 59.

*LISA: Probing the Universe with Gravitational Waves* // LISA Mission Science Office. 2007. LISA-LIST-RP-436. V. 1.0. P. 69.

*LISA Spacecraft Description* // LISA Project internal report. 2009. LISA-SC-DD-0001. P. 106.

*LISA system and technology study report* // ESA-SCI. 2000. P. 11.

*Luo J., Milyukov V., Sazhin M. et al.* TianQin: a spaceborne gravitational wave detector // Class. Quantum Grav. 2016. P. 33.

*Yeh H.C., Yan Q.Z., Liang Y.R. et al.* Intersatellite laser ranging with homodyne optical phase locking for Space Advanced Gravity Measurements mission // Rev. Sci. Instrum. 2011. № 1. P. 82.

URL: <http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/> (дата обращения: 20.01.2016).

*Will. C.M.* Theory and Experiment in Gravitational Physics // Cambridge University Press. 1993. P. 396.

Статья поступила в редакцию 22.03.2016 г.

# ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ОРБИТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ



М.Ю. Лаптев<sup>1</sup>,  
*maxlap@mail.ru;*  
M.Yu. Laptev



Е.К. Ли<sup>1,2</sup>,  
аспирант,  
*elen.k.lee@student.bmstu.ru;*  
E.K. Li

# SPACECRAFT ATTITUDE ERRORS ESTIMATION BY FLIGHT-TEST RESULTS IN DIFFERENT FLIGHT PHASES



Р.В. Нетребенко<sup>1</sup>,  
*roma431@laspace.ru;*  
R.V. Netrebenko



А.Н. Чулин<sup>1,2</sup>,  
*chulin@laspace.ru;*  
A.N. Chulin

Статья содержит результаты лётных испытаний космического аппарата «ВЕРНОВ» («МКА-ФКИ (ПН2)») в части оценки погрешностей ориентации и стабилизации на рабочих участках полёта. В качестве исполнительных органов для поддержания прецизионной стабилизации используются двигатели-маховики.

Оценка погрешностей выполнена без проведения и в процессе проведения разгрузки двигателей-маховиков с использованием магнитных исполнительных органов для различных участков орбиты.

*Ключевые слова:*

космический аппарат;  
погрешность ориентации и стабилизации;  
анализ результатов лётных испытаний.

*The article presents the flight-test results of «VERNOV» satellite («MKA-FKI (PN2)») in terms of assessment of attitude errors during operational flight phase. To maintain a precise attitude control reaction wheels are used as actuators.*

*The attitude errors analysis is carried out for different flight phases without reaction wheels momentum cancelling and with momentum cancelling using magnetorquers.*

*Key words:*  
spacecraft;  
attitude error;  
flight-test results interpretation.

<sup>1</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

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

<sup>2</sup> МГТУ имени Н.Э. Баумана, Россия, г. Москва.  
Bauman Moscow State Technical University, Russia, Moscow.

## введение

Космический аппарат «ВЕРНОВ» (до 3 декабря 2014 года «МКА-ФКИ (ПН2)») – малоразмерный космический аппарат для проведения космических экспериментов с помощью комплекса научной аппаратуры (КНА) «РЭЛЕК».

Назначением космического аппарата «ВЕРНОВ» (далее КА) является проведение экспериментов в космическом пространстве по изучению высыпаний релятивистских электронов из радиационных поясов, их воздействия на атмосферу и ионосферу Земли; исследование отклика атмосферы на высыпания релятивистских электронов, включая наблюдения быстрых транзиентных явлений в верхней атмосфере (*Panasyuk M.I. et al., 2016; Мягкова И.Н. и др., 2016*).

Запуск КА произведён ракетой-носителем «Союз-2.1б» с разгонным блоком (РБ) «ФРЕГАТ» в качестве попутной полезной нагрузки. Рабочей орбитой КА является солнечно-синхронная орбита со следующими начальными параметрами (*Гордиенко Е.С. и др., 2016*):

- высота перигея и апогея соответственно 640 км и 830 км;
- наклонение 98,4°;
- долгота восходящего узла 135°.

В данной работе выполнена оценка погрешности ориентации и стабилизации КА в режимах инерциальной ориентации по телеметрической информации, полученной при лётных испытаниях изделия.

## 1. Характеристика режимов ориентации

При проектировании системы управления ориентацией и стабилизации использовались общие принципы построения таких систем с учётом конкретных функциональных особенностей КА (*Бортовые системы управления..., 2010; Микрин Е.А., 2014*).

В процессе функционирования КА находится в одном из следующих режимов ориентации:

- режим постоянной солнечной ориентации (ПСО);
- режим дежурной инерциальной ориентации (ИНО-ДО);
- режим рабочей инерциальной ориентации (ИНО-РУ);
- режим стабилизации при коррекции орбиты (СКР).

Режим ПСО предназначен для наведения и поддержания одноосной ориентации КА на Солнце.

Режим ИНО-ДО используется на дежурных участках полёта и задаётся следующим образом: ось «+Y» связанной системы координат (ССК) направлена под минимально возможным углом к местной вертикали

в сторону зенита, ось «-X» – на Солнце, ось «+Z» дополняет систему до правой. Допустимая погрешность ориентации КА относительно заданной ориентации ( $3\sigma$ ) не превышает  $1^\circ$  по каждой оси ССК.

Режим ИНО-РУ используется на участках работы КНА и задаётся следующим образом: ось «+Y» направлена по местной вертикали в зенит, ось «-X» – по нормали к плоскости орбиты в сторону Солнца, ось «+Z» дополняет систему до правой. Допустимая погрешность ориентации КА относительно заданной ориентации ( $3\sigma$ ) не превышает  $0,5^\circ$  по каждой оси ССК.

Режим СКР используется на участках коррекции орбиты. Программная ориентация и угловая скорость КА в данном режиме задаются с Земли в виде кватерниона ориентации ССК относительно второй экваториальной системы координат (ЭСК-2) и коэффициентов интерполяционного полинома вектора угловой скорости.

Алгоритмы управления ориентацией реализованы в виде программ в бортовой вычислительной системе (*Чулин А.Н., 2015*).

Для реализации режимов ориентации в качестве измерительных приборов используются:

- дублированный блок измерителей угловой скорости разработки ООО НПП «Антарес»;
- дублированный трёхосный магнитометр разработки ОАО РПКБ;
- дублированный оптический солнечный датчик разработки ИКИ РАН (только в режиме ПСО);
- звёздные датчики (3Д) разработки ИКИ РАН и ЗАО НПО «Лептон».

В качестве исполнительных органов используются:

- двигатели-маховики (ДМ) разработки ОАО НПЦ «Полюс»;
- магнитные исполнительные органы (МИО) разработки ПО «Полёт» – филиала ФГУП «ГКНПЦ имени М.В. Хруничева». МИО используются для первоначального успокоения КА после отделения от РБ, для сброса накопленного кинетического момента (разгрузки) ДМ, а также в качестве резервных исполнительных органов управления ориентацией при отказе двух или более ДМ.

## 2. Методика оценки погрешности ориентации и стабилизации при лётных испытаниях

Оценка погрешности ориентации и стабилизации КА выполняется на следующих временных интервалах оценки:

- на участках прецизионной стабилизации (ПС) режимов инерциальной ориентации при отсутствии разгрузки ДМ;

# ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ОРБИТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

- на участках ПС режимов инерциальной ориентации при наличии разгрузки ДМ на различных участках орбиты (экваториальные и приполярные области).

Исходными данными для оценки являются следующие телеметрические параметры, получаемые с частотой 10 Гц:

- вектор угловой скорости  $\omega = [\omega_X \omega_Y \omega_Z]^T$  в проекциях на оси ССК;
- вектор программной угловой скорости  $\omega_{\text{пр}} = [\omega_{\text{пр}X} \omega_{\text{пр}Y} \omega_{\text{пр}Z}]^T$  в проекциях на оси ССК;
- кватернион ориентации ССК относительно ЭСК-2  $\Lambda = [\lambda_0 \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3]^T$ ;
- кватернион программной ориентации ССК относительно ЭСК-2  $\Lambda_{\text{пр}} = [\lambda_{\text{пр}0} \lambda_{\text{пр}1} \lambda_{\text{пр}2} \lambda_{\text{пр}3}]^T$ .

Оценка выполняется по следующей методике:

1. Для каждого значения номера такта рассчитываются значения рассогласования угловой скорости  $\Delta\omega = [\Delta\omega_X \Delta\omega_Y \Delta\omega_Z]^T$  по осям ССК:

$$\Delta\omega_i(NT) = \omega_i(NT) - \omega_{\text{пр}i}(NT), \forall NT: NT_{\min} \leq NT \leq NT_{\max},$$

где  $i=X, Y, Z$  – оси ССК;

$\Delta\omega_i$  – рассогласование угловой скорости по  $i$ -й оси ССК;

$NT$  – порядковый номер такта в выборке;

$NT_{\min}$ ,  $NT_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значение номера в выборке.

2. Определяются максимальные значения рассогласования угловой скорости по всем осям ССК в выборке:

$$\Delta\omega_{i\max}(NT) = \max_{NT=NT_{\min}}^{NT=NT_{\max}} \Delta\omega_i(NT),$$

$$\Delta\omega_{\max} = \max\{\Delta\omega_{i\max}\},$$

где  $\Delta\omega_{i\max}$  – максимальное значение рассогласования угловой скорости по  $i$ -й оси;

$\Delta\omega_{\max}$  – максимальное значение рассогласования угловой скорости по всем осям ССК.

Полученное значение  $\Delta\omega_{\max}$  принимается в качестве оценки предельной погрешности стабилизации.

3. Для каждого значения номера такта рассчитываются углы  $\gamma_{st} = [\gamma_X, \gamma_Y, \gamma_Z]^T$  рассогласования программной и текущей ориентации по осям ССК по следующим формулам (Бранец В.Н., Шмыглевский И.П., 1973):

$$\gamma_X(NT) = 2 \cdot \Delta\lambda_0(NT) \cdot \Delta\lambda_1(NT),$$

$$\gamma_Y(NT) = 2 \cdot \Delta\lambda_0(NT) \cdot \Delta\lambda_2(NT),$$

$$\gamma_Z(NT) = 2 \cdot \Delta\lambda_0(NT) \cdot \Delta\lambda_3(NT),$$

где  $\gamma_i$  – угол рассогласования по  $i$ -й оси ССК;

$\Delta\lambda_0, \Delta\lambda_1, \Delta\lambda_2, \Delta\lambda_3$  – элементы кватерниона рассогласования между программной и фактической ориентацией ССК:

$$\Delta\Lambda(NT) = \Lambda(NT) \circ \tilde{\Lambda}_{\text{пр}}(NT),$$

$\circ$  – символ кватернионного произведения;

$\tilde{\Lambda}_{\text{пр}}(NT)$  – кватернион, сопряжённый  $\Lambda_{\text{пр}}(NT)$ .

4. Для каждого значения номера такта рассчитываются фильтрованные значения углов рассогласова-

ния  $\gamma_{X\phi}, \gamma_{Y\phi}, \gamma_{Z\phi}$  методом скользящего среднего на интервале осреднения 1 секунда по следующим формулам:

$$\gamma_{i\phi}(NT) = \frac{1}{Q} \cdot \sum_{NT=NT_{\min}}^{NT=NT_{\max}-Q+1} \gamma_i(NT),$$

где  $\gamma_{i\phi}(NT)$  – фильтрованное значение угла рассогласования по  $i$ -й оси ССК;

$Q=10$  – число тактов за интервал осреднения.

5. Определяются максимальные значения фильтрованных углов рассогласования по каждой оси ССК на скользящем интервале в выборке:

$$\gamma_{i\max}(NT) = \max_{NT=NT_{\min}}^{NT=NT_{\max}-Q+1} \gamma_i(NT),$$

$$\gamma_{\max} = \max\{\gamma_{i\max}\},$$

где  $\gamma_{i\max}$  – максимальное значение угла рассогласования по  $i$ -й оси;

$\gamma_{\max}$  – максимальное значение угла рассогласования по всем осям ССК.

Полученное значение  $\gamma_{\max}$  принимается в качестве оценки предельной погрешности ориентации без учёта погрешности измерения ориентации.

6. Оценка погрешности ориентации с учётом погрешности измерения ориентации ССК ( $\gamma_{0\max}$ ) вычисляется по формуле

$$\gamma_{0\max} = \gamma_{\max} + \gamma_{\text{изм}},$$

где  $\gamma_{\text{изм}}=70''$  – предельная погрешность измерения ориентации ССК в соответствии с техническим заданием на ЗД.

## 3. Результаты оценки

### 3.1. Результаты оценки погрешности ориентации и стабилизации на рабочем участке без проведения разгрузки ДМ

Оценка погрешности ориентации и стабилизации проводилась для следующих участков ПС режима ИНО:

1. 05:00–05:10 (12.08.2014), режим ИНО-РУ;

2. 08:39–08:52 (14.07.2014), режим ИНО-ДО.

Результаты оценки погрешности ориентации и стабилизации (без учёта погрешности измерения ориентации) на рассмотренных участках бортовой шкалы времени (БШВ) приведены на рисунках 1–2 и в таблице 1.

Таким образом, погрешность ориентации зависит от модификации режима и на участках между проведением разгрузки ДМ не превышает  $0,025^\circ$  в режиме ИНО-РУ и  $0,17^\circ$  в режиме ИНО-ДО.

**таблица 1** – Оценка погрешности ориентации и стабилизации без проведения разгрузки ДМ

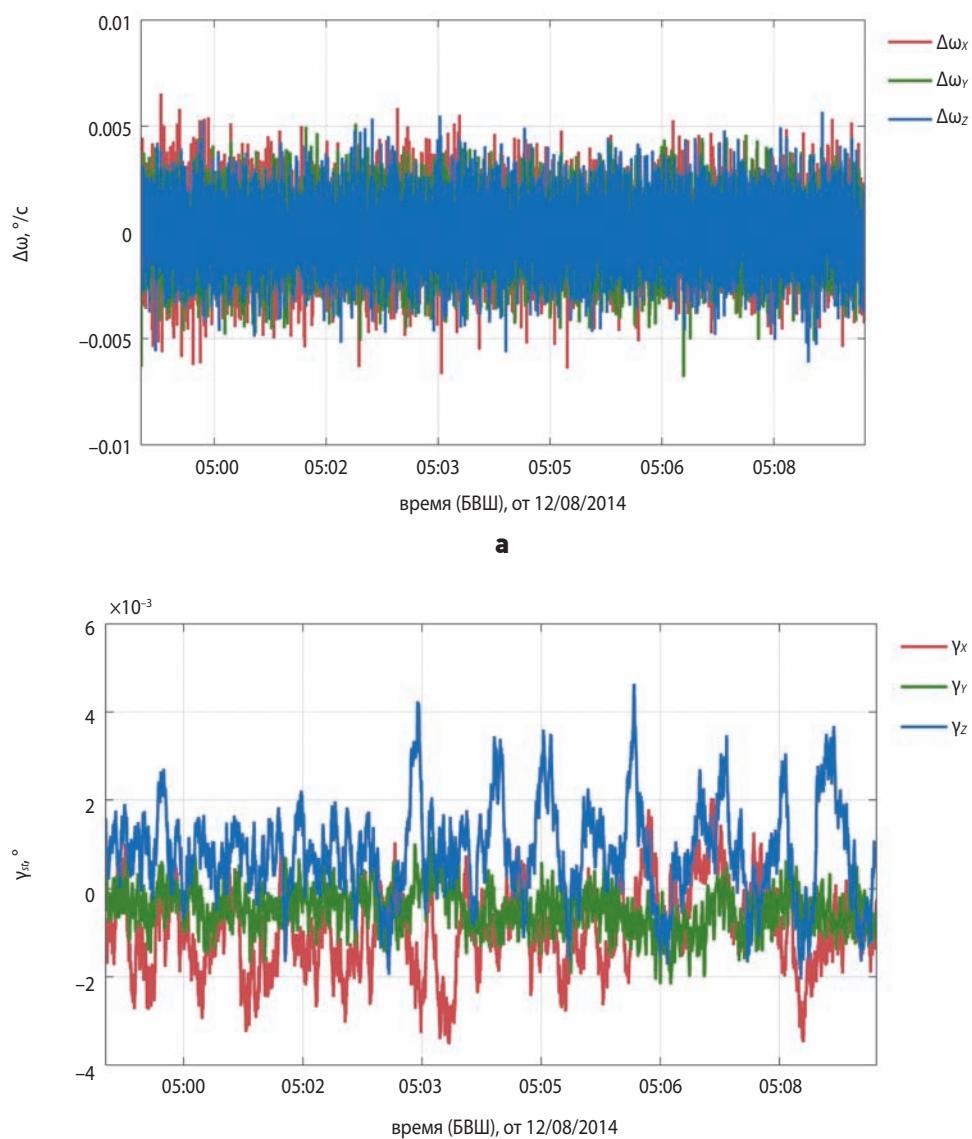
характеристика	режим ИНО-РУ	режим ИНО-ДО
погрешность стабилизации (по каждой оси ССК)	$\leq 0,005^\circ/\text{с}$	$\leq 0,005^\circ/\text{с}$
погрешность ориентации без учёта погрешности измерения ориентации ССК	$\leq 0,005^\circ (0,3')$	$\leq 0,15^\circ (9')$
погрешность ориентации с учётом погрешности измерения ориентации ССК	$\leq 0,025^\circ (1,5')$	$\leq 0,17^\circ (10,2')$

### 3.2. Результаты оценки погрешности ориентации и стабилизации на рабочем участке при проведении разгрузки ДМ

Оценка погрешности ориентации и стабилизации проводилась для следующих участков ПС режима ИНО при проведении разгрузки ДМ:

1. 12:00–12:40 (19.07.2014), режим ИНО-РУ, участок орбиты в районе экватора;
2. 08:00–08:05 (15.07.2014), режим ИНО-РУ, участок орбиты в приполярном районе;
3. 05:35–06:30 (19.07.2014), режим ИНО-ДО, участок орбиты в районе экватора;
4. 08:51–09:00 (14.07.2014), режим ИНО-РУ, участок орбиты в приполярном районе.

