

ISSN 2618-7957

# КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И

# ТЕХНОЛОГИИ

# SPACECRAFTS & TECHNOLOGIES

# РЕШЕТНЕВ

основано 4 июня 1959 года



Технологическая платформа

## НИСС

Национальная Информационная  
Спутниковая Система

№2 (44)  
2023





# НИСС

Деятельность технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» направлена на скоординированное решение комплекса образовательных, научных, технических, технологических и экономических проблем создания и использования перспективных космических систем и комплексов.

Стратегической целью технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система» является разработка совокупности «прорывных» технологий для:

- радикального повышения показателей пользовательских свойств космических аппаратов новых поколений и доступности персональных пакетных космических услуг;
- значительного расширения присутствия на мировых рынках высокотехнологичной продукции и услуг в космической, телекоммуникационной и других некосмических отраслях экономики.

Журнал является официальным научным изданием технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система».

Сайт ТП «НИСС»: [tp.iss-reshetnev.ru](http://tp.iss-reshetnev.ru)



---

## **ОТРАСЛЕВАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СОЗВЕЗДИЕ РОСКОСМОСА: ТРАЕКТОРИЯ НАУКИ»**

В 2022 году был сделан очередной шаг в создании единой комплексной образовательной, научной и инновационной экосистемы, направленной на развитие кадрового и научного потенциала ракетно-космической отрасли – Госкорпорация «Роскосмос» сформировала консорциум опорных образовательных организаций высшего образования «Созвездие Роскосмоса».

Развитие устойчивой научно-технической кооперации организаций космической отрасли с вузовскими научными и инженерными школами было продолжено в рамках первой отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки».

Гостеприимным хозяином конференции в сентябре 2022 года стал Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова – один из ведущих технических вузов России, осуществляющий системную подготовку кадров для аэрокосмической, оборонной и других высокотехнологичных отраслей, и выполняющий комплекс научных исследований и разработок в интересах организаций Госкорпорации «Роскосмос».

Основными задачами прошедшей конференции стали:

- координация деятельности организаций Госкорпорации «Роскосмос» и опорных университетов при совместном формировании тематик исследований и разработок по прорывным направлениям научно-технологического развития ракетно-космической отрасли;
- формирование совместных научных и инженерных команд (проектных групп) для решения научно-технических и технологических задач в интересах организаций Госкорпорации «Роскосмос»;
- определение совместных наукоёмких и перспективных проектов в области создания космических технологий гражданского и двойного назначения.

В ходе конференции обсуждались проблемные вопросы и актуальные задачи по следующим направлениям:

- перспективные материалы и конструкции ракетно-космической техники;
- комплексные информационные сервисы на базе перспективных космических систем;
- интеллектуальные робототехнические системы и комплексы космического назначения;
- цифровые технологии проектирования и создания ракетно-космической техники;

- импортозамещение и импортонезависимость;
- подготовка инженерных кадров для опережающего развития ракетно-космической отрасли.

В рамках конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки» было проведено более 20 мероприятий, в числе которых пленарное заседание, секции по семи научным направлениям, круглый стол «Перспективные модели и механизмы научно-технической кооперации».

В конференции участвовали руководители, генеральные конструктора и ведущие специалисты Госкорпорации «Роскосмос» и её организаций: АО «ЦНИИМаш», ПАО «РКК «Энергия», АО «Российские космические системы», АО «РЕШЕТНЁВ», АО «Композит», ОАО МЗ «Арсенал», АО «НИИ ТП», АО «НПО им. С. А. Лавочкина», АО «Спутниковая система «Гонец» и многие другие, а также представители высших учебных заведений, вошедших в состав консорциума «Созвездие Роскосмоса»: МГТУ им. Н. Э. Баумана, БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, МФТИ, МАИ, СибГУ им. М. Ф. Решетнёва, НИЯУ МИФИ, МЭИ, ТУСУР, Технологического университета им. А. А. Леонова и ряда других.

Пленарные доклады были представлены исполнительным директором по перспективным программам и науке Госкорпорации «Роскосмос» А. В.Bloшенко, генеральным конструктором по автоматическим космическим системам и комплексам – заместителем генерального директора АО «ЦНИИМаш» В. В.Хартовым, академиком РАН и членом Президиума РАН Н. А. Тестоедовым, директором Института космических исследований РАН А. А. Петруковичем, директором отраслевого центра крупногабаритных трансформируемых механических систем АО «РЕШЕТНЁВ» В. И. Халимановичем.

Как отметил один из докладчиков пленарной сессии, «...наша главная цель сегодня – обеспечить контакт и взаимопонимание промышленности и научных школ. Чтобы научные коллективы, которые занимаются фундаментальными исследованиями и переводом их в прикладную плоскость, заранее понимали какие перед ними стоят ответственные задачи. А представители промышленности, которые занимаются созданием конкретных спутников, понимали какой уровень готовности технологий они могут использовать и внедрять уже сейчас».

В ходе работы секций были выделены наиболее перспективные направления, среди которых следует отметить создание транспортно-энергетических модулей без использования солнечных батарей, разработка перспективных ракет-носителей с использованием новых материалов и технологий производства, включая аддитивные технологии, организация серийного производства космической техники в интересах быстрого наращивания отечественных спутниковых группировок связи и дистанционного зондирования Земли, разработка перспективной российской орбитальной станции.

Настоящий специальный выпуск журнала «Космические аппараты и технологии» посвящен избранным трудам участников конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки».

Желаю всем участникам отраслевой научно-практической конференции «Созвездие Роскосмоса: траектория науки», которая будет проходить ежегодно на площадках ведущих технических университетов России, дальнейших успехов в подготовке кадров, осуществлении перспективных исследований и прорывных разработок в интересах ракетно-космической отрасли.

**А. В. Bloшенко**

**Исполнительный директор по перспективным  
программам и науке Госкорпорации «Роскосмос»**





ISSN 2618-7957

**КОСМИЧЕСКИЕ  
АППАРАТЫ И  
ТЕХНОЛОГИИ**

**SPACECRAFTS &  
TECHNOLOGIES**

Том 7

№ 2 (44)

2023

Выходит один раз в три месяца

Красноярский край  
Железногорск

# Космические аппараты и технологии

Главный редактор  
**Тестоедов Николай Алексеевич**  
академик РАН, д-р техн. наук, профессор,  
председатель редакционного совета (Железногорск)

Заместитель главного редактора  
**Халиманович Владимир Иванович**  
канд. физ.-мат. наук, профессор (Железногорск)

Ответственный секретарь  
**Хныкин Антон Владимирович**  
канд. техн. наук (Железногорск)

Редакционный совет  
**Алифанов Олег Михайлович**  
академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва)

**Аннин Борис Дмитриевич**  
академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

**Васильев Валерий Витальевич**  
академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Хотьково)

**Попов Гарри Алексеевич**  
академик РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва)

**Шабанов Василий Филиппович**  
академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск)

**Махутов Николай Андреевич**  
чл.-кор. РАН, д-р техн. наук, профессор (Москва)

**Петрукович Анатолий Алексеевич**  
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

**Шайдуров Владимир Викторович**  
чл.-кор. РАН, д-р физ.-мат. наук (Красноярск)

**Беляев Борис Афанасьевич**  
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

**Гарин Евгений Николаевич**  
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

**Косенко Виктор Евгеньевич**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Красильщиков Михаил Наумович**  
д-р техн. наук, профессор (Москва)

**Медведский Александр Леонидович**  
д-р физ.-мат. наук (Жуковский)

**Надирадзе Андрей Борисович**  
д-р техн. наук, профессор (Москва)

**Овчинников Сергей Геннадьевич**  
д-р физ.-мат. наук, профессор (Красноярск)

**Панько Сергей Петрович**  
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

**Пчеляков Олег Петрович**  
д-р физ.-мат. наук, профессор (Новосибирск)

**Хартов Виктор Владимирович**  
д-р техн. наук, профессор (Королёв)

**Чеботарев Виктор Евдокимович**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Чернявский Александр Григорьевич**  
(Королёв)

Редакционная коллегия  
**Головёнкин Евгений Николаевич**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Двирный Валерий Васильевич**  
д-р техн. наук, профессор (Железногорск)

**Лопатин Александр Витальевич**  
д-р техн. наук, профессор (Красноярск)

**Охоткин Кирилл Германович**  
д-р физ.-мат. наук, доцент (Железногорск)

**Пономарев Сергей Васильевич**  
д-р техн. наук (Томск)

**Матвеев Станислав Алексеевич**  
канд. техн. наук (Санкт-Петербург)

**Непомнящий Олег Владимирович**  
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

**Симунин Михаил Максимович**  
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

**Смотров Андрей Васильевич**  
канд. техн. наук (Жуковский)

**Сухотин Виталий Владимирович**  
канд. техн. наук, доцент (Красноярск)

**Хартов Станислав Викторович**  
канд. техн. наук (Красноярск)

## Ежеквартальный научный журнал

Издается с 2012 года

ISSN 2618-7957

Издатель и учредитель:  
Ассоциация «Технологическая платформа  
«Национальная информационная спутниковая система»

Журнал «Космические аппараты и технологии» – рецензируемый научный журнал технологической платформы «Национальная информационная спутниковая система». До 2018 года издавался под названием «Исследования наукограда».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство ПИ № ФС77-72862 от 22.05.2018 г.)

Импакт-фактор РИНЦ за 2021 г. – 0,283.

«Космические аппараты и технологии» публикуют оригинальные работы, обзорные статьи, очерки и обсуждения, охватывающие последние достижения в области космонавтики.