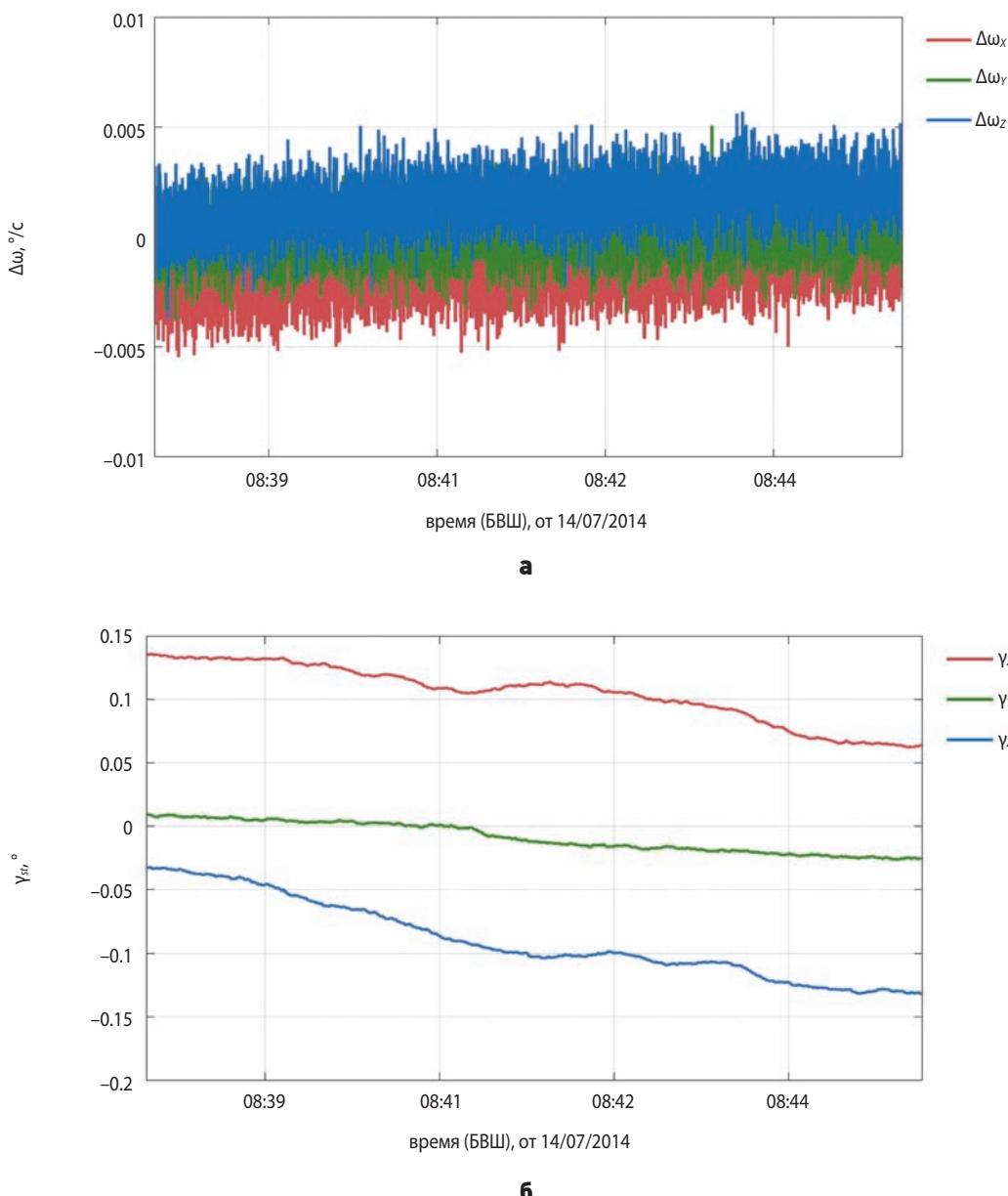
Результаты оценки погрешности ориентации и стабилизации на рассмотренных участках приведены на рисунках 3–6 и в таблице 2.



**а** – рассогласование угловой скорости в проекциях на оси ССК;  
**б** – углы рассогласования относительно осей ССК.

**рисунок 1.** Оценка погрешности ориентации и стабилизации на участке ПС режима ИНО-РУ

# ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ОРБИТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ



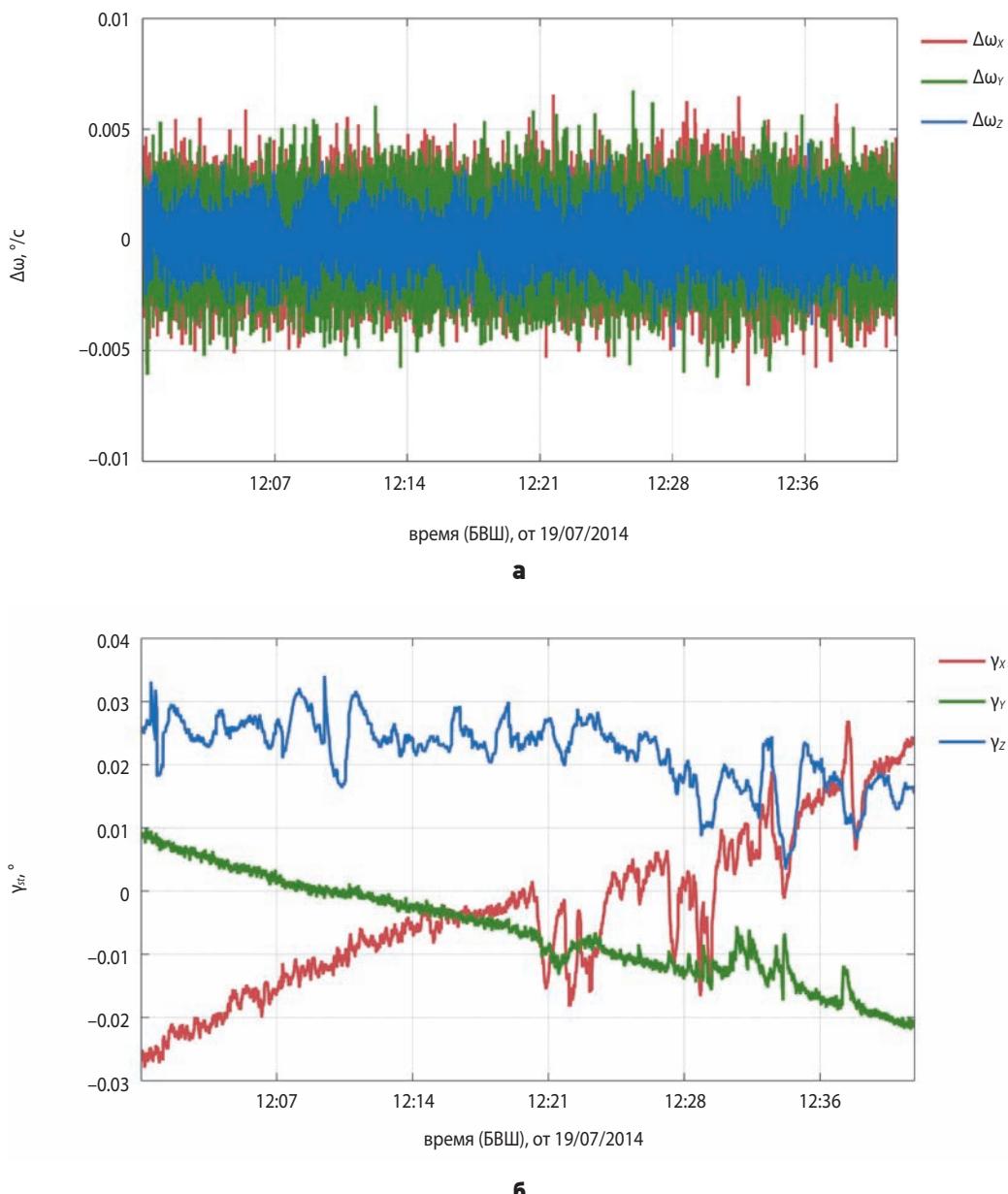
**а** – рассогласование угловой скорости в проекциях на оси ССК;

**б** – углы рассогласования относительно осей ССК.

**рисунок 2.** Оценка погрешности ориентации и стабилизации на участке ПС режима ИНО-ДО

**таблица 2** – Оценка погрешности ориентации и стабилизации при проведении разгрузки ДМ

характеристика	участок орбиты в районе экватора	участок орбиты в приполярном районе
длительность разгрузки	≤2 мин	≤15 мин
погрешность стабилизации (по каждой оси ССК)	≤0,005°/с в режиме ИНО-РУ; ≤0,008°/с в режиме ИНО-ДО	≤0,015°/с в режиме ИНО-РУ; ≤0,030°/с в режиме ИНО-ДО
погрешность ориентации без учёта погрешности измерения ориентации ССК	≤0,05° (3') в режиме ИНО-РУ; ≤0,20° (12') в режиме ИНО-ДО	≤0,10° (6') в режиме ИНО-РУ; ≤0,27° (16,2') в режиме ИНО-ДО
погрешность ориентации с учётом погрешности измерения ориентации ССК	≤0,07° (4,2') в режиме ИНО-РУ; ≤0,22° (13,2') в режиме ИНО-ДО	≤0,12° (7,2') в режиме ИНО-РУ; ≤0,29° (17,4') в режиме ИНО-ДО



**а** – рассогласование угловой скорости в проекциях на оси ССК;

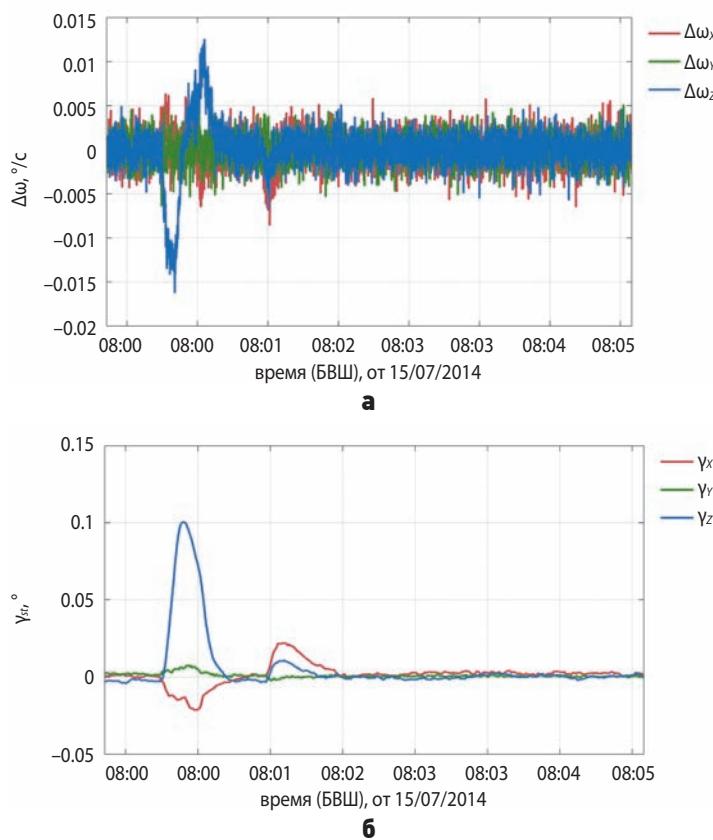
**б** – углы рассогласования относительно осей ССК.

**рисунок 3.** Проведение разгрузки ДМ на участке орбиты в районе экватора (участок ПС режима ИНО-РУ)

**таблица 3** – Анализ выполнения требований режимов ориентации

№ проверки	проверяемая характеристика	числовое значение проверяемой характеристики		заключение
		по требованиям режима	фактически	
1	погрешность ориентации в режиме ИНО-ДО	1,0°	не более 0,29°	выполняется
2	погрешность ориентации в режиме ИНО-РУ	0,5°	не более 0,12°	выполняется

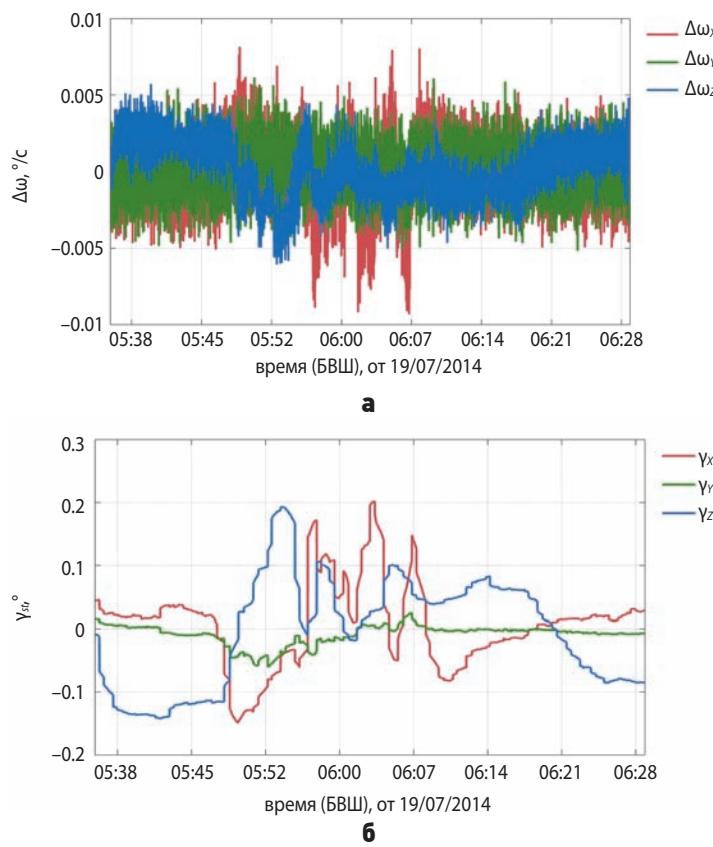
# ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ОРИЕНТАЦИИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА НА РАЗЛИЧНЫХ УЧАСТКАХ ОРБИТЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЁТНЫХ ИСПЫТАНИЙ



**а** – рассогласование угловой скорости в проекциях на оси ССК;

**б** – углы рассогласования относительно осей ССК.

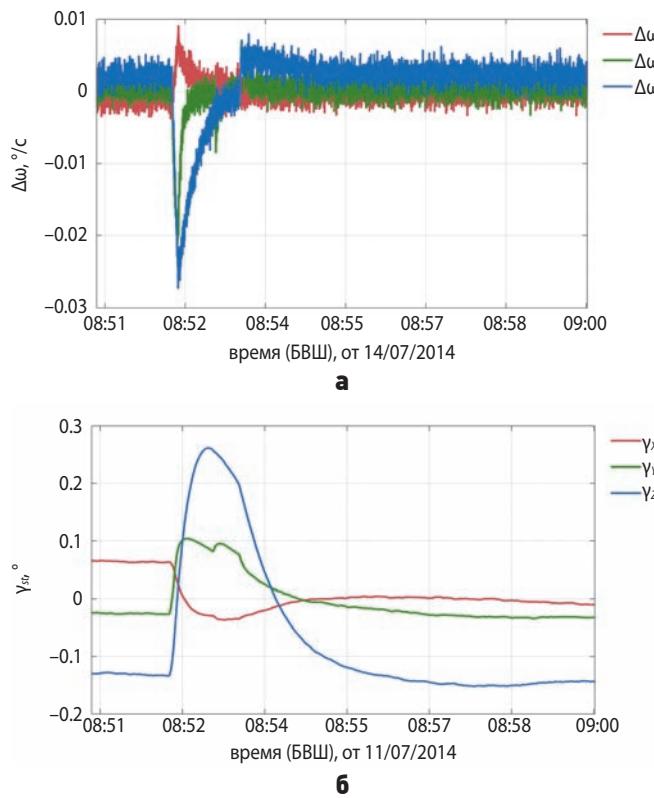
**рисунок 4.** Проведение разгрузки ДМ на участке орбиты в приполярном районе (участок ПС режима ИНО-РУ)



**а** – рассогласование угловой скорости в проекциях на оси ССК;

**б** – углы рассогласования относительно осей ССК.

**рисунок 5.** Проведение разгрузки ДМ на участке орбиты в районе экватора (участок ПС режима ИНО-ДО)



**а** – рассогласование угловой скорости в проекциях на оси ССК; **б** – углы рассогласования относительно осей ССК.  
**рисунок 6.** Проведение разгрузки ДМ на участке орбиты в приполярном районе (участок ПС режима ИНО-ДО)

Более высокая погрешность ориентации и стабилизации при проведении разгрузки ДМ в приполярном районе объясняется тем, что величина вектора магнитной индукции, а следовательно, и величина управляющих моментов МИО превышает аналогичные величины в районе экватора примерно в два раза, вследствие чего разгрузка ДМ происходит значительно быстрее.

Таким образом, погрешность ориентации на участке ПС существенно зависит от участка орбиты, является максимальной в приполярном районе и не превышает  $0,12^\circ$  в режиме ИНО-РУ и  $0,29^\circ$  в режиме ИНО-ДО.

## заключение

По итогам анализа телеметрической информации в процессе лётных испытаний КА получены следующие оценки погрешности ориентации на участке ПС по каждой оси ССК:

1. В режиме дежурной инерциальной ориентации: не более  $0,29^\circ$ ;
2. В режиме рабочей инерциальной ориентации: не более  $0,12^\circ$ .

Полученные результаты показали, что точность ориентации КА удовлетворяет заданным требованиям (таблица 3).

## список литературы

Бортовые системы управления космическими аппаратами: учебн. пособие / Под ред. А.С. Сырова. М.: Изд-во МАИ-ПРИНТ, 2010. 304 с.

Бранец В.Н., Шмыглевский И.П. Применение кватернионов в задачах ориентации твёрдого тела. М.: Наука, 1973. 320 с.

Гордиенко Е.С., Ильин И.С., Мжельский П.В., Михайлов Е.А. Баллистико-навигационное обеспечение полёта малых космических аппаратов «ЗОНД-ПП» и «РЭЛЕК» // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2016. № 2. С. 31-43.

Микрин Е.А. Бортовые комплексы управления космических аппаратов: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 245 с.

Мягкова И.Н., Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Вариации потоков электронов на высотах 600–800 км во второй половине 2014 года – предварительные результаты эксперимента с аппаратурой «РЭЛЕК» на борту ИСЗ «ВЕРНОВ» // Космические исследования. 2016. Т. 54, № 1. С. 73-81.

Чулгин А.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615170 РФ. Программа работы режима ИНО МКА-ФКИ / Заявка: № 2015612003; 18.03.2015; Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ: 13.05.2015.

Panasyuk M.I., Svertilov S.I., Bogomolov V.V., Garipov G.K. et al. Relec mission: Relativistic electron precipitation and TLE study on-board small spacecraft // Advances in Space Research. 2016. V. 57, № 3. P. 835-849.

Статья поступила в редакцию 24.03.2016 г.

# РАЗРАБОТКА ВОЗДУШНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

А.И. Ерофеев<sup>1</sup>,  
доктор технических наук,  
*alex.ivan.erofeev@gmail.com;*  
А.И. Erofeev

М.О. Суворов<sup>2</sup>,  
аспирант, *k208@mai.ru;*  
М.О. Suvorov

А.П. Никифоров<sup>1</sup>,  
доцент, кандидат  
технических наук, *kadry@tsagi.ru;*  
A.P. Nikiforov

С.А. Сырин<sup>2</sup>,  
*riame@sokol.ru;*  
S.A. Syrin

# DEVELOPMENT OF AIR-ELECTROROCKET RAMJET FOR COMPENSATING OF LOW-ORBIT SPACECRAFTS AERODYNAMIC DRAG

Г.А. Попов<sup>2</sup>,  
академик РАН, доктор технических  
наук, *riame@sokol.ru;*  
G.A. Popov

С.А. Хартов<sup>2</sup>,  
доктор технических наук, *k208@mai.ru;*  
S.A. Khartov

Рассматриваются проблемные вопросы разработки воздушного прямоточного электрореактивного двигателя для корректирующей двигательной установки низколетящего космического аппарата. Представлены данные выбора высот орбит для целесообразного применения воздушного прямоточного электрореактивного двигателя и скоростей истечения его рабочего тела. Приводятся оценки вероятного повышения концентраций газов в области ионизации воздушного прямоточного электрореактивного двигателя и результаты испытаний прототипа двигателя.

**Ключевые слова:**  
прямоточный электрореактивный двигатель;  
входное устройство;  
модельные испытания.

## введение

Снижение высоты орбит перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) до 180–280 км позволяет значительно повысить эффективность работы их бортовой регистрирующей аппаратуры. Однако такое снижение с учётом орбитальной скорости аппарата и концентрации газов остаточной атмосферы на указанных высотах на уровне  $10^{15}–10^{17}$  1/м<sup>3</sup> (Fujita K., 2004) создаёт достаточно большое аэродинамическое сопротивление, приводящее к снижению высоты орбиты КА. Срок

*Problems of developing the air electrorocket ramjet for correcting propulsion system of low-orbit spacecraft are examined in the article. Information for choosing the orbits of air electrorocket ramjet reasonable application and of propellant exhaust velocity is presented.*

*The article also presents the estimation of probable increase of gas concentration in the area of air ramjet ionization. The test results of air ramjet prototype are also given.*

**Key words:**  
air electrorocket ramjet;  
inlet;  
model test.

активного существования (САС) КА на низких орбитах колеблется от нескольких дней до нескольких месяцев (Fujita K., 2004). Для увеличения САС данное снижение должно компенсироваться приращением скорости КА с использованием корректирующей двигательной установки (КДУ). Для существующих КДУ с жидкостными ракетными двигателями даже увеличение САС низкоорбитального КА до 1 года приведет к практически полному сокращению массы целевой аппаратуры за счёт увеличения запасов топлива.

<sup>1</sup> ФГУП «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Россия, Московская область, г. Жуковский.

The Central Aerohydrodynamic Institute named after N.E. Zhukovsky, Russia, Moscow Region, Zhukovsky.

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики ФГБОУ ВПО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (НИИ ПМЭ МАИ), Россия, г. Москва.

Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of the Moscow Aviation Institute (RIAME MAI), Russia, Moscow.

Вместе с тем известен опыт длительной работы (более четырёх лет) КА *GOCE* Европейского космического агентства на орбитах 250–280 км (*GOCE*, 2016). Высота орбиты данного КА массой в 1 тонну поддерживалась и корректировалась КДУ с электроракетным двигателем (ЭРД) фирмы *QinetiQ*. Аппарат прекратил свое существование по завершении выработки полностью 40 кг рабочего тела (ксенона), запасённого на борту.

В настоящее время ЭРД широко используются в системах коррекции орбит ряда КА (*Важсенин Н.А. и др.*, 2012). Опыт их эксплуатации свидетельствует о целесообразности использования ЭРД как одного из наиболее приемлемых компонентов корректирующих силовых установок разрабатываемых низкоорбитальных КА с повышенным САС (*Канопус-В*, 2016).

Однако эффективное применение традиционных моделей ЭРД для решения задач полета на более низких орbitах проблематично, поскольку для работы двигателя потребуется использование электрической энергии и, соответственно, увеличение поверхностей солнечных батарей, что, в свою очередь, приведет к повышению аэродинамического торможения и увеличению массы рабочего тела для его компенсации. Одним из путей преодоления этих ограничений является уменьшение запасов рабочего тела (РТ) на борту, в частности за счёт забора его из окружающей КА атмосферы, т.е. переходу к использованию воздушного прямоточного электрореактивного двигателя (*Канев С.В. и др.*, 2015).

Идея использования газов верхней атмосферы Земли в качестве рабочего тела ЭРД не нова (*Балаев Н.Ф. и др.*, 1971; *Nishiyama K.*, 2003), но остаётся без ответа вопрос: могут ли современные модели двигателей эффективно работать на таких газах? Это относится не только к возможности ионизации в двигателе смеси азота и кислорода, но и к работе ЭРД при более низких уровнях расхода массы и энергии; при этом время работы двигателя должно соответствовать требуемому ресурсу КА. Анализ условий окружающей среды на целевых орбитах низкоорбитальных КА показывает, что концентрация газов атмосферы здесь достаточна для использования их в качестве рабочего тела в ЭРД (*Fujita K.*, 2004).

Атмосфера Земли не имеет четкой границы, она постепенно переходит в безвоздушное пространство. При этом, чем ниже орбита КА, тем большую силу аэrodинамического сопротивления испытывает аппарат. Для орбит выше 400 км этот эффект невелик, и с точки зрения ресурса КА уменьшение высоты его орбиты может быть компенсировано с использованием традиционных ЭРД (*Антропов Н.Н. и др.*, 2013; *Брусов В.С. и др.*, 2015; *Канопус-В*, 2016). Однако для меньших высот требование по выбору двигателей для сохранения орбиты КА в течение предполагае-

мой продолжительности работы может быть очень существенным. Для орбит высотой около 200 км и ниже характерно значительно более высокое аэrodинамического сопротивление, что при отсутствии коррекции орбиты ограничивает ресурс КА (*Fujita K.*, 2004). Но даже при наличии двигателя значительная доля массы такого аппарата будет отведена РТ, необходимому для компенсации аэrodинамического сопротивления и поддержания параметров орбиты.

Возможность использования окружающей атмосферы в качестве потенциального топлива КДУ позволит реализовать следующие преимущества для низкоорбитального КА (*Важсенин Н.А. и др.*, 2012; *DiCara D. et al.*, 2007):

1. Для КА, существующих на орбитах с высотой от 160 до 250 км, РТ может быть заменено на атмосферные газы. С точки зрения ресурса КА, программа полёта может остаться той же, но, с учётом уменьшения массы ДУ, на аппарате может быть установлена коммерческая или научная полезная нагрузка большей массы.

2. Для орбит ниже 250 км частичная или полная подача атмосферных газов в ДУ может снизить требования к РТ до такого уровня, при котором возможно осуществление схемы полёта, невыполнимых сегодня. Может быть реализовано значительное увеличение ресурса КА.

3. Для КА с высотой орбиты от 250 до 400 км атмосферные газы могут быть частично добавлены к основному РТ, «растягивая» его потребление и увеличивая САС аппарата.

4. Для КА малого класса, для которых бортовое топливо является слишком серьёзным ограничением по массе, двигатели на атмосферном рабочем теле могут быть единственной основой их существования при длительном ресурсе.

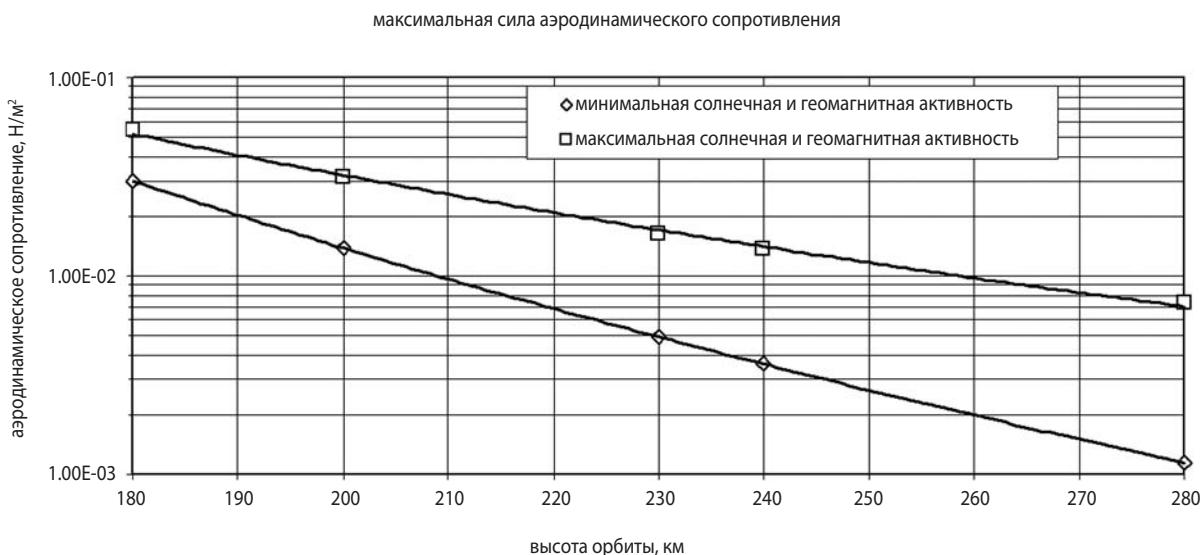
5. Для орбит ниже 180 км (очень низкие околоземные орбиты) применение ЭРД не целесообразно.

## 1. Оценка параметров ПЭРД

Возможность поддержания орбиты низкоорбитального КА с помощью воздушного ПЭРД была рассмотрена в работе (*Канев С.В. и др.*, 2015). Следует отметить, что для обеспечения гарантированного удержания КА на заданной высоте сила тяги двигателя должна быть не менее максимальной величины аэrodинамического сопротивления в максимуме солнечной и геомагнитной активности (рисунок 1).

Наиболее приемлемым решением для ПЭРД в качестве тягового узла (по совокупности параметров цена тяги, ресурс и подтверждение потенциальной работоспособности всех узлов двигателя) представляется высокочастотный ионный двигатель (*Канев С.В. и др.*, 2015). Помимо этого, в состав устройства

# РАЗРАБОТКА ВОЗДУШНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



**рисунок 1.** Границы изменения силы аэродинамического сопротивления на 1 м<sup>2</sup> эффективной площади КА при вариации солнечной и геомагнитной активности по данным (Канев С.В. и др., 2015)

должны входить «заборник» газов (входной канал) и камера термолизации. Принципиальная схема ПЭРД приведена на рисунке 2. Здесь и далее индексы бесконечности помечены параметры, характеризующие набегающий поток газа.