Тематические направления журнала:

- ракетно-космическая техника;
- новые материалы и технологии в космической технике;
- космическое приборостроение;
- космические услуги;
- инновации космической отрасли.

К публикации принимаются статьи, ранее нигде не опубликованные и не представленные к печати в других изданиях. Статьи, отбираемые для публикации в журнале, проходят закрытое (двойное слепое) рецензирование. Все материалы размещаются в журнале на бесплатной основе. Полнотекстовый доступ к электронной версии журнала возможен на сайтах [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [www.cyberleninka.ru](http://www.cyberleninka.ru), [www.readera.org](http://www.readera.org)

По решению Министерства науки и высшего образования Российской Федерации журнал «Космические аппараты и технологии» 11 июля 2019 года вошел в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Адрес учредителя, редакции и издателя:  
662972, Красноярский край, г. Железногорск,  
ул. Ленина, 52, корп. 4, ком. 224

e-mail: [spacecrafts.technologies@yandex.ru](mailto:spacecrafts.technologies@yandex.ru)  
<http://www.journal-niss.ru>

Подписной индекс журнала в каталоге «Пресса России» 39491  
Тираж 200 экз. Заказ 19333  
Дата выхода в свет 30.06.2023

Отпечатано Библиотечно-издательским комплексом  
Сибирского федерального университета  
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82а  
Тел.: (391) 206-26-16; <http://bik.sfu-kras.ru>  
E-mail: [publishing\\_house@sfu-kras.ru](mailto:publishing_house@sfu-kras.ru)

Свободная цена

Возрастная маркировка в соответствии  
с Федеральным законом № 436-ФЗ: 16+

# Spacecrafts & Technologies

Chief Editor

**Testoyedov Nikolay A.**

Academician of RAS, Doctor of Engineering,  
Professor, Chairman of Editorial Board (Russian Federation)

Deputy Chief Editor

**Khalimanovich Vladimir I.**

PhD in Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

Executive Secretary

**Khnykin Anton V.**

PhD in Engineering (Russian Federation)

Editorial Board

**Alifanov Oleg M.**

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Annin Boris D.**

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,  
Professor (Russian Federation)

**Popov Garry A.**

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Shabanov Vasily Ph.**

Academician of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,  
Professor (Russian Federation)

**Vasiliev Valery V.**

Academician of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Makhutov Nikolay A.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Petrukovich Anatoly A.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,  
Professor (Russian Federation)

**Shaidurov Vladimir V.**

Corresponding Member of RAS, Doctor of Physics and Mathematics,  
Professor (Russian Federation)

**Belyaev Boris A.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Chebotarev Victor E.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Garin Eugene N.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Khartov Victor V.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Kosenko Victor E.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Krasilshchikov Michael N.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Medvedtskiy Alexander L.**

Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation)

**Nadiradze Andrey B.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Ovchinnikov Sergey G.**

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

**Panko Sergey P.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Pchelyakov Oleg P.**

Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Russian Federation)

**Cherniavsky Alexander G.**

(Russian Federation)

Editorial Council

**Golovenkin Eugene N.**

Doctor of Engineering, Professor, Professor (Russian Federation)

**Dvirny Valery V.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Lopatin Alexander V.**

Doctor of Engineering, Professor (Russian Federation)

**Okhotkin Kirill G.**

Doctor of Physics and Mathematics, Associate Professor (Russian Federation)

**Ponomarev Sergey V.**

Doctor of Physics and Mathematics (Russian Federation)

**Khartov Stanislav V.**

PhD in Engineering (Russian Federation)

**Matveev Stanislav A.**

PhD in Engineering (Russian Federation)

**Nepomnyashy Oleg V.**

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

**Simunin Mikhail M.**

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

**Smotrov Andrey V.**

PhD in Engineering (Russian Federation)

**Sukhotin Vitaly V.**

PhD in Engineering, Associate Professor (Russian Federation)

Scientific quarterly journal

Published since 2012

ISSN 2618-7957

Publisher and Founder:

Association «Technology Platform

«National Information Satellite System»

«Spacecrafts & Technologies» is peer-reviewed scientific journal of Technology Platform «National Information Satellite System». Until 2018 was published under the title «The Research of the Science City».

The journal is registered by the the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications (PI certificate no. FS77-72862, May 22, 2018).

The journal publishes original papers, reviews articles, rapid communications and discussions covering recent advances in space.

The journal sections:

- Rocket and space equipment;
- New materials and technologies in space equipment;
- Space instrument engineering;
- Space Services;
- Innovations of the space industry.

«Spacecrafts & Technologies» publishes only original research articles. All articles are peer reviewed by international experts. Both general and technical aspects of the submitted paper are reviewed before publication.

The publication of manuscripts is free of charge.

The journal is on open access on [www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru), [www.cyberleninka.ru](http://www.cyberleninka.ru), [www.readera.org](http://www.readera.org)

**РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКАЯ ТЕХНИКА**

**М. И. Кислицкий**  
ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ  
И РАЗРАБОТОК БГТУ «ВОЕНМЕХ»  
ИМ. Д. Ф. УСТИНОВА ПО ТЕМАТИКЕ  
МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ  
И НЕКОТОРЫЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

**Е. А. Суворова, В. Е. Степанов, В. Л. Оленев**  
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ SPACEFIBRE ДЛЯ  
ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ

**О. В. Ширококов, С. А. Матвеев,  
Н. С. Слободзян, А. В. Горбунов**  
ОЦЕНКА МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ  
ВИБРОАКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОНАСОСНОГО  
АГРЕГАТА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**С. А. Матвеев, Н. С. Слободзян, А. А. Киселев,  
Ю. А. Жуков, Е. Б. Коротков**  
ПОВЫШЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ  
И ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ  
МЕХАНИЗМОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ  
КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**К. Е. Пономарев, И. В. Стрельников**  
ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ  
СПОСОБОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ  
ОТВЕТСТВЕННЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**КОСМИЧЕСКИЕ УСЛУГИ**

**Е. Ф. Чичкова, Д. А. Кочин, С. А. Рогачев**  
ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ  
СЕРВИС И ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА  
ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ЗОН ПО ДАННЫМ  
СПУТНИКОВОГО МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ

**И. П. Карачевцева, С. С. Дубов, М. В. Андреев,  
А. С. Гаров, А. Э. Зубарев, И. Е. Надеждина,  
Н. А. Козлова, Н. А. Слодарж**  
ОТКРЫТЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ  
ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ И ЦИФРОВЫЕ  
СЕРВИСЫ ДОСТУПА К НИМ

**П. Б. Далабаев, Б. М. Петрухин,  
И. В. Усовик, А. В. Богатый**  
ОБ ОПЫТЕ ИНТЕГРАЦИИ НАУЧНЫХ  
И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ  
В ПРОЕКТАХ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ  
АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ  
ПРОСТРАНСТВО

**ROCKET AND SPACE EQUIPMENT**

**M. I. Kislitsky**  
92 THE MAIN DIRECTIONS OF RESEARCH AND  
DEVELOPMENT OF BSTU «VOENMEH» NAMED  
AFTER D. F. USTINOV ON THE SUBJECT  
OF SMALL SPACECRAFT AND SOME RESULTS

**E. A. Suvorova, V. E. Stepanov, V. L. Olenev**  
100 ANALYSIS OF THE SPACEFIBRE TECHNOLOGY  
FOR THE HIGH-BANDWIDTH ONBOARD  
NETWORKS

**O. V. Shirobokov, S. A. Matveev,  
N. S. Slobodzyan, A. V. Gorbunov**  
107 ASSESSMENT OF VIBRATION SUPPRESSION  
METHODS FOR SPACECRAFT ELECTRIC PUMP  
UNIT

**S. A. Matveev, N. S. Slobodzyan, A. A. Kiselev,  
Yu. A. Zhukov, E. B. Korotkov**  
116 INCREASING THE STATIC AND DYNAMIC  
ACCURACY OF THE PARALLEL STRUCTURE  
MECHANISM FOR SPACE APPLICATION

**K. E. Ponomarev, I. V. Strelnikov**  
126 PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF VARIOUS  
METHODS OF VIBRATION PROCESSING IN THE  
WELDED STRUCTURES OF SPACECRAFT

**SPACE SERVICES**

**E. F. Chichkova, D. A. Kochin, S. A. Rogachev**  
132 INFORMATION AND ANALYSIS SERVICE  
AND TECHNOLOGY FOR MONITORING  
POTENTIALLY HAZARDOUS AREAS FROM  
SATELLITE MULTI-SPECTRAL SENSING DATA

**I. P. Karachevtseva, S. S. Dubov, M. V. Andreev,  
A. S. Garov, A. E. Zubarev, I. E. Nadezhdina,  
N. A. Kozlova, N. A. Slodarzh**  
142 OPEN SPATIAL DATA FOR THE EXPLORATION  
OF TERRITORIES AND DIGITAL SERVICES FOR  
ACCESSING THEM

**P. B. Dalabaev, B. M. Petrukhin,  
I. V. Usovik, A. V. Bogaty**  
153 ON THE EXPERIENCE OF INTEGRATING  
SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL INSTITUTIONS  
IN PROJECTS TO LIMIT ANTHROPOGENIC  
IMPACT ON NEAR-EARTH SPACE