Оценим параметры ПЭРД в стационарном режиме. Будем считать, что двигатель, в который поступает поток газа с концентрацией  $n_\infty$  при скорости  $V_\infty$ , выбрасывает в виде ускоренных ионов с концентрацией  $n^*$  и скоростью  $V^*$ , создавая силу тяги. Предположим также, что эффективная ионизация в тяговом узле двигателя может быть достигнута только при концентрации газа, большей чем концентрация ускоряемых ионов –  $n_2 \geq n^*$ . Определим

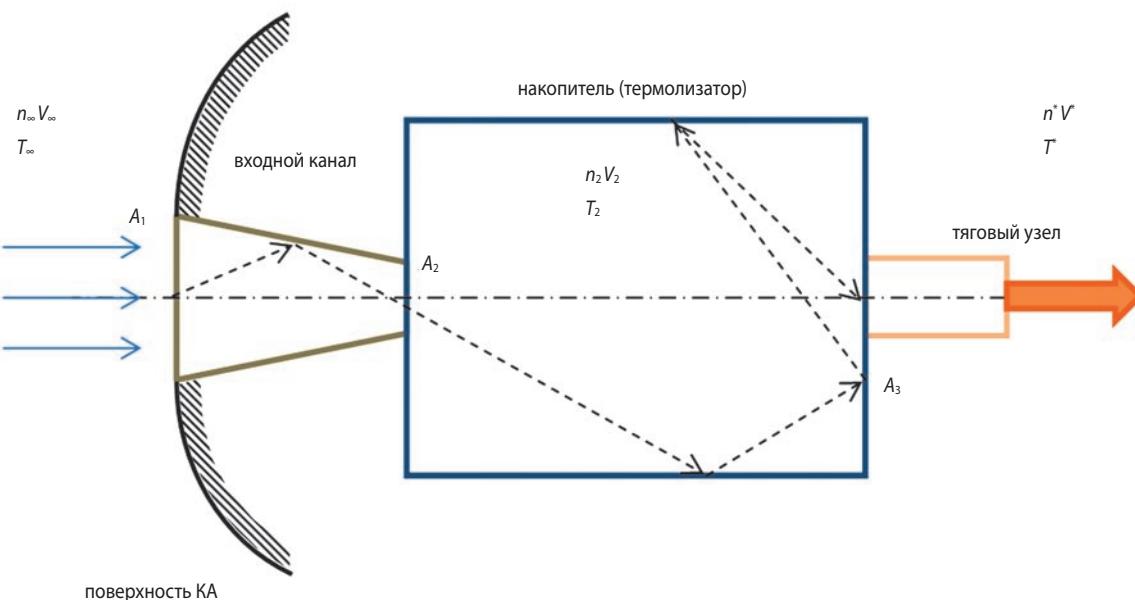
скорость потока ионов ПЭРД, необходимую для преодоления силы сопротивления, действующую на КА.

Сила сопротивления, действующей на КА, равна

$$F_x = \frac{\rho V_\infty^2}{2} C_{x,tot} A_m = J_\infty m_\infty V_\infty \frac{1}{2} C_{x,tot} \frac{A_m}{A_1},$$

$$J_\infty = n_\infty V_\infty A_1,$$

где  $\rho$  – плотность набегающего потока;  $A_m$  – площадь миделя КА;  $C_{x,tot}$  – полный коэффициент аэродинамического торможения;  $m_\infty$  – масса газа, влетающая во входной канал;  $A_1$  – площадь сечения входного канала («заборника» газа) ПЭРД. Величина  $J_\infty$  определяет полный поток частиц, влетающих в ПЭРД.



**рисунок 2.** Принципиальная схема ПЭРД (пунктиром показаны возможные траектории молекул)

Реактивная сила, действующая на КА при вылете ионов из двигателя со скоростью  $V^*$ , есть

$$F^* = j_{out} m^* V^* \eta + (1 - \eta) j_{out} m^* \langle V_{x3} \rangle, \quad (1)$$

где  $\eta$  – часть вылетевшего потока  $j_{out}$ , которая приобрела необходимую скорость  $V^*$  (коэффициент использования рабочего тела);  $m^*$  – масса частиц в этом высокоскоростном потоке. В (1) величина  $\langle V_{x3} \rangle$  определяет скорость истекающих из тягового узла частиц, не приобретших скорость  $V^*$ . Поскольку скорость  $\langle V_{x3} \rangle$  является тепловой и существенно меньше  $V^*$ , вторым слагаемым в формуле (1) можно пренебречь.

Определим минимальную скорость ускоренных ионов –  $V_{min}^*$  из условия, что сила тяги ПЭРД больше силы аэродинамического торможения КА –  $F_{min}^* = F_x$  или

$$j_{out} m^* V_{min}^* \eta = J_\infty m_\infty V_\infty \frac{1}{2} C_{x,tot} \frac{A_m}{A_l}.$$

Отсюда

$$V_{min}^* \eta = \frac{J_\infty}{j_{out}} \frac{m_\infty}{m^*} V_\infty \frac{1}{2} C_{x,tot} \frac{A_m}{A_l}.$$

Из условия, связывающего приведённые (относительные) значения концентрации частиц, «входящих» и «выходящих» из двигателя, вытекает, что для отношения  $J_\infty/j_{out}$  можно получить следующее выражение:

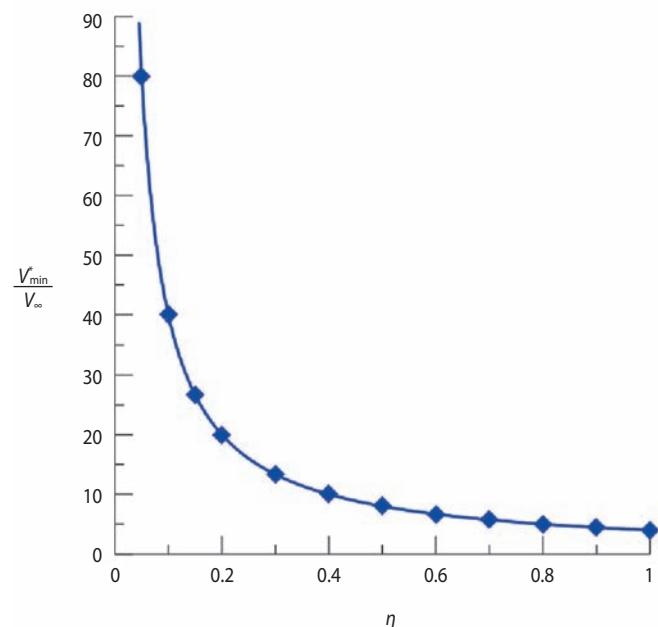
$$\frac{j_{out}}{J_\infty} = p_{1s} - \frac{n_2 V_2}{2\sqrt{\pi} J_\infty} p_{2d} A_2 = p_{1s} \left( 1 - \frac{n_2}{n_{2max}} \right),$$

где  $p_{1s}$  – вероятность пролёта («невозврата») молекул газа, влетевших во входное отверстие площадью  $A_1$ ;  $n_2$  – плотность газа в накопителе с учётом его отбора в тяговый узел;  $n_{2max}$  – плотность газа в накопителе без отбора газа в тяговый узел;  $p_{1d}$  – вероятность пролёта молекул газа в накопитель через сечение  $A_2$ . Полагая  $n_2 = n^*$ , получаем

$$V_{min}^* \eta = \frac{V_\infty}{p_{1s} (1 - n^*/n_{2max})} \frac{m_\infty}{m^*} \frac{1}{2} C_{x,tot} \frac{A_m}{A_l}. \quad (2)$$

С учётом условия (2) на рисунке 3 представлена оценка относительной минимальной потребной скорости ионов, необходимой для длительного существования КА, от коэффициента использования рабочего тела  $\eta$ .

Несмотря на то, что приведённые результаты можно рассматривать лишь как качественную оценку, из данного анализа следует, что в условиях объективно низкого коэффициента использования РТ из-за недостаточной концентрации газов на низких орбитах целесообразно остановиться на использовании в качестве тягового узла схем ЭРД с высоким удельным импульсом, что подтверждает обоснованность выбора схемы высокочастотного ионного двигателя с электростатическим механизмом ускорения в качестве базы для создания ПЭРД (Канев С.В. и др., 2015).



**рисунок 3.** Зависимость относительной минимальной потребной скорости ионов ПЭРД от коэффициента использования рабочего тела  $\eta$

## 2. Анализ работы элементов ПЭРД

Рассмотрим более подробно функции элементов ПЭРД (см. рисунок 2).

Входной канал («заборник» газа) предназначен для приёма набегающего потока частиц атмосферы и должен в условиях свободномолекулярного движения препятствовать их покиданию полости накопителя. Свойства конкретных форм входных каналов определяются их геометрическими характеристиками и таким параметром набегающего потока воздуха, как отношение скорости потока  $V_\infty$  (скорости КА) к наиболее вероятной скорости хаотического движения молекул  $V_2$  (тепловой скорости).

Накопитель – это камера торможения потока, основной функцией которой является максвеллизация (или термолизация) частиц влетающего потока газа. Помимо этого, накопитель:

- позволяет поддерживать необходимую для работы ПЭРД плотность газа в области ионизации в тяговом узле;
- «развязывает» выходное сечение входного канала и входное сечение тягового узла, что позволяет проводить отбор газа в требуемом месте;
- даёт возможность использовать различные формы входных каналов.

В качестве тягового узла ПЭРД, как уже отмечалось, рассматривается схема высокочастотного ионного двигателя (Канев С.В. и др., 2015), позволяющая получать высокоскоростные потоки ионов химически активных газов.

Остановимся на проблемных вопросах создания ПЭРД, и в первую очередь – на возможности повы-

# РАЗРАБОТКА ВОЗДУШНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

шения концентрации газов атмосферы в зоне ионизации тягового узла. Для этого рассмотрим работу входного канала и накопителя ПЭРД в стационарном режиме при полете КА по круговой орбите со скоростью  $V_\infty$ .

Если произведение площади сечения влета молекул в тяговый узел  $A_3$  на вероятность пролёта частиц через сечение входа в тяговый узел много больше произведения площади сечения влёта  $A_1$  частиц во входной канал на вероятность пролёта через накопитель при диффузном движении молекул, т.е. если  $p_{3d}A_3 > p_{1d}A_1 = p_{2d}A_2$ , то расход частиц через накопитель (их влёт в тяговый узел) будет равен потоку молекул, прошедших через входной канал:

$$j_{3\max}^+ = n_\infty V_\infty p_{1S} A_1.$$

При этом выражение для потока молекул, влетающих в ПЭРД, можно записать в относительном виде

$$\frac{j_3^+}{j_{3\max}^+} = \frac{j_{out}}{j_{out,max}} = \frac{p_{3d}A_3/p_{1d}A_1}{1 + (p_{3d}A_3/p_{1d}A_1)}.$$

С учётом этого, для дроссельной характеристики ПЭРД можно получить выражение

$$\frac{j_{out}}{j_{out,max}} + \frac{n_2}{n_{2\max}} = 1, \quad (3)$$

а физический смысл соотношения  $p_{3d}A_3/p_{1d}A_1$  рассматривать как дроссельный параметр

$$x \equiv \frac{p_{3d}A_3}{p_{1d}A_1} \equiv \frac{j_{out}}{j_{out,max}} \cdot \frac{n_{2\max}}{n_2}. \quad (4)$$

Графическое изображение зависимости (3) – это отрезок прямой (рисунок 4).

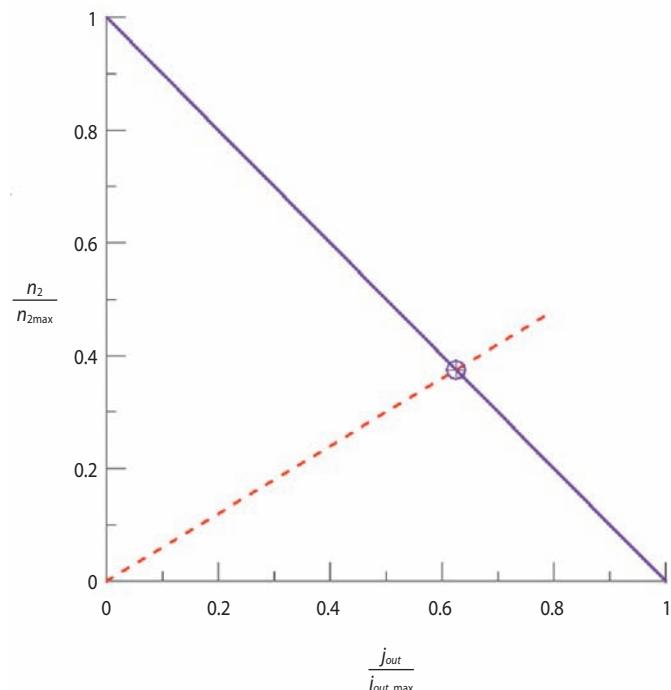


рисунок 4. Дроссельная характеристика ПЭРД

Из соотношения (3) следует, что при увеличении расхода газа через ПЭРД уменьшается концентрация РТ в области ионизации тягового узла. С учётом этого, наиболее приемлемое решение для эффективно работающего ПЭРД – это «проигрыш» по отношению к максимальным значениям (примерно вдвое) как по расходу, так и по росту концентрации РТ. Штриховая прямая на рисунке 4 соответствует значению дроссельного параметра, в котором отфильтрованный поток в тяговый узел пропорционален концентрации молекул в накопителе в соответствии с (4) и при указанных выше условиях. Точка пересечения прямых и определяет параметры потока в ПЭРД.

Поскольку соотношение между приведёнными (относительными) величинами отфильтрованного расхода и концентрации молекул в накопителе определяется дроссельным параметром, то следующей задачей будет анализ максимальной достижимой величины концентрации молекул  $n_{2\max}$  на входе в зону ионизации тягового узла:

$$\begin{aligned} n_{2\max} &= n_\infty \cdot B \cdot \varphi; \\ B &= 2\sqrt{\pi} \frac{V_\infty}{V_2}; \\ \varphi &= \frac{p_{1S}}{p_{1d}} = \frac{p_{1S} A_1}{p_{2d} A_2}. \end{aligned}$$

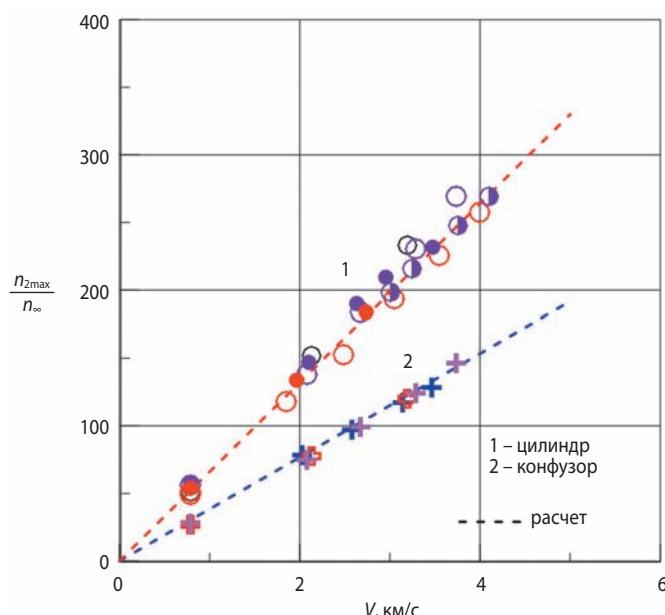
Параметр  $B$ , определяемый степенью торможения молекул, зависит от скорости набегающего потока и от температуры газа (стенок) в накопителе. Оценка параметра  $B$  (в отсутствии протяжённого входного канала, т.е. при заборе набегающего газа через отверстие в стенке накопителя) при скорости  $V_\infty=8$  км/с и  $V_2=400$  м/с (наиболее вероятная скорость молекулы кислорода при температуре  $T_2=308$  К) даёт величину порядка 70. На величину параметра  $\varphi$ , учитывающего влияние формы входного канала, воздействуют: геометрическая форма входного канала, скоростное отношение в набегающем потоке  $S_\infty = V_\infty / \sqrt{2kT_\infty/m}$ , законы отражения от поверхности стенок канала молекул набегающего потока. В таблице 1 приведены значения  $\varphi$ , вычисленные статистическим методом Монте – Карло при  $S_\infty=10$ , для канала в виде усечённого конуса, широкой частью обращенного к потоку (конфузора), цилиндрического канала и канала с квадратным поперечным сечением, величина которого не изменяется по длине. Результаты моделирования также показали, что эффективность входных каналов в форме цилиндрической трубки и квадратного канала близки: вероятности пролёта в них молекул  $p_{1S}$  и  $p_{2d}$  различаются не более чем на 10%.

Результаты модельных экспериментов с использованием в качестве рабочего тела азота и расчётные зависимости (на базе приближения диффузного отражения частиц от стенок) приведены на рисунке 5.

**таблица 1** – Результаты расчётов параметра  $\varphi$  для традиционных каналов по относительной длине  $L/R_2$  ( $R_2$  – радиус канала в сечении  $A_2$ ) и для квадратного канала с различным соотношением длины к половине стороны квадрата  $L/b$

	$L/R_2$	10	15	20	30	40
конфузор	$\varphi$	3,96	4,71	5,29	6,29	6,95
цилиндр	$\varphi$	3,84	4,82	5,32	5,5	5,83
квадрат	$L/b$	10	20	30	40	50
	$\varphi$	3,63	4,67	5,18	5,45	5,64

Из рисунка 5 следует, что при скоростях молекул азота  $V_{N_2} \leq 4$  км/с предположение о полностью диффузном отражении молекул от поверхности стенок достаточно хорошо выполняется. Об этом свидетельствует и отсутствие систематических отклонений экспериментальных данных от результатов расчета. Линейный характер зависимостей позволяет сделать прогноз для повышения концентрации газов атмосферы в орбитальном полете по данным модельных экспериментов. С учётом этого для полёта ПРЭД на орбите можно оценивать возможность повышения концентрации на входе в тяговый узел до 500 раз. В настоящее время проводятся работы по исследованию повышения концентрации в прототипе заборного устройства с накопителем.



**рисунок 5.** Изменение максимальной плотности в накопителе в зависимости от скорости потока азота и типа входного устройства (конус и цилиндр)

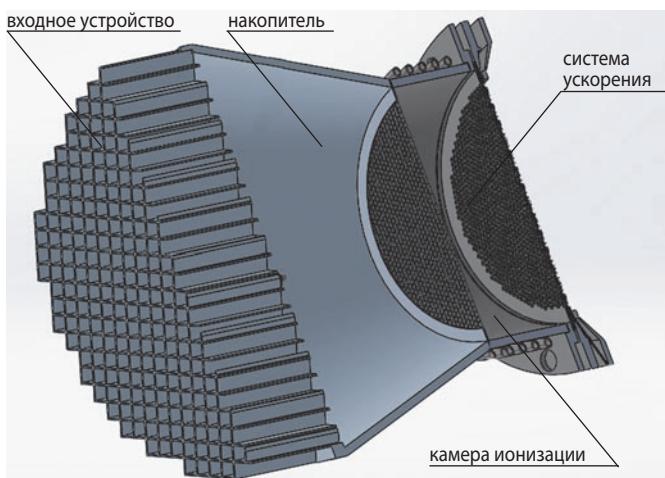
### 3. Вариант конструктивной схемы ПЭРД

Потенциальной возможностью повышения эффективности работы входного канала является применение многоканальных систем. Так, течение в свободномолекулярном режиме характеризуется независимостью граничных условий на входе различных каналов для внутренних течений в них (Коимаров Ю.А. и др., 1977), если входные сечения не влияют друг на друга (т.е. отсутствует интерференция) – например, входные сечения находятся в одной плоскости, перпендикулярной вектору скорости КА. Более того, все свойства течений во входных каналах зависят только от их формы, относительной длины, ориентации по отношению к вектору скорости КА и от величины скоростного отношения  $S_\infty$ . Эта особенность течений означает, что все параметры на выходе из канала будут совпадать у каналов различной длины, но подобной геометрии. Для сохранения общего потока числа молекул, влетающих в накопитель, необходимо использовать не отдельный канал, а сотовую конструкцию (Кузнецов Ю.Е. и др., 1977; Barral S. et al., 2015). Преимущества сотовой конструкции входного устройства по сравнению с одним каналом очевидны. Прежде всего это компактность при одинаковых значениях сжатия газа в накопителе и расхода, забираемого в тяговый узел. Далее – это возможность использования всего пространства миделевого сечения КА для увеличения забора газа, в отличие, например, от кольцевой щелевой конструкции входного канала (Fujita K., 2004), где сопротивление торца КА определяется большей площадью, чем площадь входного канала и наконец это возможность уменьшения сопротивления КА за счёт возможности «спрятать» боковую его поверхность за входным сечением заборного устройства. В частности, значительную часть объёма КА можно использовать в качестве накопителя.

Таким образом, использование сотовой конструкции воздухозаборника позволяет существенно улучшить характеристики ПЭРД. По результатам предварительных экспериментальных и теоретических исследований был выбран вариант прототипа ПЭРД, представленный на рисунке 6.

Модельный прототип тягового узла представленного устрйства с размером пучка 150 мм прошёл первые огневые испытания и продемонстрировал удовлетворительные характеристики, приведённые в таблице 2. Полученные параметры согласуются с данными других авторов (DiCara D. et al., 2007), исследовавших работу ВЧИД при работе на газах атмосферы.

# РАЗРАБОТКА ВОЗДУШНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ЭЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ



**рисунок 6.** 3D-модель одного из вариантов конструктивной схемы ПЭРД

**таблица 2** – Характеристики прототипа тягового узла ПЭРД при напряжении на ускоряющем электроде 1000 В и энергопотреблении не более 800 Вт

	ток пучка $I_p$ , А	рабочее тело		
		Xe	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
скорость истечения $V$ , м/с		38201	116991	109435
расход ионов $m_i$ , кг/с	0,1	1,37E-07	1,46E-08	-
	0,2	2,74E-07	2,92E-08	-
	0,3	4,11E-07	4,38E-08	5,01E-08
	0,4	5,48E-07	5,85E-08	6,68E-08
тяга $P$ , Н	0,1	5,24E-03	1,71E-03	-
	0,2	1,05E-02	3,42E-03	-
	0,3	1,57E-02	5,13E-03	5,48E-03
	0,4	2,09E-02	6,84E-03	7,31E-03

В целом в ходе выполнения экспериментальных исследований прототипа тягового узла ПЭРД получена устойчивая работа на различных рабочих телах. Отработаны механизм зажигания разряда и процедура управления параметрами разряда.

## заключение

В результате проведённых исследований выбрана конструктивная схема воздушного ПЭРД, оценены параметры двигателя в целом и его отдельных критичных элементов. Продемонстрирована возможность достижения высоких интегральных характеристик, как по устройству забора газов, так и по устройству ионизации и ускорения частиц.

Работа по созданию прототипа ПЭРД выполняется в рамках реализации Федеральной целевой программы «Исследование и разработка по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» (Соглашение № 14.577.21.0101).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Антропов Н.Н., Богатый А.В., Данышов Ю.Т., Дьяконов Г.А. и др. Корректирующая двигательная установка с аблационным импульсным плазменным двигателем для малых космических аппаратов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 5. С. 33-37.

Балаев Н.Ф., Гродзowski Г.Л., Данилов Ю.И. и др. Научные результаты полетов автоматических ионосферных лабораторий «Янтарь» // Ученые записки ЦАГИ. 1971. Т. 2, № 2. С. 58-65.

Брусов В.С., Карчаев Х.Ж., Клименко Н.Н., Мартынов М.Б. и др. Проблемы создания псевдоспутников – высотных атмосферных беспилотных летательных аппаратов на солнечной энергии // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 1. С. 71-79.

Важенин Н.А., Обухов В.А., Плохих А.П., Попов Г.А. Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 432 с.

Канев С.В., Петухов В.Г., Попов Г.А., Хартов С.А. Прямоточный электрореактивный двигатель для компенсации аэродинамического торможения низкоорбитальных космических аппаратов // Известия вузов. Авиационная техника. 2015. № 3. С. 35-40.

Канопус-В. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Канопус-В> (дата обращения: 02.07.2016).

Кошмаров Ю.А., Рыжов Ю.А. Прикладная динамика разреженного газа. М.: Машиностроение, 1977. 184 с.

Кузнецов Ю.Е., Флаксман Я.Ш. Влияние формы поперечного сечения канала на характеристики свободномолекулярных воздухозаборников // Труды ЦАГИ. 1977. Вып. 1863. С. 25-29.

Barral S., Cifali G., Albertoni R., Andrenucci M. et al. Conceptual Design of an Air-Breathing Electric Propulsion System // 34th International Electric Propulsion Conference, July 2015, IEPC-2015-271.

DiCara D., Gonzalez del Amo J., Santovincenzo A. et.al. RAM Electric Propulsion for Low Earth Orbit Operation: an ESA study // 30th International Electric Propulsion Conference, Sept. 2007, IEPC-2007-162.

Fujita K. Air Intake Performance of Air Breathing Ion Engines // Journal of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 2004. V. 52, № 610, Nov. P. 514-521.

GOCE. URL: [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/GOCE](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE) (дата обращения: 02.07.2016).

Nishiyama K. Air Breathing Ion Engine Concept / 54<sup>th</sup> International Astronautical Congress, Sept.-Oct. 2003, IAC-03-S4-02.

Статья поступила в редакцию 23.06.2016 г.

## ДЕТОНАЦИОННОЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНО-ПУСКОВОЕ УСТРОЙСТВО



**В.И. Загарских<sup>1</sup>,**  
доцент, кандидат  
технических наук,  
*zagarskih@rambler.ru;*

**V.I. Zagarskih**



**Е.Н. Кузин<sup>1</sup>,**  
старший научный  
сотрудник, кандидат  
технических наук,  
*arvsn@mil.ru;*

**E.N. Kuzin**



**В.В. Ефанов<sup>2</sup>,**  
профессор, доктор  
технических наук,  
*vladimir\_efanov@laspace.ru;*

**V.V. Efandov**

*В статье рассмотрен вариант построения предохранительно-пускового устройства на основе линейных детонирующих зарядов, обеспечивающего защиту детонационных цепей систем пироавтоматики от несанкционированных внешних воздействий и формирующего линию взведения исполнительных механизмов.*

**Ключевые слова:**

линейный детонирующий заряд;  
предохранительно-пусковое устройство;  
инициирующее устройство.

Предохранительно-пусковые устройства (ППУ) предназначены для надежной защиты (блокирования) детонационных цепей от различного рода случайных и паразитных сигналов, а также несанкционированных воздействий на них извне и гарантированного прохождения по программе (циклограмме) команд на срабатывание исполнительных устройств и механизмов, использующих энергию высокоЕнергетических конденсированных систем.

К настоящему времени известно большое количество подобного рода устройств, которые широко применяются в изделиях ракетно-космической и других

## DETONATING FUSE-TRIGGERING DEVICE

*The article presents the design configuration of fuse-triggering device on the basis of linear detonating charges providing protection of pyro automatic systems detonation lines against unauthorized environmental impacts and forming actuators triggering line.*

**Key words:**

linear detonating charge;  
fuse – triggering device;  
actuator.

видов техники (*Вспомогательные системы..., 1970; Средства поражения..., 2008; Ефанов В.В. и др., 2015*). В основном это устройства пиромеханического или электромеханического принципа действия.

Их общими недостатками являются: сложность конструкции, наличие большого количества деталей и узлов, обязательное применение вращающихся, прокручивающихся на установленный угол вокруг оси или линейно перемещающихся деталей, пружин различных типов, которые длительное время находятся в сжатом или растянутом состоянии, различных приводов и т.д. Все это отрицательно сказыва-

<sup>1</sup> Военная академия Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого Министерства обороны Российской Федерации, Россия, Московская область, г. Балашиха.

Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great of the Ministry of Defense of the Russian Federation, Russia, Moscow region, Balashikha.

<sup>2</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

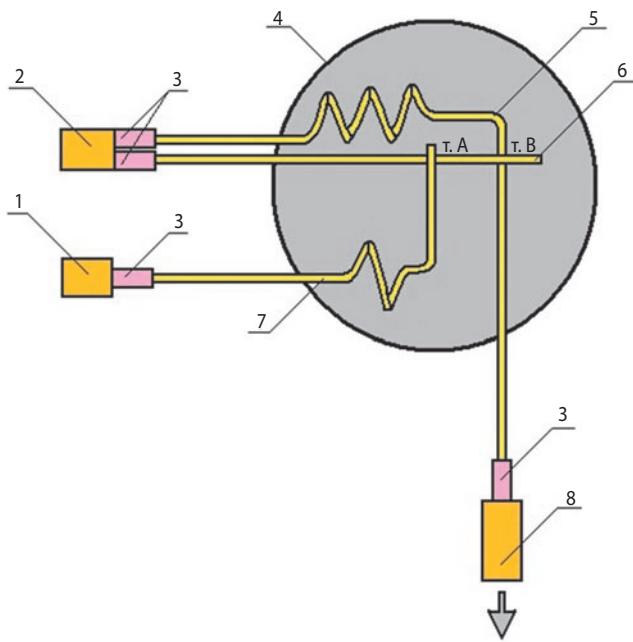
Federal Enterprise «Lavochkin Association», Russia, Moscow region, Khimki.

## ДЕТОНАЦИОННОЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНО-ПУСКОВОЕ УСТРОЙСТВО

ется на массово-габаритных характеристиках таких устройств, ведет к повышенному энергопотреблению и снижению надежности функционирования.

В качестве альтернативы пиромеханическим и электромеханическим устройствам рассматриваются электронные ППУ, обладающие малыми габаритами и массами, требующие незначительного энергопотребления. Однако на сегодняшний день не обеспечен требуемый уровень радиационно-термической стойкости применяемых микрочипов, не гарантируется безотказность действия их в условиях мощных электромагнитных и СВЧ-полей. Кроме того, отечественная база производства микрочипов еще достаточно слаба, а стоимость таких изделий высока.

Иным вариантом построения ППУ может быть устройство детонационного принципа действия, позволяющее, по нашему мнению, существенно упростить конструкцию, снизить массово-габаритные характеристики и повысить надежность. Схема детонационного ППУ представлена на рисунке 1.



**1** – инициирующее устройство взведения; **2** – пусковое устройство; **3** – заряды-усилители; **4** – корпус; **5** – линейный детонирующий заряд служебного применения; **6** – линейный заряд предохранения; **7** – линейный заряд взведения; **8** – детонатор исполнительного механизма.

**рисунок 1.** Схема детонационного предохранительно-пускового устройства

Конструкция устройства включает три однотипных, но разной длины отрезка линейных детонирующих зарядов (ЛДЗ) малого калибра: взведения, предохранения и служебного применения, помещённых в имеющиеся в корпусе устройства каналы заданной конфигурации, и два детонатора. В качестве ЛДЗ могут быть использованы отрезки либо штатных детонирующих удлинённых зарядов (ДУЗ) круглого сечения, снаряжённых высокобризантными кристал-

лическими взрывчатыми веществами (ВВ) (гексогеном или октогеном) в металлических (алюминиевых или медных) оболочках, либо аналогичные заряды, снаряжённые эластичным взрывчатым веществом (ЭВВ), либо шнуровые или ленточные безоболочные заряды ЭВВ или пластичного ВВ. С практической точки зрения наиболее приемлемы заряды в оболочке. Применение их обусловлено тем, что критический диаметр детонации снаряжения (взрывчатых веществ) при наличии прочной оболочки составляет доли миллиметра. Например, у мелкокристаллического гексогена или октогена с размером кристаллов 1,10 мкм критический диаметр детонации порядка 0,5 мм (*Физика взрыва*, 2002), а у высокочувствительных и высокобризантных ЭВВ на основе бензотрифуроксана – порядка 0,2 мм (*Котомин А.А. и др.*, 2015), что позволяет использовать ДУЗы калибром (наружным диаметром) менее 1,0 мм. Этим достигается, с одной стороны, низкий уровень побочных ударно-волновых нагрузок на расположенные в непосредственной близости бортовую чувствительную и прецизионную служебную, научную и специальную аппаратуру, узлы и агрегаты при срабатывании устройства, а с другой – приемлемый уровень механического воздействия на разрушаемые заряды.