<b>Н. А. Завьялова, С. С. Негодяев, А. А. Кузнецов, И. Н. Завьялов, И. И. Фукин, В. Ю. Семака, П. А. Гришин</b>	162	<b>N. A. Zavalova, S. S. Negodyaev, A. A. Kuznetsov, I. N. Zavalov, I. I. Fukin, V. Yu. Semaka, P. A. Grishin</b>
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ИНТЕГРАЛ» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГРУППИРОВОК И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ		SOFTWARE PACKAGE «INTEGRAL» FOR MODELING SPACE CONSTELLATIONS AND SPACE VEHICLES
<b><u>ИННОВАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ</u></b>		<b><u>INNOVATIONS OF THE SPACE INDUSTRY</u></b>
<b>М. В. Кубриков</b>	171	<b>M. V. Kubrikov</b>
ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ- МАНИПУЛЯТОРАМИ		DIGITAL TWIN IN THE SYSTEM OF EXTERNAL ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS

# ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК БГТУ «ВОЕНМЕХ» ИМ. Д. Ф. УСТИНОВА ПО ТЕМАТИКЕ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И НЕКОТОРЫЕ ИХ РЕЗУЛЬТАТЫ

**М. И. Кислицкий**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

*Развитие малых космических аппаратов требует решения ряда новых научно-технических проблем. Представлены основные направления исследований и разработок Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова по решению задач создания малых космических аппаратов, развертывания и поддержания орбитальных группировок малых космических аппаратов, управления орбитальными группировками. Представлены отдельные результаты этих работ, в частности, аванпроект малого космического разгонного блока с инновационным двухкомпонентным газовым ракетным двигателем на кислороде и водороде, эксплуатируемого совместно с ракетой-носителем сверхлегкого класса. Малый космический разгонный блок решает задачи межорбитальной транспортировки малых космических аппаратов. Он не имеет аналогов в отечественной ракетно-космической технике. Представлены варианты баллистически связанных групп малых космических аппаратов, способные обеспечить формирование на орбитах устойчивой квазистационарной распределенной апертуры с целью повышения эффективности космических систем связи и дистанционного зондирования Земли. Представлена разработка инновационного исполнительного механизма – двухосная поворотная платформа на основе пьезоэлектрических приводов. Данное устройство существенно превосходит традиционные электромеханические устройства на основе электроприводов по массе, габаритам, динамическим характеристикам и другим параметрам. Рассмотрены варианты применения данной поворотной платформы в составе служебных и целевых систем малых космических аппаратов. Показано, как это может обеспечить существенное повышение тактико-технических характеристик малых космических аппаратов.*

*Ключевые слова: малый космический аппарат, орбитальная группировка, малый космический разгонный блок, распределенная апертура, электромеханическое устройство, пьезоэлектрический привод.*

## Введение

В современной космонавтике быстро развивается направление, связанное с созданием и эксплуатацией космических систем на основе орбитальных группировок малых космических аппаратов. По данным зарубежных специалистов, в последние годы ~ 80 % выводимых на орбиты космических аппаратов (КА) относятся к классу малых.

Развитие этого направления ставит новые научно-технические проблемы, требующие свое-

го решения. Они связаны с формированием технического облика малых космических аппаратов (МКА), выводением МКА на рабочие орбиты, развертыванием орбитальных группировок и поддержанием их в заданном составе, оптимизацией баллистического построения группировок, управлением многоспутниковыми орбитальными группировками (ОГ), обеспечением межспутниковой связи и т. д.

Балтийский государственный технический университет (БГТУ) «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова ведет активную работу по решению широкого спектра указанных выше проблем, разрабатывая необходимые для этого методы, технологии, технические решения. В настоящей

статье приведены основные направления и некоторые результаты проводимых работ.

### 1. Создание и восполнение орбитальных группировок малых космических аппаратов

ОГ МКА необходимо развернуть и затем постоянно поддерживать в заданном составе. Большинство МКА функционирует на низких орбитах высотой от 500 км до 1500 км. Развертывание ОГ производится большими ракетами-носителями (РН) с выведением до десятков МКА в одном пуске. В дальнейшем в процессе функционирования МКА неизбежно выходят из строя, причем по одному и в случайном порядке. В связи с этим актуальна задача восполнения ОГ, т. е. выведения на рабочие орбиты единичных МКА массой 50–200 кг. Существующие средства выведения (ракеты-носители и разгонные блоки) являются чересчур мощными для МКА, в связи с чем их использование для решения подобных задач нецелесообразно. Необходимы ракета-носитель сверхлегкого класса (РН СЛК) и малый космический разгонный блок (МРБ), однако в настоящее время таковых не существует, по крайней мере, в России.

БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова (в части научно-исследовательских работ) совместно с ООО «ВНХ-Энерго» (в части проектно-конструкторских работ) в рамках конкурса Научно-технологической инициативы Российской Федерации (группа «Аэронет») разработали аванпроекты РН СЛК и МРБ, которые обеспечивают решение рассматриваемой задачи в соответствии с техническим заданием и заняли первые места в указанном конкурсе в 2022 году. Здесь рассмотрен МРБ, так как он фактически представляет собой МКА с относительно большой двигательной установкой (ДУ).

Анализ потребностей потенциальных потребителей показал, что значительной части потребителей требуется максимально быстрая доставка МКА на рабочую орбиту и в заданную орбитальную позицию. Это означает, что МРБ должен обеспечивать перевод МКА с опорной орбиты на рабочую гомановским переходом за полвитка, т. е. за время не более 1 часа. Показано, что при заданной массе полезного груза РН СЛК, выводимой на круговую опорную орбиту высотой 500 км (250 кг), ограничении по массе МРБ (80 кг) и высотах рабочих орбит МКА до 1500 км требуемый уровень тяги маршевого ракетного двигателя (РД) МРБ – порядка десятков–сотен ньютонов. По нашей оценке, с учетом баллистических факторов и конструктивных ограничений со стороны РД оптимальный уровень тяги двигателя МРБ составляет ~ 100 Н [1]. В материалах аванпроекта определен технический облик МРБ. МРБ массой

80 кг обеспечит транспортировку МКА массой до 150 кг с опорной орбиты высотой 500 км на рабочие орбиты высотой до 1500 км и расстановку их в заданные орбитальные позиции [1; 2]. Предложены также двух- и трехступенчатые конфигурации такого МРБ, совместимые с РН СЛК. Они обеспечат реализацию высокоэнергетических миссий. В табл. 1 приведены баллистические возможности МРБ при транспортировке полезной нагрузки (ПН) с круговой орбиты высотой 500 км. По предварительной оценке трехступенчатый МРБ способен обеспечить доставку к Луне МКА массой до 19 кг.

Таблица 1

Баллистические возможности МРБ

Масса ПН, кг	Количество ступеней МРБ	Максимальная достижимая высота круговой орбиты, км
75	1	2500
150	1	1700
75	2	3638
150	2	2850
75	3	5151
150	3	3973

МРБ формируется по модульному принципу и включает в себя отсек двигательной установки и приборный отсек. На рис. 1 представлен общий вид МРБ.

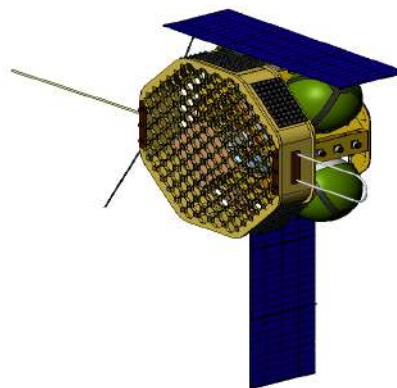


Рис. 1. Общий вид МРБ

На рис. 2 представлен общий вид трехступенчатого МРБ вместе с ПН.

При разработке этого проекта были использованы потенциал научной школы системного проектирования ракетно-космической техники и научно-технический задел БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, проведен большой объем научных исследований. Разработан ряд инновационных технических решений, в частности:

- высокоэффективный двухкомпонентный газовый ракетный двигатель (ДГРД) тягой 100 Н



Рис. 2. Общий вид трехступенчатого МРБ с ПН

на газообразных кислороде и водороде с удельной тягой 410 с; на кафедре двигательных и энергетических установок БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова разработан и изготовлен с использованием аддитивных технологий опытный образец ДГРД, проведены его испытания (рис. 3);

- предложено установить маршевый двигатель МРБ на поворотной платформе на базе пьезоэлектрических приводов, разработанной специалистами БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, что обеспечит высокоэффективное управление вектором тяги двигателя и позволит решить проблему смещения центра масс связки МРБ–ПН в процессе выработки топлива, а также при поэтапном отделении ПН в процессе полета МРБ, избежав необходимости применять тяжелые мощные маховики;

- предложено и обосновано дополнительное использование МРБ после завершения транспортной миссии в качестве космического аппарата для решения дополнительных целевых задач; это значительно повысит эффективность изделия.



Рис. 3. Испытания опытного образца ракетного двигателя на газообразных кислороде и водороде в лаборатории БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова

Создание МРБ существенно удешевит доступ в космос для широкого спектра потре-

бителей. Результаты маркетинговых исследований подтверждают высокую востребованность МРБ на российском и зарубежном рынках.

В дальнейшем на базе данного МРБ планируется развивать космические средства для орбитального обслуживания КА и для очистки околоземного космического пространства от космического мусора.

## 2. Управление орбитальными группировками МКА

После развертывания ОГ необходимо обеспечить решение задачи управления многоспутниковой ОГ МКА. Здесь также возникают новые задачи, не имеющие аналогов при управлении большими КА. БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова постоянно ведет исследования в данном направлении. Получены новые научные результаты [3–6].

В частности, новой специфической задачей является построение стационарных или квазистационарных конфигураций МКА на орбитах в целях реализации распределенной апертуры. Реализация распределенной апертуры (РА) в космосе позволит существенно снизить потребные массы бортовых антенн и телескопов по сравнению с традиционными моноблочными конструкциями и повысить эффективность решения задач дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и космической связи. В этом случае каждый МКА является элементарным приемником/приемопередатчиком электромагнитного излучения.

Построение требуемой для распределенной апертуры постоянной относительно земной поверхности конфигурации МКА на низких орбитах представляет собой сложную нетривиальную задачу. Учитывая законы орбитальной баллистики, сформировать абсолютно статическую конфигурацию МКА на орбитах невозможно. Эти проблемы активно исследуются, в том числе за рубежом [7].



В результате проведенных исследований предложены варианты конфигураций в виде баллистически связанных групп (БСГ) МКА [8]. В этих вариантах МКА образуют определенную базовую конфигурацию в проекции на плоскость наблюдения. При этом МКА периодически изменяют свое положение друг относительно друга, но закон этого изменения хорошо известен. Поэтому в рассматриваемых вариантах реализация распределенной апертуры возможна (с учетом внесения поправок на перемещение МКА). В варианте 1 два МКА разведены вдоль плоскости орбиты относительно центрального МКА (ЦМКА). Два других МКА разведены в разные стороны по наклонению орбиты и еще два разведены по долготе восходящего узла. В результате продольная база апертуры постоянна, а поперечная база пульсирует с двойной орбитальной частотой, изменяясь по линейному закону. В варианте 2 параметры орбит МКА подбираются таким образом, что в проекции на земную поверхность периферийные МКА вращаются вокруг ЦМКА по круговым орбитам [9]. В настоящее время специалистами БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова проводится комплексное исследование разработанных вариантов построения БСГ.

Также проводятся исследования по оптимизации баллистического построения ОГ для решения задач ДЗЗ таким образом, чтобы обеспечить как глобальное, так и оперативное региональное наблюдение при минимально необходимом количестве КА в составе ОГ. Получены научные результаты, важные для практики [10–12].

### 3. Повышение тактико-технических характеристик МКА за счет использования инновационных исполнительных механизмов

Ряд работ университета направлен на повышение тактико-технических характеристик (ТТХ) МКА. В частности, как отмечено выше, специалистами БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова разработан новый вид электромеханических устройств (ЭМУ) на основе пьезоэлектрических приводов (ПЭП) [13; 14]. Данное устройство обладает следующими достоинствами:

- малая масса;
- высокое развиваемое усилие при малых габаритах;
- высокая точность позиционирования;
- очень высокая скорость срабатывания;
- стойкость к воздействующим факторам космического пространства: криогенным температурам, вакууму, радиации;
- низкий уровень генерируемых электромагнитных помех;

- низкий уровень механических и вибрационных воздействий на КА.

Основные характеристики варианта платформы [13] (рис. 4):

- масса – не более 68 г (вместе с блоком управления – не более 200 г);
- углы позиционирования – до 30°;
- точность позиционирования – 10";
- скорость позиционирования – до 500 рад/с;
- масса размещаемого на платформе оборудования – до 2 кг;
- потребление электроэнергии: в рабочем режиме – 5 Вт, в режиме ожидания – 0,3 Вт.

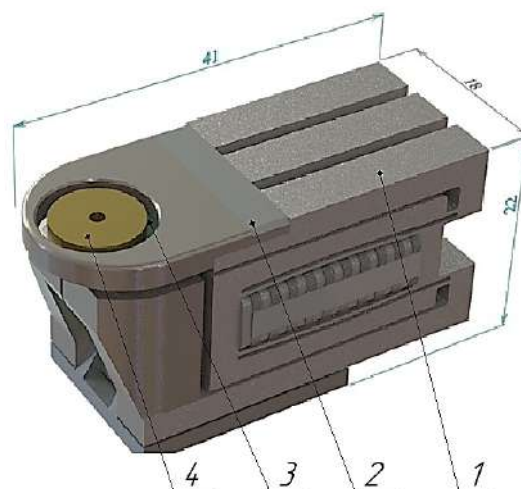


Рис. 4. Общий вид поворотной платформы

Применение подобных поворотных платформ (ПП) в составе различных бортовых систем обеспечит значительное повышение ТТХ МКА. Малая масса (десятки–сотни граммов) позволяет использовать их даже в составе наноспутников.

Приведем некоторые примеры применения подобных поворотных платформ в космической технике:

1. Управление направлением вектора тяги двигателя коррекции КА. При смещении в полете центра масс (ЦМ) КА, обусловленном расходом рабочего тела ДУ или другими причинами, возникает «промах» вектора тяги жестко закрепленного двигателя мимо ЦМ (так называемый эксцентриситет тяги). В результате на МКА действует момент, который возмущает угловое движение МКА, отклоняя его от заданного. Для компенсации этого момента приходится применять мощные тяжелые исполнительные органы (маховики или двигатели ориентации). Размещение двигателя коррекции на поворотной платформе дает возможность оперативно переориентировать вектор тяги на текущее положение ЦМ, за счет чего указанный возмущающий момент обнуляется. В результате снижаются потребная масса и электропотребление исполнительных органов стабилизации МКА.

2. Установка солнечных батарей (СБ) на ПП позволит ориентировать их на Солнце, поворачивая по мере необходимости вокруг одной или двух осей. Это снижает требуемую площадь СБ или увеличивает энерговооруженность МКА. Применение предлагаемой платформы позволит впервые применить ориентируемые СБ на наноспутниках.

3. Размещение на высокодинамичной ПП бортовых устройств МКА, требующих оперативного наведения. Это даст возможность использовать на МКА устройства, ориентируемые на быстро перемещающиеся объекты: остронаправленные антенны, что повышает скорость передачи информации и скрытность передачи в радиодиапазоне; лазерные устройства, в том числе для межспутниковой связи и др.

4. Применение ПП для вращения по крену и тангажу зеркала оптико-электронной аппаратуры ДЗЗ. В настоящее время съемка земной поверхности осуществляется путем поворотов КА по крену вправо и влево от трассы полета в соответствии с заданной программой, чтобы навести относительно узкую зону захвата оптико-электронного комплекса (ОЭК) на требуемый участок. Максимальное значение указанных углов поворота у современных КА ДЗЗ составляет 30–45°. Продолжительность поворота на 45° составляет для современных КА ДЗЗ от 30 с до 120 с. При типичной высоте орбиты КА 600 км скорость бега подспутниковой точки по земной поверхности составляет ~ 7 км/с. Это означает, что за время поворота КА пролетит 210–840 км, а при повороте на 90° (предельный случай) указанное расстояние составит 420–1300 км. В процессе поворота съемка выполняться не может ввиду возможного смаза изображения, несмотря на то, что здесь могут быть районы, съемка которых необходима. Фактически указанные участки представляют собой «мертвые зоны» (МЗ), на которых КА не может выполнять целевую задачу. Совокупная длительность пролета МЗ может составлять значительную долю срока активного существования КА. Наличие МЗ значительно снижает выходной эффект аппарата в сравнении с теоретически достижимым при отсутствии данного ограничения. Дальнейшее увеличение скорости поворота КА невозможно ввиду возрастания угловых перегрузок и наличия в составе аппарата крупногабаритных нежестких конструкций (СБ, антенны и др.).

Для сокращения МЗ предлагается перейти от поворотов КА в целом к поворотам только зеркала ОЭК вместе с чувствительными элементами, изменив соответствующим образом конструкцию ОЭК. Момент инерции зеркала меньше момента инерции КА примерно на два порядка. Это значит, что при существующих ограничениях на остаточ-

ную угловую скорость станут приемлемыми значительно более быстрые повороты.

Отметим, что на современных КА ДЗЗ востребованы быстрые повороты не только по крену, но и по тангажу. Повороты по тангажу нужны для реализации стереоскопической съемки, видеосъемки, а также новых технологий повышения разрешающей способности снимков, которые требуют многократной съемки одного и того же участка земной поверхности за один пролет. При использовании традиционных технологий для реализации поворотов вокруг двух ортогональных осей необходимо установить зеркало в кардановом подвесе и использовать два электропривода (по одному на каждую ось поворота). Это приведет к существенному увеличению массы, габаритов и электропотребления оптико-электронного комплекса. В этом состоит серьезный недостаток карданового подвеса, поэтому такое решение редко применяется в ОЭК космического базирования.

Мы предлагаем установить зеркало ОЭК вместе с чувствительными элементами на двухосной поворотной платформе на основе ПЭП. Это существенно снизит массу и габариты в сравнении с вариантом карданового подвеса и позволит многократно повысить скорость поворота зеркала без увеличения динамических нагрузок на КА. В результате значительно вырастет производительность КА ДЗЗ.

## Заключение

В настоящей статье представлены некоторые результаты исследований и разработок специалистов БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в области создания малых космических аппаратов, развертывания, поддержания и управления орбитальными группировками малых космических аппаратов. В связи с ограниченностью объема статьи они не в полной мере охватывают спектр работ университета по данной тематике, однако дают представление об основных направлениях работ и полученных результатах.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект «Создание опережающего научно-технического задела в области разработки передовых технологий малых газотурбинных, ракетных и комбинированных двигателей сверхлегких ракет-носителей, малых космических аппаратов и беспилотных воздушных судов, обеспечивающих приоритетные позиции российских компаний на формируемых глобальных рынках будущего», № FZWF-2020-0015).