Принцип работы детонационного ППУ заключается в следующем. При подаче команды-сигнала от бортовой системы управления срабатывают последовательно: инициирующее устройство (ИУ) взведения 1, за ним с определённой временной уставкой – ИУ пусковое 2. ИУ взведения 1 через заряд-усилитель 3 вызывает детонацию в ЛДЗ взведения 7. В точке пересечения ЛДЗ взведения с ЛДЗ предохранения 6 (на рисунке 1 – т. А) происходит перебитие последнего. От ИУ пускового 2 через заряды-усилители 3 срабатывают одновременно два ЛДЗ: предохранения 6 и служебного применения 5.

Детонация по ЛДЗ предохранения 6, дойдя до т. А, заглохнет. По ЛДЗ служебного применения 5 она свободно пройдет точку пересечения В (перебьёт в ней оставшийся несдетонированным отрезок ЛДЗ предохранения (между точками А и В) и через концевой заряд-усилитель 3 синицирует детонатор 8, от которого детонационный импульс по заряду-транслятору передастся исполнительным устройствам (механизмам) летательного аппарата.

При поступлении на предлагаемое устройство ложного сигнала (случайного, паразитного или сигнала от несанкционированного вмешательства) возможны три варианта развития события.

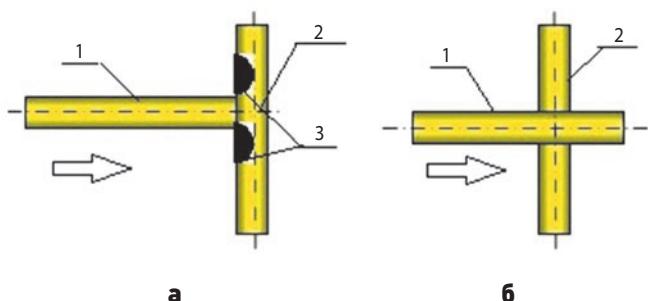
При подаче ложного сигнала на ИУ взведения 1 сработает ЛДЗ взведения 7 и в точке А перебьёт ЛДЗ предохранения 6. Предохранительно-пусковое устройство перейдёт во взведённое состояние, но ИУ пусковое 2 будет заблокировано, срабатывания ЛДЗ служебного применения 5 не произойдет.

При подаче ложного сигнала на ИУ пусковое 2 сработают одновременно два ЛДЗ: служебного применения 5 и предохранения 6.

В силу того, что протяжённость ЛДЗ предохранения 6 много меньше ЛДЗ служебного применения 5, детонационный импульс по линии предохранения достигнет точки пересечения В (см. рисунок 1) намного раньше, чем он дойдет до этой же точки В по линии служебного применения. ЛДЗ служебного применения 5 будет в т. В перебит; детонация его в дальнейшем направлении к детонатору 8 будет прервана. Ложного или несанкционированного срабатывания исполнительных детонационных устройств или основного заряда ВВ не произойдет.

Вполне очевидно, что для надежного функционирования устройства необходимо выполнить ряд условий. Прежде всего обеспечить перебивание детонирующих зарядов служебного применения и предохранения без инициирования взрывчатого превращения в них, которое может наступить в результате ударно-волновых воздействий. Затем исключить возможность передачи какого-либо взрывчатого превращения между отрезками перебитого заряда через образовавшийся зазор. Кроме того, срабатывание зарядов взведения и предохранения не должно приводить к нарушению работоспособности всего устройства.

Принципиально перебивание детонирующих зарядов можно осуществить различными способами. Например, расположив заряды в одной плоскости под прямым углом (рисунок 2а), либо один над другим (рисунок 2б).



**1 – линейный заряд предохранения (взведения); 2 – линейный заряд служебного применения; 3 – «тёмные» зоны.**

**рисунок 2.** Схемы расположения линейных детонирующих зарядов

При расположении зарядов в одной плоскости под прямым углом трансляция детонации от активного заряда к пассивному может сопровождаться угловым эффектом (*Физика взрыва*, 2002; *Аттетков А.В. и др.*, 2000), сущность которого состоит в образовании так называемых «тёмных» зон непрореагировавшего ВВ в пассивном заряде, примыкающих к угловым границам места контакта в результате чего трансляция детонационного импульса в этом заряде становится невозможной.

Следует заметить, что угловые эффекты в наибольшей степени проявляются в безоболочных зарядах малочувствительных ВВ с невысокой детонационной способностью, а конфигурация и размеры «тёмной» зоны зависят от кривизны детонационного фронта, толщины слоя ВВ, характера подложки, на которой расположен заряд, точки инициирования и др. (*Физика взрыва*, 2002; *Аттетков А.В. и др.*, 2000). По этим причинам реализация углового эффекта при применении ЛДЗ из высокобризантных ВВ в металлических оболочках маловероятна. Так, расчёт ударного давления по известным зависимостям (*Физика взрыва*, 2002) в условиях набегающей детонационной волны при переходе её из активного заряда в снаряжение пассивного через тонкостенную оболочку из алюминия или меди даёт давление около 25,8 ГПа, что намного превышает критическое давление инициирования детонации в ЛДЗ, снаряжённых гексогеном. Экспериментально установлено, что при такой схеме расположения ЛДЗ с гексогеновым снаряжением в алюминиевых и медных оболочках калибром 2,9 и 2,0 мм (диаметр снаряжения 2,0 и 1,2 мм соответственно) в пассивных зарядах возбуждается детонация. На рисунке 3 представлен результат эксперимента по передаче детонации от активного к пассивному ЛДЗ при расположении зарядов в одной плоскости под прямым углом.



**рисунок 3.** Результат эксперимента по передаче детонации от активного к пассивному ЛДЗ

Снизить уровень ударно-волнового нагружения пассивного заряда до значений ниже критических возможно либо размещением между зарядами волногасящей приставки (демпфера), изготовленной из материала с низкой акустической жёсткостью (например из полиэтилена или фторопластика), либо расположением зарядов с фиксированным зазором. Рассчитать толщину взрывонепроводящего демпфера несложно с помощью методики, представленной, например, в (*Кузин Е.Н. и др.*, 2015).

В то же время наличие демпфера должно обеспечить не только отсутствие детонации в пассивном заряде, но и его деформирование в месте контакта с активным зарядом. При этом образовавшийся зазор должен быть таким, чтобы исключить передачу детонации между отрезками разрушенного пассивного заряда. Оценить теоретически минимально допустимую величину этого зазора не представляется

## ДЕТОНАЦИОННОЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНО-ПУСКОВОЕ УСТРОЙСТВО

возможным, поскольку процесс его формирования будет носить вероятностный характер. Более того, необходимо учитывать свойства среды, заполняющей зазор, параметры ударной волны и потока продуктов детонации, истекающих с торца активного заряда, свойств активной и пассивной частей заряда и др. В первом приближении величина минимально допустимого зазора может быть рассчитана по трансформированной эмпирической зависимости, полученной авторами статьи в результате обработки экспериментальных данных для удлинённых зарядов в металлических корпусах некумулятивного типа, в виде

$$\Delta_{\min} = \xi \cdot m_a^{1/3} \times d_{\text{BB}}^{1/4},$$

где  $\Delta_{\min}$  – минимальная величина зазора, обеспечивающая отсутствие детонации в пассивном заряде;

$\xi$  – коэффициент, зависящий от характеристик ВВ (для зарядов с гексогеновым снаряжением малого калибра  $\xi \geq 2,75$ );

$m_a$  – активная масса заряда;

$d_{\text{BB}}$  – диаметр снаряжения ЛДЗ.

Поскольку металлическая оболочка сдерживает боковой разлёт продуктов детонации, препятствуя проникновению волн разрежения в зону химических реакций, расчёт величины активной массы  $m_a$  может быть произведён по зависимости

$$m_a = 0,56\pi d_{\text{BB}}^3 \rho_{\text{BB}},$$

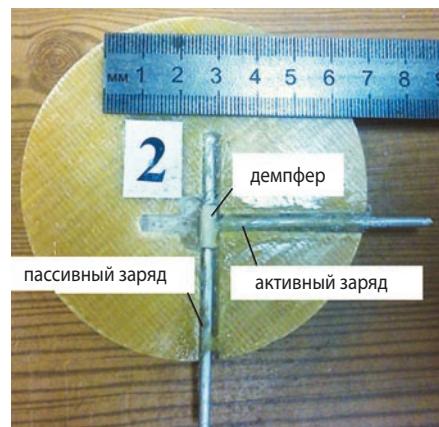
где  $\rho_{\text{BB}}$  – плотность снаряжения ЛДЗ.

Нетрудно рассчитать, что для зарядов калибром менее 3,0 мм величина зазора между отрезками перебитого заряда, при котором гарантированно не передаётся детонация, должна быть не менее 1,0 мм.

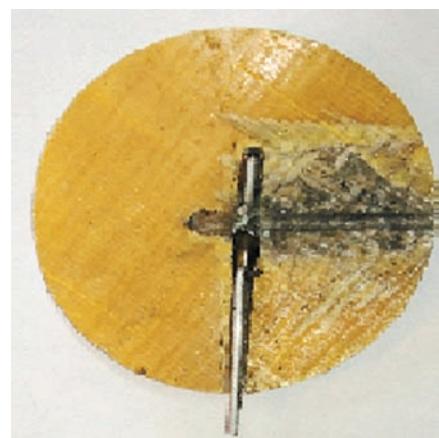
На рисунке 4 представлены результаты эксперимента по перебиванию пассивного заряда при наличии демпфера. Установлено, что в этом случае активный заряд перебивает пассивный без возбуждения в нём взрывчатого превращения. В свою очередь, при инициировании детонации в одном из отрезков перебитого ЛДЗ другой не детонирует.

При расположении зарядов в оболочке один над другим (см. рисунок 2б) набегание ударной волны от активного заряда на снаряжение пассивного будет осуществляться в скользящем режиме после перехода через оболочки зарядов. В этом случае задача гарантированного перебивания может быть решена с использованием закономерностей затухания осесимметричных ударных волн в оболочках детонирующих удлинённых зарядов, установленных на основании теоретико-экспериментальных исследований (Кузин Е.Н. и др., 2015), теории чувствительности ВВ и прочностных характеристик пассивного ЛДЗ в условиях динамического нагружения (Даниленко В.В., 2010).

Выполненные расчёты по определению условий гарантированного перебивания пассивных детонирующих зарядов были подтверждены результатами



а



б



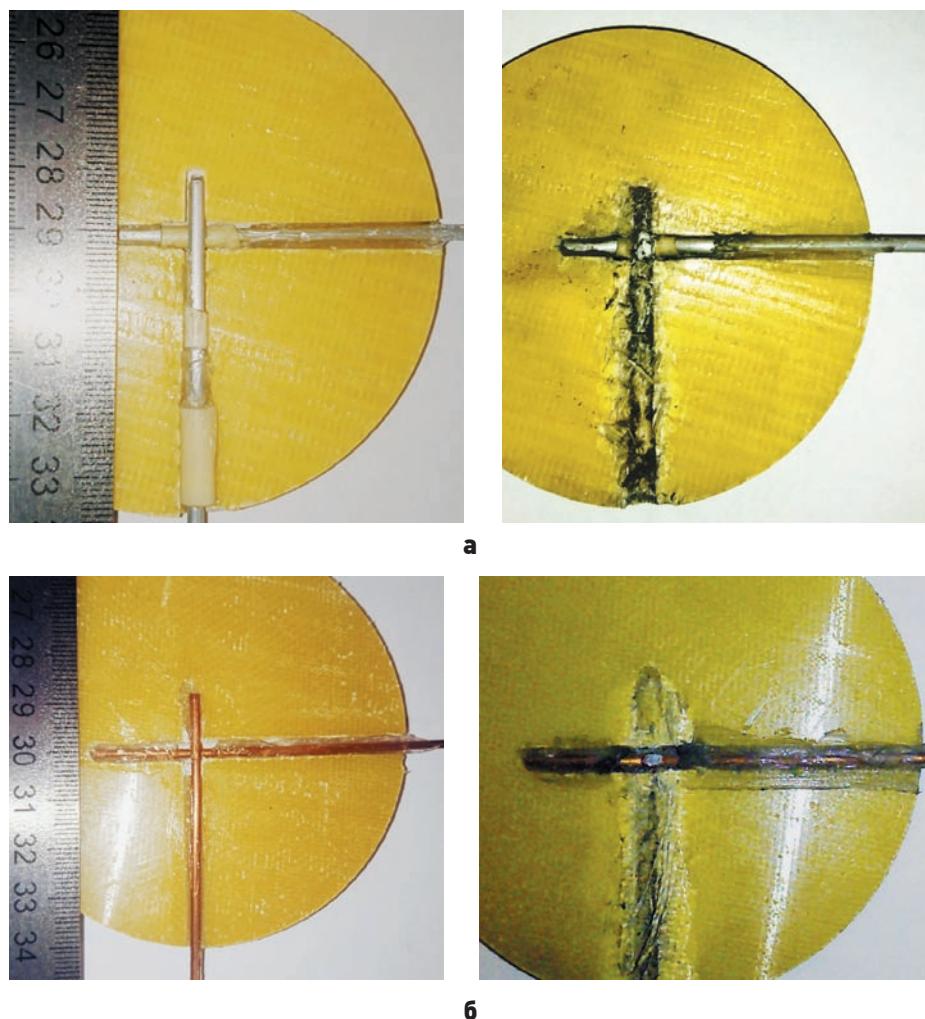
в

**а** – исходная сборка для испытаний; **б** – результат срабатывания активного заряда; **в** – результат срабатывания пассивного заряда.

**рисунок 4.** Результат эксперимента по перебиванию пассивного ЛДЗ при наличии демпфера

прямых экспериментов для ЛДЗ малого калибра в алюминиевых и медных оболочках. На рисунке 5 представлены результаты экспериментов по перебиванию ЛДЗ при расположении зарядов в оболочке один над другим.

В заключение необходимо отметить следующее. Показана принципиальная возможность создания предохранительно-пусковых устройств детонационного типа на основе линейных детонирующих зарядов в металлических оболочках малого калибра (диаметром 2,0 и менее мм со снаряжением из вы-



**a** – результат перебивания пассивного ЛДЗ в алюминиевой оболочке;  
**б** – результат перебивания пассивного ЛДЗ в медной оболочке.

**рисунок 5.** Результаты экспериментов по перебиванию ЛДЗ при расположении зарядов в оболочке один над другим

сокобризантного ВВ). Гарантированное перебивание пассивных ЛДЗ может быть осуществлено как при расположении зарядов в одной плоскости под прямым углом, так и расположении их один над другим. Однако второй вариант расположения представляется наиболее приемлемым для практического применения. Несомненно, что для разработки методики проектирования подобного типа ППУ требуется дальнейшее проведение теоретических и экспериментальных исследований.

## список литературы

Аттетков А.А., Гнускин А.М., Пырьев В.А., Сагидуллин Г.Г. Резка металлов взрывом. М.: СИП РИА, 2000. 260 с.

Вспомогательные системы ракетно-космической техники / Под ред. И.В. Тишунина. М.: Мир, 1970. 400 с.

Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. М.: Энергоиздат, 2010. 784 с.

Ефанов В.В., Кузин Е.Н., Горовцов В.В. Устройство защиты детонационных цепей бортовой автомати-

ки летательных аппаратов // Патент РФ № 2541595. Приоритет 24.10.2013. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений РФ 14.01.2015; опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5.