## Список литературы

- [1] Кислицкий М. И. Коммерческий малый космический разгонный блок. Оценка вариантов и стратегия создания // Материалы 56-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Калуга. 2021. Ч. 1. С. 233–235.
- [2] Кислицкий М. И. Коммерческий малый космический разгонный блок для быстрых перелетов // Материалы 57-х Научных чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К. Э. Циолковского. Калуга. 2022. С. 257–262.
- [3] Popov A. M., Kostin I., Fadeeva Ju., Andrievsky B. Development and Simulation of Motion Control System for Small Satellites Formation // Electronics. 2021. vol. 10. issue 24. doi: 10.3390/electronics10243111.
- [4] Andrievsky B., Fradkov A. L., Kudryashova E. V. Control of Two Satellites Relative Motion over the Packet Erasure Communication Channel with Limited Transmission Rate Based on Adaptive Coder // Electronics. 2020. vol. 9. issue 12. doi: 10.3390/electronics9122032.
- [5] Андриевский Б. Р., Кузнецов Н. В., Попов А. М. Алгоритмы аэродинамического управления относительным движением двух спутников по околокруговой орбите // Дифференциальные уравнения и процессы управления. 2020. № 4. С. 28–58.
- [6] Andrievsky B., Popov A. M., Kostin I., Fadeeva Ju. Modeling and Control of Satellite Formations: A Survey // Automation. 2022. vol. 3. issue 3. pp. 511–544. doi: 10.3390/automation3030026.
- [7] Godard, Kumar K. D. Fault Tolerant Reconfigurable Satellite Formations Using Adaptive Variable Structure Techniques // Journal of Guidance, Control and Dynamics. 2010. vol. 33. no. 3. pp. 969–984. doi: 10.2514/1.38580.
- [8] Кислицкий М. И. О формировании распределенной апертуры с использованием малых космических аппаратов // Сборник тезисов XLVI Академических чтений по космонавтике, посвященные памяти акад. С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства. М. 2022. Т. 1. С. 95–97.
- [9] Eyer J. K. A dynamics and control algorithm for low Earth orbit precision formation flying satellites. Graduate Department of Aerospace Science and Engineering, University of Toronto, 2009. 215 p.
- [10] Ермолаев В. И., Буксар М. Ю. Способы оперативного наблюдения заданных районов земной поверхности космическими аппаратами дистанционного зондирования Земли // Сборник тезисов XLV Академических чтений по космонавтике, посвященных памяти акад. С. П. Королева. М. 2021. С. 71–75.
- [11] Ермолаев В. И., Буксар М. Ю. Особенности проектирования малых космических аппаратов системы оперативного мониторинга земной поверхности // Тезисы докладов Междунар. конф. «Космические системы». МАИ. 2021. С. 37–38.
- [12] Ермолаев В. И., Цируль Д. Г. Способ наблюдения земной поверхности из космоса. Пат. № 2670081 Российская Федерация, 2018. Бюл. № 29.
- [13] Горбунов А. В., Кислицкий М. И., Матвеев С. А., Слободзян Н. С. Перспективные области применения в космической технике электромеханических устройств на основе пьезоэлектрических приводов // Сборник тезисов XLIV Академических чтений по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. М. 2020. Т. 1. С. 86–88.
- [14] Горбунов А. В., Кислицкий М. И., Матвеев С. А., Слободзян Н. С. Пути повышения технических характеристик космических аппаратов за счет использования пьезоэлектрических технологий // Тезисы докладов Восьмой Междунар. науч.-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». М. 2020. С. 18–20.

## THE MAIN DIRECTIONS OF RESEARCH AND DEVELOPMENT OF BSTU «VOENMEH» NAMED AFTER D. F. USTINOV ON THE SUBJECT OF SMALL SPACECRAFT AND SOME RESULTS

**M. I. Kislitsky**

*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

*The development of small spacecrafts requires the solution of a number of new scientific and technical problems. The main directions of research and development of the Baltic State Techni-*

cal University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov on solving the problems of creating small spacecrafts, deploying and maintaining orbital constellations of the small spacecrafts, and managing orbital groupings are presented. Some results of these works are presented, in particular, the preliminary design of a small space tug with an innovative two-component gas rocket engine powered by oxygen and hydrogen, operated in conjunction with an ultralight class launch vehicle. Small space tug solves the problems of interorbital transportation of the small spacecrafts. It has no analogues in the Russian rocket and space technology. Variants of ballistically coupled groups of small spacecrafts are presented that can ensure the formation of a stable quasi-stationary distributed aperture in orbits in order to increase the efficiency of space communication systems and remote sensing of the Earth. The development of an innovative actuator – a two-axis rotary platform based on piezoelectric drives is presented. This device significantly exceeds traditional electromechanical devices based on electric drives in terms of weight, dimensions, dynamic characteristics and other parameters. The variants of the application of this rotary platform as part of the service and target systems of the small spacecrafts are considered. It is shown how this can provide a significant increase in the tactical and technical characteristics of the small spacecrafts.

*Keywords:* small spacecraft, constellation, small space tug, distributed aperture, electromechanical device, piezoelectric drive.

## References

- [1] Kislitsky M. I. *Kommercheskij malyj kosmicheskij razgonnyj blok. Ocenka variantov i strategiya sozdaniya* [Commercial small space upper stage. Evaluation of options and strategy of creation] // Proceedings of the 56th scientific readings dedicated to the development of the scientific heritage and the development of the ideas of K. E. Tsiolkovsky, Kaluga, 2021, part 1, pp. 233–235. (In Russian)
- [2] Kislitsky M. I. *Kommercheskij malyj kosmicheskij razgonnyj blok dlya bystryh pereletov* [Commercial small space upper stage for fast flights] // Proceedings of the 57th Scientific Readings dedicated to the development of the scientific heritage and the development of the ideas of K. E. Tsiolkovsky, Kaluga, 2022, pp. 257–262. (In Russian)
- [3] Popov A. M., Kostin I., Fadeeva Ju., Andrievsky B. Development and Simulation of Motion Control System for Small Satellites Formation // *Electronics*, 2021, vol. 10, issue 24. doi: 10.3390/electronics10243111.
- [4] Andrievsky B., Fradkov A. L., Kudryashova E. V. Control of Two Satellites Relative Motion over the Packet Erasure Communication Channel with Limited Transmission Rate Based on Adaptive Coder // *Electronics*, 2020, vol. 9, issue 12. doi: 10.3390/electronics9122032.
- [5] Andrievsky B. R., Kuznetsov N. V., Popov A. M. *Algoritmy aerodinamicheskogo upravleniya odnositel'nyim dvizheniem dvuh sputnikov po okolo krugovoj orbite* [Algorithms for aerodynamic control of relative motion two satellites in a near circular orbit] // *Differential Equations and Control Processes*, 2020, no. 4, pp. 28–58.
- [6] Andrievsky B., Popov A. M., Kostin I., Fadeeva Ju. Modeling and Control of Satellite Formations: A Survey // *Automation*, 2022, vol. 3, issue 3, pp. 511–544. doi: 10.3390/automation3030026.
- [7] Godard, Kumar K. D. Fault Tolerant Reconfigurable Satellite Formations Using Adaptive Variable Structure Techniques // *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 2010, vol. 33, no. 3, pp. 969–984. doi: 10.2514/1.38580.
- [8] Kislitsky M. I. *O formirovanii raspredelennoj apertury s ispol'zovaniem malyh kosmicheskikh apparatov* [On the formation of a distributed aperture using small spacecraft] // Collection of abstracts of the XLVI Academic lectures on astronautics, dedicated to the memory of S. P. Korolev and other outstanding domestic scientists-pioneers of outer space exploration, Moscow, 2022, vol. 1, pp. 95–97. (In Russian)
- [9] Eyer J. K. A dynamics and control algorithm for low Earth orbit precision formation flying satellites. Graduate Department of Aerospace Science and Engineering, University of Toronto, 2009, 215 p.
- [10] Ermolaev V. I., Buksar M. Yu. *Sposoby operativnogo nablyudeniya zadannyh rajonov zemnoj poverhnosti kosmicheskimi apparatami distancionnogo zondirovaniya Zemli* [Methods of operational observation of given areas of the earth's surface by spacecraft for remote sensing of the Earth] // Collection of abstracts of the XLV Academic lectures on astronautics, dedicated to the memory of S. P. Korolev, Moscow, 2021, pp. 71–75. (In Russian)
- [11] Ermolaev V. I., Buksar M. Yu. *Osobennosti proektirovaniya malyh kosmicheskikh apparatov sistemy operativnogo monitoringa zemnoj poverhnosti* [Features of designing small spacecraft for operational monitoring of the Earth's surface] // Abstracts of the international conference «Space Systems», MAI, 2021, pp. 37–38. (In Russian)
- [12] Ermolaev V. I., Tsirul D. G. *Sposob nablyudeniya zemnoj poverhnosti iz kosmosa* [A method of observing the Earth's surface from space]. Patent RU 2670081, 2018, bulletin no. 29.
- [13] Gorbunov A. V., Kislitsky M. I., Matveev S. A., Slobodzeyan N. S. *Perspektivnye oblasti primeneniya v kosmicheskoy tekhnike elektromekhanicheskikh ustrojstv na osnove p'ezoelektricheskikh privodov* [Promising areas of application in



space technology of electromechanical devices based on piezoelectric drives] // Collection of abstracts of the XLIV Academic readings on cosmonautics dedicated to the memory of Academician S. P. Korolev and other outstanding Russian scientists – pioneers of space exploration, Moscow, 2020, vol. 1, pp. 86–88. (In Russian)

- [14] Gorbunov A. V., Kislitsky M. I., Matveev S. A., Slobodzyan N. S. *Puti povysheniya tekhnicheskikh harakteristik kosmicheskikh apparatov za schet ispol'zovaniya p'ezoelektricheskikh tekhnologij* [Ways to improve the technical characteristics of spacecraft through the use of piezoelectric technologies] // Abstracts of the Eighth International scientific-technical conference «Actual problems of creating space systems for remote sensing of the Earth», Moscow, 2020, pp. 18–20. (In Russian)

## Сведения об авторе

*Кислицкий Михаил Иванович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова. Окончил Ленинградский механический институт в 1972 году. Область научных интересов: исследование и освоение космоса.

## АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИИ SPACEFIBRE ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ БОРТОВЫХ СЕТЕЙ

Е. А. Суворова, В. Е. Степанов, В. Л. Оленев✉

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

*В статье представлен анализ перспективного международного стандарта для обмена данными на борту летательных аппаратов различного назначения – SpaceFibre. Приводится обоснование необходимости использования данного стандарта для бортовых сетей нового поколения. Полученные результаты основаны на многолетнем опыте работы с семейством открытых международных стандартов SpaceWire/SpaceFibre. Авторами представлены основные проблемы, найденные в SpaceFibre, а также приведены пути их решения. Первая проблема связана с использованием многоканальной передачи данных в перспективных российских проектах, а также необходимостью увеличения пропускной способности с использованием уже существующего оборудования и физических кабелей. Необходима разработка новых методов и алгоритмов передачи и создание полностью отечественной версии уровня multilane для описываемого стандарта. Вторая проблема относится к организации передачи данных в сетях SpaceFibre с большим количеством узлов и сложной схемой потоков передачи данных, она является следствием недостаточно проработанного сетевого уровня стандарта. Авторы приводят возможные способы решения обнаруженных недостатков стандарта при помощи концепции программно-реконфигурируемых сетей. Проведение доработки стандарта SpaceFibre в части озвученных проблем позволит повысить эффективность самого протокола, а также учесть все возможные замечания до этапа создания отечественного ГОСТ по SpaceFibre.*

*Ключевые слова:* бортовая сеть, SpaceFibre, многополосная передача, программно-реконфигурируемая сеть, SDN.

### Введение

Современные бортовые сети состоят из большого количества элементов с различной функциональностью. Все эти элементы связаны между собой через инфраструктуру бортовой сети. Основной тенденцией для космической индустрии является переход от шинных топологий к сетевым технологиям организации бортовых сетей космических аппаратов. Передовым решением в этой сфере является семейство протоколов SpaceWire, которые просты для понимания и компактны в реализации. Технология SpaceWire была испробована в реальных зарубежных миссиях, а в настоящее время интегрируется и в отечественные новые космические аппараты. Немало способствовала этому разработка российского ГОСТ для бортовых космических сетей, который назвали SpaceWire-RUS [1].

По мере роста размера сетей информационные потоки становятся более плотными, а требо-

вания и ограничения – более строгими. Поэтому в 2019 году был выпущен протокол следующего поколения SpaceFibre [2]. Стандарт осуществляет передачу данных по электрическим или оптоволоконным кабелям, работает на гигабитных скоростях передачи и обеспечивает функции качества сервиса и обнаружения неисправностей, изоляции и восстановления, обеспечивая высокую надежность.

Он совместим со стандартом SpaceWire в части форматов пакетов, но в части поддержки механизмов качества сервиса (Quality of Service, QoS) эти стандарты существенно различаются. На физическом уровне поддерживается гальваническая развязка, что является существенным преимуществом для его применения.

Стандарт SpaceFibre поддерживает такие механизмы QoS как приоритеты, планирование, гарантированная пропускная способность. Для этого используются виртуальные каналы и виртуальные сети, в которых ресурсы физического канала разделяются между несколькими виртуальными каналами в соответствии с заданными параметрами качества сервиса.

✉ Valentin.Olenev@guap.ru

SpaceFibre выглядит многообещающим решением для бортовых сетей, однако и он не лишен недостатков, которые можно было бы исправить в российской версии стандарта и использовать для отечественных проектов.

## 1. Анализ проблемы многополосной передачи данных в SpaceFibre

Самая первая проблема, с которой столкнулись разработчики аппаратных реализаций SpaceFibre, – это уровень многополосной передачи (Multilane Layer, многоканальный уровень), механизмы которого запатентованы компанией StarDundee Inc. Он показан на рис. 1, где отображен стек протоколов SpaceFibre. Протокол может работать по одной линии, но, чтобы не терять возможность значительно увеличить пропускную способность каналов SpaceFibre, необходимо разработать свою собственную реализацию уровня многоканальной передачи.



Рис. 1. Уровневое представление стека протоколов SpaceFibre

Многоканальная передача – способ увеличения количества передаваемой информации в единицу времени за счет увеличения количества каналов без их качественного изменения. Многоканальная передача применяется при невозможности изменить каналы из-за строго фиксированных стандартов, необходимости использовать именно более медленные каналы из-за их свойств, например, помехоустойчивости или других особенностей.

При использовании многоканальной передачи можно выделить несколько ключевых отличительных черт:

- «высокоскоростной» входящий поток блоков данных (Data Unit, DU);
- наличие демультиплексора и мультиплексора;
- набор «низкоскоростных» каналов;
- результирующий «высокоскоростной» выходящий поток данных.

Обобщенная структура многополосного протокола показана на рис. 2.

В современных технологиях и протоколах, таких как PCI-Express, RapidIO, Infiniband, 40G/100G Ethernet и MIPI UniPro используются относительно небольшие блоки данных, такие как слова и символы. Необходимо использовать лучшие стороны каждого из этих протоколов для реализации российской версии стандарта SpaceFibre. Соответственно он должен иметь возможность поддерживать асимметричные линии, поддерживать любое возможное количество линий. Также существует набор технических требований индустрии, включающий такие механизмы, как автоматическое изменение количества используемых каналов и совместная работа с механизмом планирования. Такие требования представлены в обзорах [3; 4].

Для верификации и валидации разрабатываемых решений и новых желаемых черт используется множество подходов, одним из которых является написание и использование модели на языке SDL. Язык спецификации и описания SDL предназначен для описания структуры и функционирования распределенных систем реального времени, в особенности таких систем, для которых существенны аспекты связи между отдельными компонентами системы. Спецификации и описания на языке SDL являются формальными, так как они позволяют анализировать и интерпретировать их однозначно [5]. Такие модели могут использоваться для проектирования коммуникационных протоколов или их уровней [6].

Для создания качественно лучшего уровня многоканальной передачи для SpaceFibre нужно разработать новый метод для автоматического изменения количества линий. Для задачи совместной работы многоканальной передачи с механизмом «планирования» также необходимо определиться с конечным набором реализуемых сценариев. Обзор решений, которые могли бы лечь в основу подобного метода, представлен в [7].

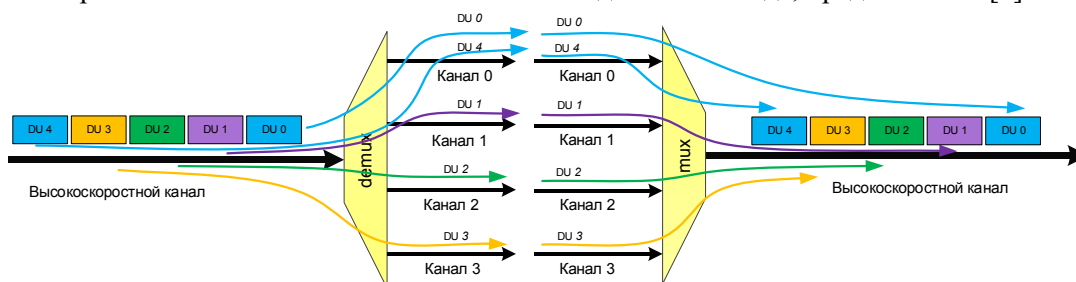


Рис. 2. Обобщенная структура многополосного протокола

## 2. Проблемы организации передачи данных на сетевом уровне SpaceFibre

Рассмотрим другой аспект функционирования стандарта SpaceFibre, а, в частности, его сетевой уровень, который организован таким образом, что обеспечиваются широкие возможности для формирования локальных вычислительных сетей различных размеров (от небольших, включающих в себя несколько терминальных узлов и маршрутизаторов) до крупных сетей, включающих сотни и тысячи сетевых узлов. Структура связей между сетевыми узлами может выбираться любой [2]. Существует возможность изменения конфигурации сети в процессе функционирования: включе-

ния и исключения отдельных узлов и подсетей, изменение путей передачи данных и их характеристик. Однако необходимо отметить, что некоторые особенности сетевого уровня могут приводить к:

- большим накладным расходам на передачу по сети и хранение в терминальных узлах длинных сетевых заголовков;
- значительному времени реконфигурирования при изменении путей передачи данных;
- невозможности различать потоки данных, проходящие через транзитные маршрутизаторы при использовании регионально-логической адресации, и, как следствие, невозможности задавать и поддерживать для них различные механизмы QoS.

Характеристики способов адресации SpaceFibre приведены в таблице.

Таблица

Характеристики способов адресации SpaceFibre

Способы адресации	Маршрутизация	Длина адреса	Ограничение по количеству абонентов
Путевая	По номеру порта	произвольная	нет
Логическая	По таблице маршрутизации	1	224
Регионально-логическая	По таблице маршрутизации	произвольная	нет

Типовой формат строки таблицы маршрутизации представлен на рис. 3. Сетевой заголовок может иметь произвольную длину и не имеет признака завершения. К дополнительным полям могут относиться признаки ширококовещания/адаптивной маршрутизации или уровень приоритета.

Следующая проблема – это большая длина заголовков. В больших сетях может использоваться путевая или регионально-логическая адресация, т. к. в этом случае нет ограничения на количество узлов. Однако при этом длина сетевого заголовка может достигать десятков байтов. Передача пакетов с такими длинными заголовками может довольно ощутимо снизить полезную пропускную способность сети. В терминальных узлах необходимо хранить сетевые заголовки узлов или приложений, с которыми осуществляется обмен данными. Это приводит к ощутимым затратам памяти.

Далее рассмотрим проблему неразличимости потоков в протоколе SpaceFibre, которая со-

стоит в следующем. Сетевой заголовок не имеет признака завершения [2], а, следовательно, в транзитных маршрутизаторах нет возможности определить дополнительные правила обработки потоков, учитывающие не только первый сегмент сетевого заголовка. Таким образом, в транзитных маршрутизаторах потоки, идущие в один и тот же регион или через один и тот же регион, неразличимы. В примере, приведенном на рис. 4, в маршрутизаторах синей сети потоки пакетов, адресованные в желтую и оранжевую, не различимы.

С путями в сети SpaceFibre связаны и другие трудности, например, проблема динамического изменения пути. Изменения набора задач, решаемых в системе, связаны с появлением новых потоков данных, прекращением некоторых потоков данных или изменением путей передачи и части потоков, характеристики которых остаются неизменными. Также важно учитывать и выход из строя сетевых узлов и каналов связи, возникновение локальных перегрузок отдельных участков сети.

Таблица маршрутизации			
Номер строки - адрес	Номер(а) выходных портов	Признак отделения заголовка	
Обязательные поля			Дополнительные поля

Рис. 3. Типовой формат строки таблицы маршрутизации



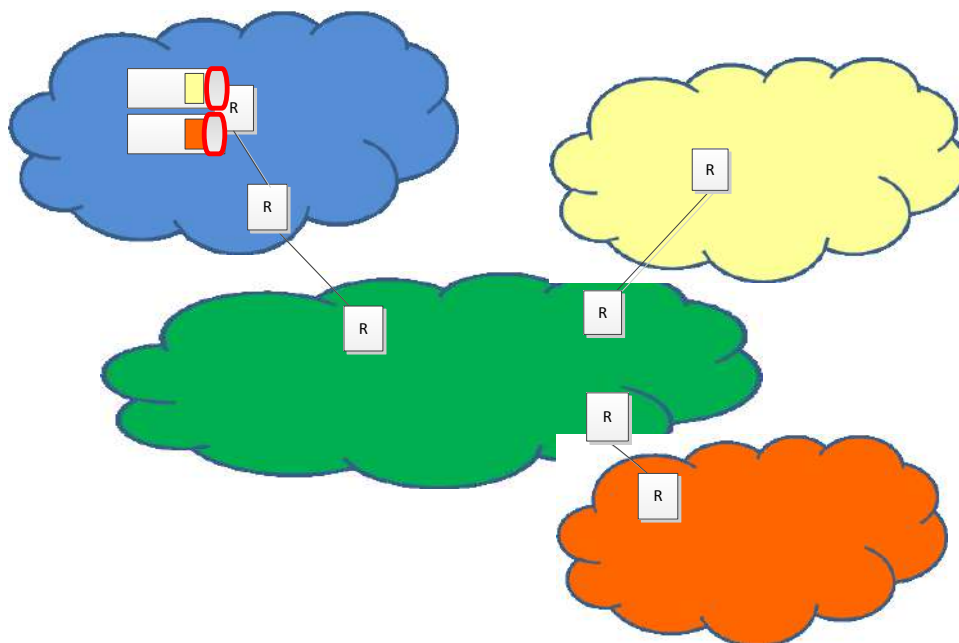


Рис. 4. Проблема неразличимости потоков в протоколе SpaceFibre

В дополнение ко всему, в SpaceFibre может возникнуть проблема использования механизма адаптивной групповой маршрутизации. А именно, при выборе альтернативного пути учитывается только ситуация, наблюдаемая в текущем маршрутизаторе.

Для решения вышеизложенных проблем предлагается использовать концепцию программно-реконфигурируемых сетей (Software Defined Networks, SDN) [8–10]. В сети выделяются плоскость передачи данных (data plane) и плоскость управления (control plane). Обработка пакетов в маршрутизаторах на основе таблицы потоков (flow table) выглядит следующим образом (рис. 5) [10; 11].

Правила представляют из себя значения полей пакета, символы =, <, >, константы и переменные. К действиям относятся «передать пакет в заданные порты», «удалить, модифицировать поля заголовка», «стереть пакет», «передать пакет в узел системного администрирования». При этом формат сетевого заголовка SpaceFibre остается неизменным, а стандартную таблицу маршрутизации дополняет набор правил.

Применительно к каждой сети известен формат заголовков. Могут быть сформированы правила (шаблоны), учитывающие все (необходимые) сегменты сетевого заголовка, поля транспортного заголовка, поля прикладного заголовка. Следовательно, появится возможность различать большее количество

потоков данных и осуществлять поддержку для них различных механизмов QoS. Для примера, показанного на рис. 4, для различения потоков можно использовать два первые байта заголовка.

Рассмотрим возможные действия для обработки потоков данных. Стандартом SpaceFibre (с возможностью задания разных значений параметров для разных потоков) регламентированы передача в заданный выходной порт (выходные порты), арбитраж с учетом заданного уровня приоритетов и контроль таймаутов передачи пакетов. Возможно предусмотреть следующие дополнительные правила (действия):

- контроль длины пакетов (отбрасывание «хвостов» слишком длинных пакетов);
- контроль временных интервалов между пакетами (отбрасывание слишком часто идущих пакетов);
- контроль идентификатора транспортного протокола (отбрасывание пакетов с неправильным идентификатором);
- контроль поля DestinationKey для транспортного протокола RMAP (отбрасывание пакетов с неправильным значением);
- действия по изменению сетевого заголовка (в том числе замена или добавление сегментов заголовка).

Исходно может формироваться только начальная часть сетевого заголовка, а следующие

Таблица потоков		
Правило	Действия	Счетчики статистики

Рис. 5. Обработка пакетов в маршрутизаторах на основе таблицы потоков

сегменты заголовка формируются в транзитных маршрутизаторах на границе регионов (сходный подход к формированию заголовков может использоваться в Infiniband [12; 13], однако в предлагаемом варианте формат заголовка соответствует стандарту SpaceFibre, и правила его формирования определяются в соответствии с особенностями SpaceFibre и стандартами транспортного уровня, используемыми в сочетании с ним). Это дает сокращение накладных расходов на таблицы сетевых заголовков в терминальных узлах, упрощение процесса реконфигурирования пути передачи данных по сети и сокращение накладных расходов на передачу длинных заголовков по сети.

При этом процесс динамического изменения сетевого заголовка SpaceFibre выглядит следующим образом. В каждом регионе имеется локальный администратор (менеджер), который изменяет настройки таблиц потоков (пограничных)

маршрутизаторов, а пограничный маршрутизатор заменяет (первый) сегмент сетевого заголовка.

В результате достигается быстрая реакция на изменения в регионе, в сети в целом. Пример представлен на рис. 6. Исходно пакет формируется в синей сети и включает в себя один байт сетевого заголовка (отмечен зеленым), который используется для передачи в сторону зеленой сети, и транспортный заголовок (отмечен как «Т»). Транспортный заголовок используется в транзитных маршрутизаторах для формирования очередного байта сетевого заголовка на пути передачи данных. В граничном маршрутизаторе подсети, помеченной зеленым, выбирается фрагмент пути передачи данных, включающий в себя маршрутизаторы, отмеченные одинарной или двойной штриховкой. Это зависит от исправности и загрузки. Граничный маршрутизатор получает информацию об этом от менеджера подсети.

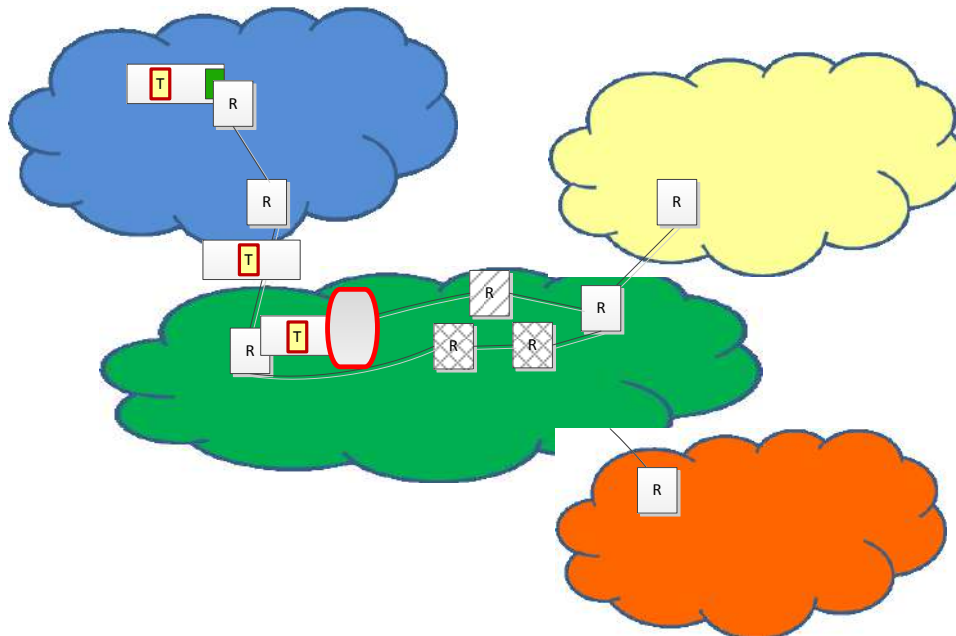


Рис. 6. Пример процесса динамического изменения сетевого заголовка

Таким образом, SDN позволяет решить проблемы SpaceFibre в больших сетях без существенного изменения самого стандарта и используемых форматов передачи данных.