Котомин А.А., Душенок С.А., Демьяненко Д.Б., Ефанов В.В. Новое поколение систем пироавтоматики КА – результат успешного сотрудничества // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 3 (29). С. 48-54.

Кузин Е.Н., Загарских В.И., Ефанов В.В. Закономерности затухания осесимметричных ударных волн в оболочках детонирующих удлинённых зарядов // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2015. № 4 (30). С. 23-31.

Средства поражения и боеприпасы: учебник / А.В. Бабкин, В.А. Велданов, Е.Ф. Грязнов и др.; под общ. ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.

Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. 3-е изд., перераб. В 2 т. Т 1. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. 832 с.

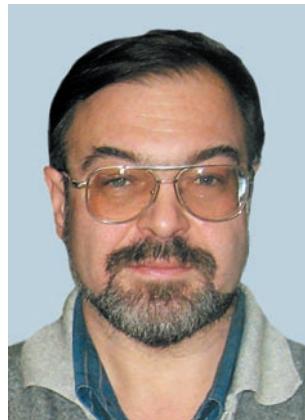
Статья поступила в редакцию 01.06.2016 г.

## ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ВОПРОСА ПО ПРОГНОЗУ УРОВНЕЙ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАХОВИЧНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ

## THE APPROACH TO THE ISSUE OF PREDICTED PERTURBATION LEVELS FOR ELECTRIC FLYWHEEL ELECTRIC ACTUATORS



**Д.А. Кузнецов<sup>1</sup>,**  
кандидат технических наук,  
*dimuz@bk.ru;*  
**D.A. Kuznetsov**



**П.П. Телепнев<sup>1</sup>,**  
кандидат технических наук,  
*dep103180@laspace.ru;*  
**P.P. Telepnev**



**В.Ю. Ермаков<sup>1</sup>,**  
кандидат технических наук,  
*dep103180@laspace.ru;*  
**V.Yu. Ermakov**

*В статье освещается вопрос выбора предлагаемых электромаховичных исполнительных органов для установки на борт в условиях наличия только общих динамических требований к рассматриваемому изделию.*

*Ключевые слова:* динамическое моделирование; вибровозмущения; прецизионная аппаратура; электромаховичные исполнительные органы; многозональное сканирующее устройство.

В последнее время достаточно часто возникает вопрос о том, какие воздействия будут оказывать электромаховичные исполнительные органы (ЭМИО) или гироскопические приборы на прецизионную аппаратуру, такую, как многозональные сканирующие устройства, телескопы, датчики гида и другие прецизионные устройства, а также на ориентацию и стабилизацию космических аппаратов (КА) в целом. При проектировании изделий изначально ставятся основные цели и задачи миссии, затем выбирается или создается вновь аппаратура, позволяющая осуществить данную миссию. Электромаховичные исполнительные органы в процессе эксплуатации изделий работают практически постоянно и могут значительно ухудшать вибрационную обстановку на борту КА наряду с другими источниками вибровозмущений (Котомин А.А. и др., 2001; Ефанов В.В. и др., 2013; Телепнев П.П.

*The article highlights the issue of how to determine the suitability of the proposed flywheel electric actuators for installation on board, having only general dynamic requirements for the product in question.*

*Key words:* dynamic modeling; vibrating perturbation; precision equipment; flywheel electric actuators; multispectral scanning device.

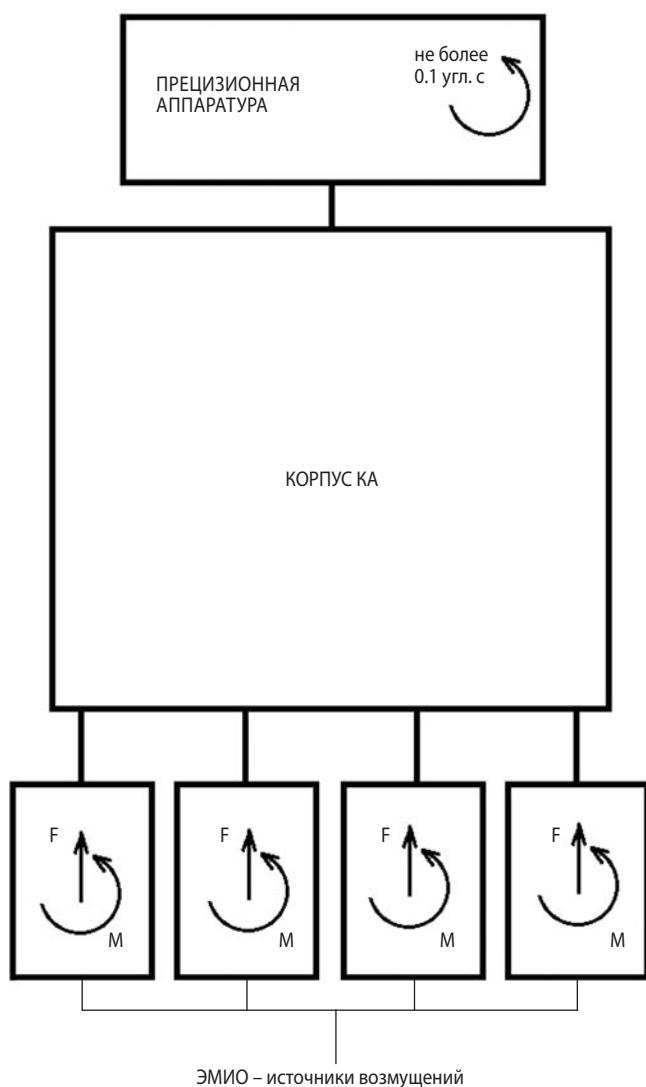
и др., 2014). Проблема часто заключается в том, что выбор ЭМИО производится в первую очередь по критерию надлежащего управления изделием в космическом пространстве, а вопрос о вибровозмущениях, исходящих от них, рассматривается изготовителем в последнюю очередь либо не рассматривается вовсе, так как в требованиях на КА пункты по уровням возмущений от исполнительных органов зачастую отсутствуют.

Имея требования по ориентации и стабилизации КА либо требования к прецизионной аппаратуре, можно установить требования к ЭМИО по уровням исходящих вибровозмущений. Полученные результаты стоит включать в техническое задание на КА для того, чтобы изготовители исполнительных органов, помимо управляющих моментов, учитывали уровни вибровозмущений, исходящих от поставляемых устройств.

<sup>1</sup> ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина», Россия, Московская область, г. Химки.

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

Рассмотрим задачу на примере КА с четырьмя ЭМИО, имеющего требования к угловым перемещениям прецизионной аппаратуры не более 0.1 угловой секунды в диапазоне частот от 10 до 100 Гц. На рисунке 1 представлена схема воздействия источников вибровозмущений на прецизионную аппаратуру КА, где F – силы, (Н); M – моменты, (Н·м).



**рисунок 1.** Схема воздействия источников вибровозмущений на прецизионную аппаратуру КА

Необходимо определить допустимые уровни возмущений, создаваемые ЭМИО.

Для решения поставленной задачи сначала создаётся математическая модель КА, адекватно отражающая его динамические характеристики. В центрах масс каждого ЭМИО прикладываются единичные силы и моменты по направлениям, соответствующим реальным возмущениям (в данном случае по две силы и по два момента на каждый ЭМИО):

$F_{1n} = 1$ ,  $M_{1n} = 1$ , где  $F_{1n}$ ,  $M_{1n}$  – единичные силы (Н) и моменты (Н·м),  $n=1, 2, \dots, 8$ .

В местах установки прецизионной аппаратуры рассматриваются амплитуды угловых перемещений при динамическом отклике конструкции на возмущения от ЭМИО. Таким образом, в совокупности по трём осевым направлениям получаем 24 варианта расчёта амплитуд угловых перемещений от воздействий единичных сил ( $A_k^{F_{1n}}$ ) и 24 варианта расчёта амплитуд угловых перемещений от воздействий единичных моментов ( $A_k^{M_{1n}}$ ).

$A_k^{F_{1n}}$ ,  $A_k^{M_{1n}}$  – амплитуды угловых перемещений (рад) на местах крепления прецизионной аппаратуры от воздействия единичных сил и моментов,  $k=x, y, z$ .

Для определения допустимых уровней возмущений, создаваемых ЭМИО, необходимо из полученных угловых перемещений выбрать наибольшие значения. Для этого в частотном диапазоне от 10 до 100 Гц построим огибающие линии по максимумам амплитуд угловых перемещений и рассмотрим четыре частотных диапазона: от 10 до 25 Гц, от 25 до 50 Гц, от 50 до 75 Гц и от 75 до 100 Гц. На рисунках 2 и 3 графически представлены результаты расчётов амплитуд угловых перемещений от воздействия единичных сил и моментов соответственно, а в таблице 1 представлены максимальные значения амплитуд угловых перемещений при воздействии единичных сил и моментов.

**таблица 1** – Максимальные значения амплитуд угловых перемещений при воздействии единичных сил и моментов

частота, Гц	$A_k^{F_{1n}}$ , рад	$A_k^{M_{1n}}$ , рад
10–25	$2.71 \cdot 10^4$	$3.05 \cdot 10^4$
25–50	$2.66 \cdot 10^4$	$4.04 \cdot 10^4$
50–75	$5.04 \cdot 10^5$	$8.13 \cdot 10^4$
75–100	$2.40 \cdot 10^6$	$1.92 \cdot 10^5$

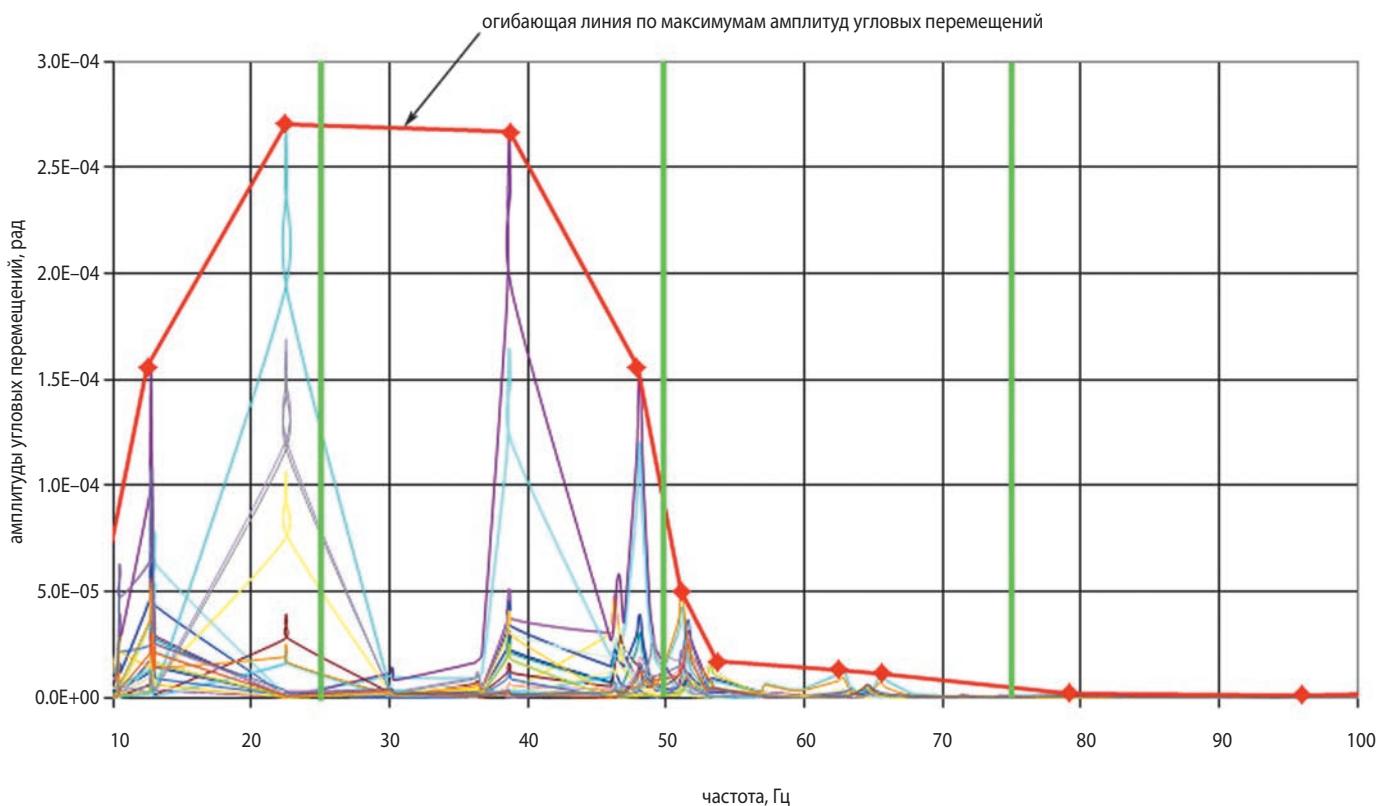
Далее, имея максимальные значения амплитуд угловых перемещений при воздействии единичных сил и моментов, возможно определить необходимые требования по ограничению сил и моментов, обеспечивающие необходимые амплитуды угловых перемещений не более 0,1 угловой секунды ( $4.85 \cdot 10^7$  радиан).

$A_k^{F_{1n}} = A_k^{M_{1n}} = 4.85 \cdot 10^7$ , где  $A_k^{F_{1n}}$  и  $A_k^{M_{1n}}$  – амплитуды угловых перемещений (рад) на местах крепления прецизионной аппаратуры от воздействия искомых сил  $F_{\max}$  и моментов  $M_{\max}$ . Допустимые уровни возмущений, создаваемых ЭМИО, определяются по следующим формулам:

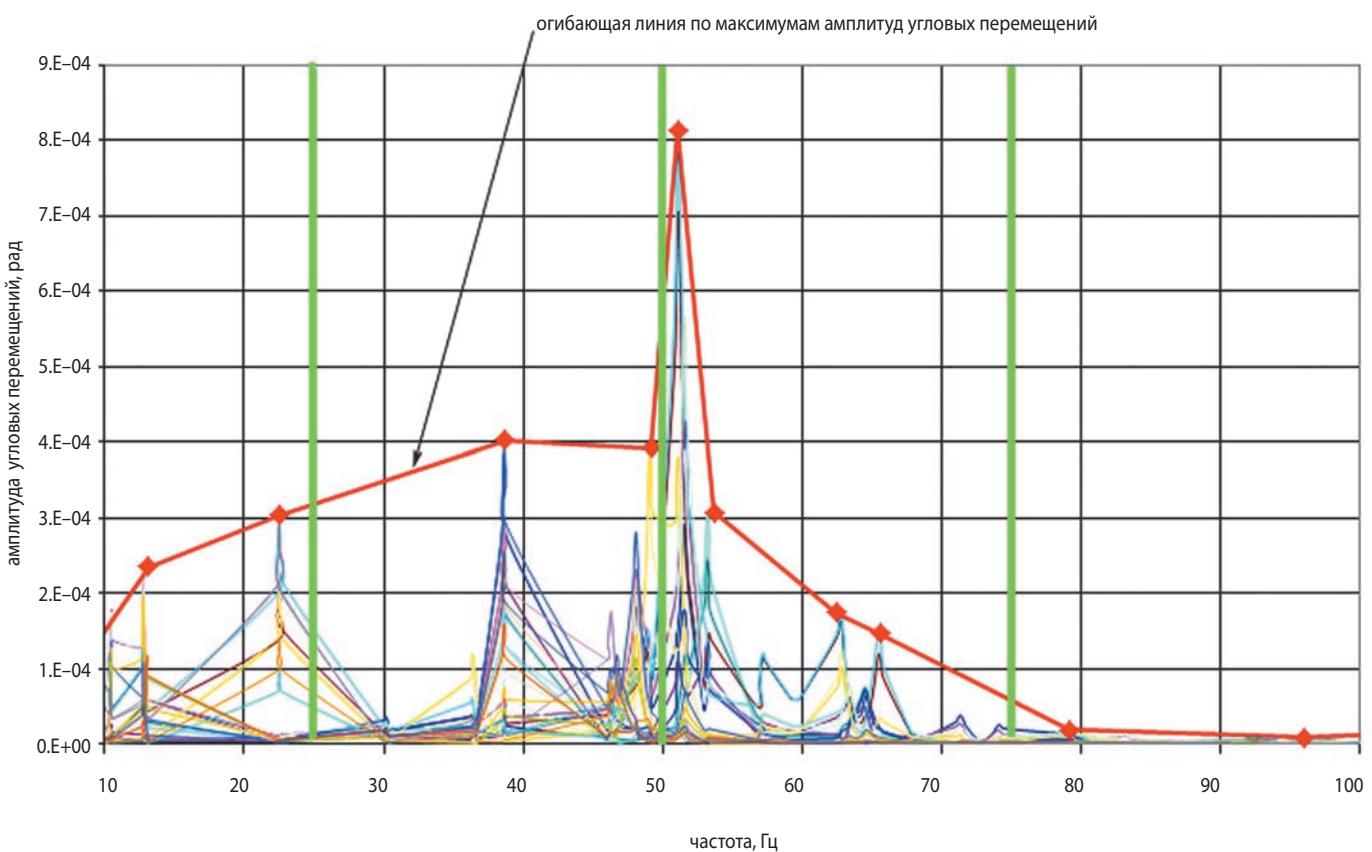
$$F_{\max} = \frac{A_{0.1k}^{F_n}}{K_3 \cdot A_k^{F_{1n}}},$$

$$M_{\max} = \frac{A_{0.1k}^{M_n}}{K_3 \cdot A_k^{M_{1n}}},$$

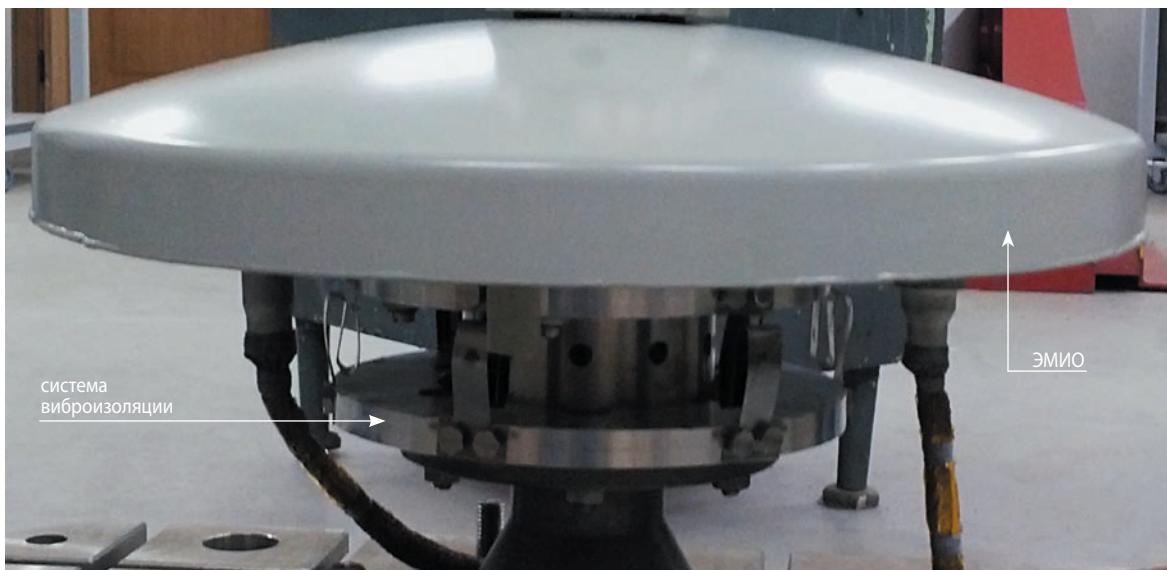
## ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ВОПРОСА ПО ПРОГНОЗУ УРОВНЕЙ ВОЗМУЩЕНИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАХОВИЧНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ



**рисунок 2.** Амплитуды угловых перемещений от воздействия единичных сил



**рисунок 3.** Амплитуды угловых перемещений от воздействия единичных моментов



**рисунок 4.** Система виброизоляции под ЭМИО

где  $K_3$  – коэффициент запаса, в данном случае равный 2.

В таблице 2 представлены допустимые уровни возмущений, создаваемые ЭМИО, при амплитудах угловых перемещений на местах крепления прецизионной аппаратуры, не превышающих 0.1 угловой секунды, для рассмотренного в работе примера.

**таблица 2** – Допустимые уровни возмущений, создаваемые ЭМИО

частота, Гц	$F_{\max}$ , Н	$M_{\max}$ , Н·м
10–25	0.00090	0.00080
25–50	0.00091	0.00060
50–75	0.00481	0.00030
75–100	0.10100	0.01265

Таким образом, решая задачу, обратную определению уровней вибровозмущений для прецизионной аппаратуры от работы ЭМИО, получаем допустимые уровни для самих источников вибровозмущений.

Существует вероятность возникновения ситуации, когда при удовлетворении требованиям по управляющим моментам для ЭМИО будет отсутствовать возможность удовлетворения требованиям по вибровозмущениям. В данном случае необходимо рассмотреть варианты по установке на борт КА средств виброзащиты, предлагаемых отделом динамики и виброзащиты космических конструкций ФГУП «НПО имени С.А. Лавочкина» (Ефанов В.В. и др., 2014; Кузнецов Д.А. и др., 2013). Одним из таких решений может быть установка системы виброизоляции под ЭМИО (Ермаков В.Ю. и др., 2014), представленная на рисунке 4, которая позволит уменьшить уровни воздействий от источников вибраций на прецизионную аппаратуру в 5–10 раз при полном сохранении управляющих сил и моментов, что также будет

способствовать увеличению срока службы самих ЭМИО.

## список литературы

Ермаков В.Ю., Телепнев П.П., Кузнецов Д.А. Магнитожидкостный виброизолатор // Патент на полезную модель № 147177. 2014.

Ефанов В.В., Бирюков С.А., Деменко О.Г. К вопросу снижения динамических нагрузок при срабатывании устройств разделения перспективных орбитальных астрофизических обсерваторий // Вестник ФГУП НПО им. С.А. Лавочкина. 2013. № 3. С. 21–26.

Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Цыплаков А.Е., Телепнев П.П. и др. Новый способ снижения вибровозмущений целевой аппаратуры на борту прецизионных космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2014. № 6 (79). С. 80–85.

Котомин А.А., Ефанов В.В., Душенок С.А., Тимофеев В.Н. Проблема снижения динамического воздействия на космические аппараты при срабатывании взрывных систем разделения // Фундаментальные и прикладные проблемы космонавтики. 2001. № 4. С. 34–39.

Кузнецов Д.А., Ермаков В.Ю., Телепнев П.П., Сова А.Н. Предложение по решению проблемы виброзащиты прецизионной оптико-электронной аппаратуры космического аппарата «СПЕКТР-УФ» // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2013. Т. 135, № 4. С. 17–20.

Телепнев П.П., Ефанов В.В., Кузнецов Д.А., Ермаков В.Ю. Анализ режимов работы космического аппарата «СПЕКТР-Р» для различных алгоритмов управления приводом остронаправленной антенны // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2014. № 3. С. 100–103.

Статья поступила в редакцию 16.03.2016 г.

## **ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ В ЖУРНАЛЕ**

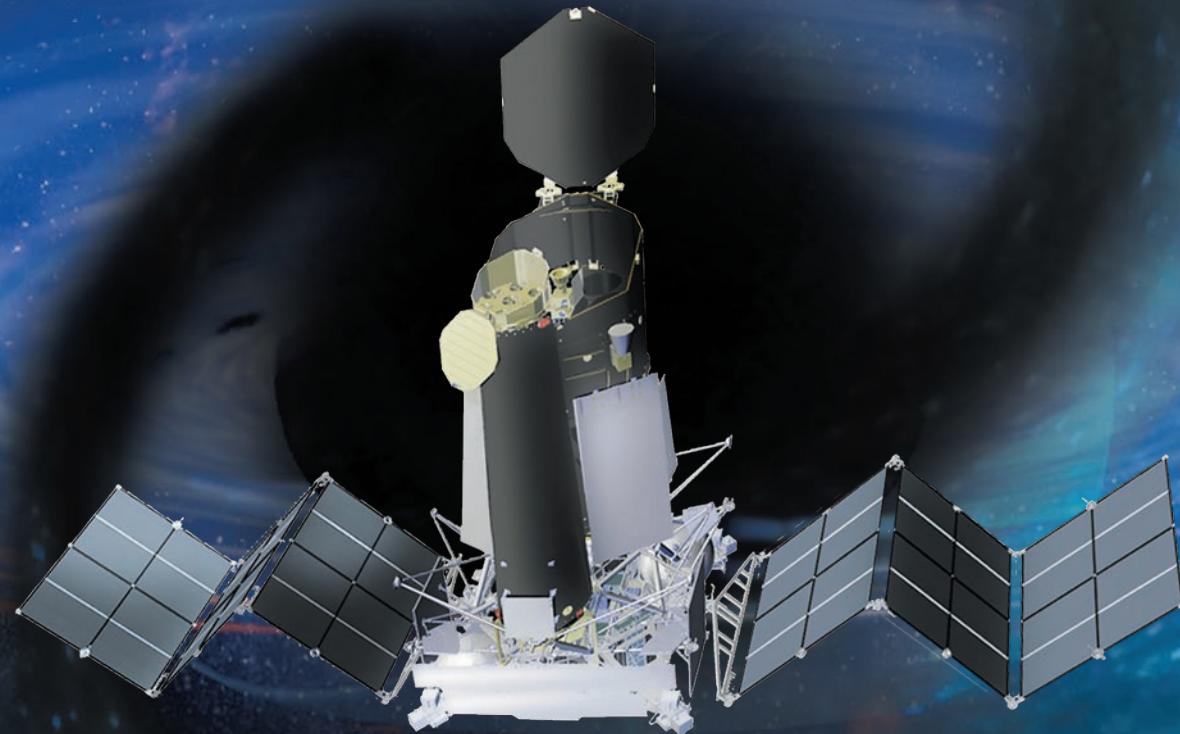
1. К публикации в журнале «Вестник «НПО имени С.А. Лавочкина» принимаются статьи, отвечающие критериям ВАК РФ по научной новизне и аprobации представленных результатов натурными экспериментами (испытаниями), летной эксплуатацией или патентами на изобретения (полезные модели).
  2. Статьи из других организаций направляются в адрес ФГУП «НПО имени 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 –  
«СТУДИЯ Вячеслава М. ДАВЫДОВА»  
подписано в печать 01.08.2016. формат 60x84<sub>8</sub>.  
бумага офсетная. печать офсетная. объем 14 печ. л. тираж 350 экз.  
отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ООО «Трек принт»  
Новокуркинское шоссе, д. 39, пом. 1, ком. 71, г. Москва, 125466

# КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ СПЕКТР-РГ

создаётся в России  
НПО имени С.А. Лавочкина  
и ИКИ РАН с кооперацией



несёт на борту рентгеновские телескопы:

АРТ-ХС (Россия)

eRosita (Германия)

основные научные задачи в рентгеновском диапазоне длин волн:

- обзор неба в режиме сканирования с высокой чувствительностью, угловым и энергетическим разрешением
- детальные исследования в режиме трёхосной стабилизации отдельных отобранных областей неба и новых источников

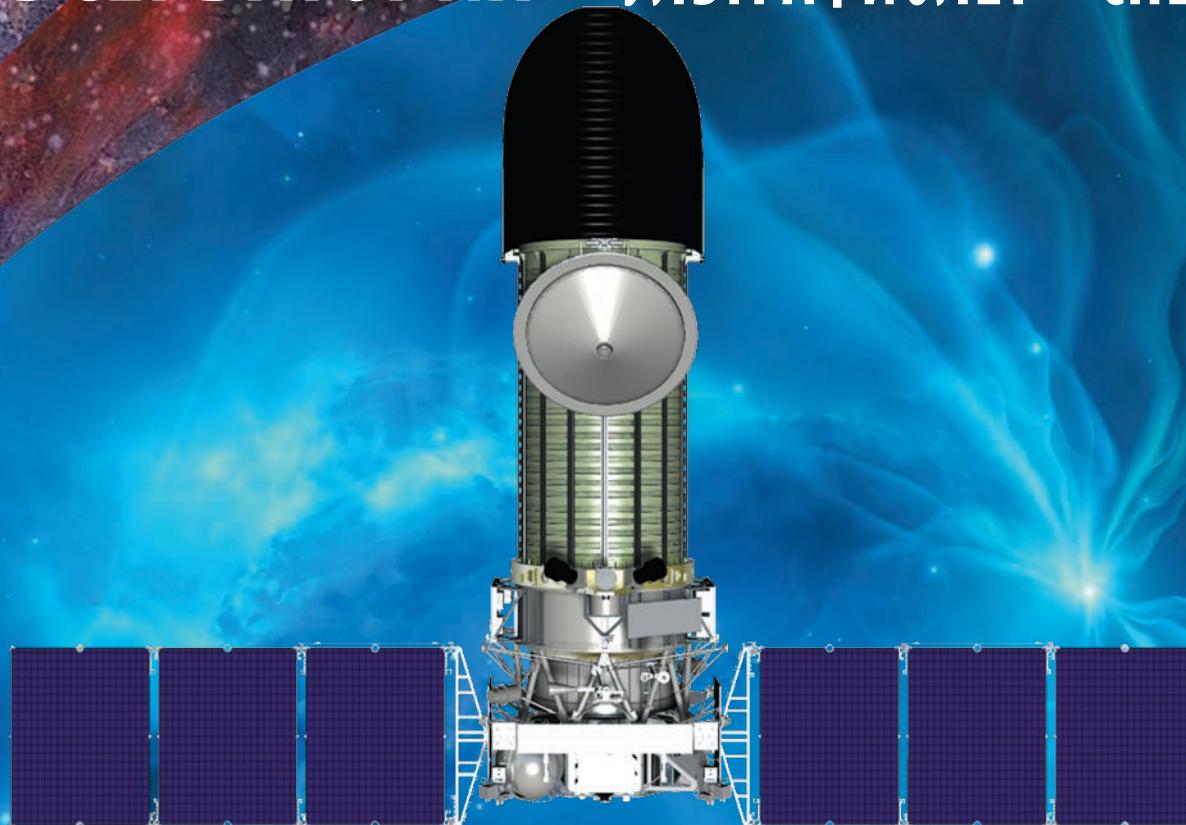
придёт на смету орбитальной международной обсерватории «ИНТЕГРАЛ»



В 2016 году исполнилось 50 лет запусков КА «ЛУНА-9», впервые в мире совершившего успешную посадку на Луну, и КА «ЛУНА-10» – первого искусственного спутника Луны. Эти аппараты созданы в ОКБ-1 Сергея Павловича Королёва, в НПО имени С.А. Лавочкина под руководством Георгия Николаевича Бабакина их конструкция и ряд служебных систем были значительно усовершенствованы, проведён комплекс наземных испытаний, осуществлён запуск с космодрома Байконур. В настоящее время в НПО имени С.А. Лавочкина развернуты работы по реализации новой отечественной лунной программы по исследованию в районе Южного полюса, предусматривающей четыре космические экспедиции с 2019 года, и переход на новое качество – начало освоения ресурсов Луны.

# ВСЕМИРНАЯ КОСМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ – УЛЬТРАФИОЛЕТ – СПЕКТР УФ

создаётся в России  
НПО имени С.А. Лавочкина  
и ИНАСАН с коопрацией



основные научные задачи:

- исследование эволюции Вселенной;
- физика акреции;
- изучение ранней эволюции звёзд типа Солнца и протопланетных дисков;
- изучение физико-химического состава атмосферы планет Солнечной системы и экзопланет

придёт на смену космической обсерватории имени Хаббла