## Заключение

Использование открытого стандарта SpaceFibre позволит сделать значительный шаг вперед при создании перспективных платформ и полезных нагрузок космических аппаратов. При этом внесение дополнительных изменений в стандарт при создании российской версии может позволить учесть требования отрасли, особенности отечественных технологий, а также решить проблемы, которые потенциально могут возникнуть

при увеличении количества абонентов в сети и объемов и интенсивности трафика.

Необходимо проведение детальных исследований механизмов технологии SpaceWire/SpaceFibre, их доработка и создание моделей, необходимого программного обеспечения. Развитие SpaceFibre до уровня ГОСТ позволит внедрить его в проекты космической отрасли. Поэтому необходимо избежать всех возможных ошибок уже на стадии проектирования самого протокола.

Технологии SpaceWire/SpaceFibre способны эффективно дополнять друг друга, смешанные сети, использующие эти стандарты, унифицируют процесс обмена данными на борту космических аппаратов любой сложности.

## Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, соглашение

№ FSRF-2023-0003, «Фундаментальные основы построения помехозащищенных систем космической и спутниковой связи, относительной навигации, технического зрения и аэрокосмического мониторинга».

## Список литературы

- [1] ГОСТ Р 70020-2022. Космическая техника. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. SpaceWire-RUS. Введ. 2022–06–01. М. : Изд-во стандартов, 2022. 191 с.
- [2] SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C. Noordwijk, Netherlands, 2019. 233 p.
- [3] Оленев В. Л. Анализ требований к современным протоколам для бортовых сетей космических аппаратов // Информационно-управляющие системы. 2021. № 1. С. 8–16. doi: 10.31799/1684-8853-2021-1-8-16.
- [4] Florit A. F., Villafranca A. G., Parkes S. SpaceFibre multi-lane: SpaceFibre // International SpaceWire Conference (SpaceWire), Yokohama. 2016. pp. 1–8.
- [5] Melia T., Sarma A., Aguiar R. L., Hogrefe D. Case study on the use of SDL for Specifying an IETF micro mobility protocol // 1st International Conference on Communication Systems Software & Middleware, New Delhi. 2006. pp. 1–5.
- [6] Оленев В. Л. Методология формализованного проектирования коммуникационных протоколов на основе сетей Петри // Информация и космос. 2022. № 4 (2). С. 37–45.
- [7] Степанов В. Е. Современные проблемы и вызовы методов многополосной передачи данных // Сборник докладов Третьей Междунар. науч. конф. «Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии», Санкт-Петербург. 2022. С. 229–232.
- [8] Zulkifli N., Sapit A., Mohammed A. N. Development of small scale cluster computer for numerical analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. 6 p.
- [9] Göransson P., Black C., Timothy Culver T. Software Defined Networks. A Comprehensive Approach. 2017. 409 p.
- [10] Gray K., Nadeau T. D. Network Function Virtualization. Elsevier Inc., 2016. 237 p.
- [11] OpenFlow Switch Specification. Version 1.5.1. The Open Networking Foundation, 2015. 283 p.
- [12] Subramoni H. INAM2: InfiniBand Network Analysis and Monitoring with MPI. ISC, 2016. 19 p.
- [13] Deploying HPC Cluster with Mellanox InfiniBand Interconnect Solutions. Mellanox Technologies, 2017. 40 p.

## ANALYSIS OF THE SPACEFIBRE TECHNOLOGY FOR THE HIGH-BANDWIDTH ONBOARD NETWORKS

**E. A. Suvorova, V. E. Stepanov, V. L. Olenev**

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

*The paper presents an analysis of a prospective international standard SpaceFibre for on board data exchange for different types of aircraft. Paper provides the rationale for using of this standard for new generation on-board networks. The obtained results are based on many years of experience with the SpaceWire/SpaceFibre family of open international standards. The authors present the main problems of SpaceFibre, as well as ways to solve them. The first problem is related to the use of multi-channel data transmission in prospective Russian projects, as well as the need to increase throughput using existing equipment and physical cables. It is necessary to develop new transmission methods and algorithms and create a completely Russian version of the multilane level for the described standard. The second problem relates to the organization of data transmission in SpaceFibre networks with a large number of nodes and a complex scheme of data transfer flows, it is a consequence of an insufficiently developed network level of the standard. The authors give possible ways to solve the identified inconsistencies of the standard using the concept of software-reconfigurable networks. The finalization of the SpaceFibre standard in terms of the discussed problems will improve the efficiency of the protocol itself, as well as take into account all possible comments before the stage of creating of a Russian State Standard for SpaceFibre.*

*Keywords: onboard network, SpaceFibre, multilane data transmission, network software re-configuration, SDN.*

## References

- [1] GOST R 70020-2022. *Kosmicheskaya tekhnika. Interfejsy i protokoly vysokoskorostnogo mezhpribornogo informacionnogo obmena i kompleksirovaniya bortovyh sistem kosmicheskikh apparatov. SpaceWire-RUS. Vved. 2022–06–01* [State Standard R 70020-2022. Space technology. Interfaces and protocols for high-speed inter-instrument information exchange and integration of spacecraft onboard systems. SpaceWire-RUS. Introduction 2022–06–01]. Moscow, Publishing house of standards, 2022, 191 p. (In Russian)
- [2] SpaceFibre – Very high-speed serial link. ECSS-E-ST-50-11C. Noordwijk, Netherlands, 2019, 233 p.
- [3] Olenev V. L. *Analiz trebovanij k sovremennym protokolam dlya bortovyh setej kosmicheskikh apparatov* [Analysis of requirements for modern spacecraft onboard network protocols] // Information and Control Systems, 2021, no. 1, pp. 8–16. doi: 10.31799/1684-8853-2021-1-8-16. (In Russian)
- [4] Florit A. F., Villafranca A. G., Parkes S. SpaceFibre multi-lane: SpaceFibre // International SpaceWire Conference (SpaceWire), Yokohama, 2016, pp. 1–8.
- [5] Melia T., Sarma A., Aguiar R. L., Hogrefe D. Case study on the use of SDL for Specifying an IETF micro mobility protocol // 1st International Conference on Communication Systems Software & Middleware, New Delhi, 2006, pp. 1–5.
- [6] Olenev V. L. *Metodologiya formalizovannogo proektirovaniya kommunikacionnyh protokolov na osnove setej Petri* [Methodology of formalized design of communication protocols based on Petri nets] // Information and space, 2022, no. 4 (2), pp. 37–45. (In Russian)
- [7] Stepanov V. E. Modern problems and challenges of methods of multiband data transmission // Collection of reports of the Third International scientific conference «Aerospace Instrumentation and Operational Technologies», Saint-Petersburg, 2022, pp. 229–232.
- [8] Zulkifli N., Sapit A., Mohammed A. N. Development of small scale cluster computer for numerical analysis // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 6 p.
- [9] Göransson P., Black C., Timothy Culver T. Software Defined Networks. A Comprehensive Approach. 2017, 409 p.
- [10] Gray K., Nadeau T. D. Network Function Virtualization. Elsevier Inc., 2016, 237 p.
- [11] OpenFlow Switch Specification. Version 1.5.1. The Open Networking Foundation, 2015, 283 p.
- [12] Subramoni H. INAM2: InfiniBand Network Analysis and Monitoring with MPI. ISC, 2016, 19 p.
- [13] Deploying HPC Cluster with Mellanox InfiniBand Interconnect Solutions. Mellanox Technologies, 2017, 40 p.

## Сведения об авторах

*Оленев Валентин Леонидович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой аэрокосмических компьютерных и сетевых технологий, директор Центра аэрокосмических исследований и разработок Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Окончил ГУАП в 2007 году. Область научных интересов: моделирование, программные модели, бортовые сети космического и авиационного применения, коммуникационные протоколы, проектирование протоколов, качество сервиса, протоколы SpaceWire/SpaceFibre.

ORCID: 0000-0002-1817-2754

*Степанов Владимир Евгеньевич* – старший преподаватель кафедры аэрокосмических компьютерных и сетевых технологий, инженер Центра аэрокосмических исследований и разработок Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Окончил ГУАП в 2018 году. Область научных интересов: бортовые сети космического и авиационного применения, коммуникационные протоколы, многополосная передача данных, формальные языки моделирования, SDL, микропроцессорные технологии.

ORCID: 0009-0009-1238-7015

*Суворова Елена Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры аэрокосмических компьютерных и сетевых технологий, заведующая лабораторией Центра аэрокосмических исследований и разработок Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП). Окончила ГУАП в 1998 году. Область научных интересов: бортовые сети космического и авиационного применения, коммуникационные протоколы, аппаратная реализация протоколов, системы-на-кристалле, сети-на-кристалле, качество сервиса, протоколы SpaceWire/SpaceFibre.

ORCID: 0000-0001-6330-8182



## ОЦЕНКА МЕТОДОВ СНИЖЕНИЯ ВИБРОАКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОНАСОСНОГО АГРЕГАТА КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

**О. В. Широков**✉, **С. А. Матвеев**,  
**Н. С. Слободзян**, **А. В. Горбунов**

*Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация*

*В статье характеризуется космический аппарат как средство выполнения различных задач, в том числе с применением прецизионного оборудования. Делается акцент на вибрации как на одном из воздействующих факторов и на необходимости низкого уровня вибрации на борту космического аппарата. Среди источников вибрации выделяется электронасосный агрегат систем терморегулирования и ставится актуальная задача по достижению низкой виброактивности при разработке нового образца для перспективных космических аппаратов. Обозначается комплексный подход к решению поставленной задачи с рассмотрением электронасосного агрегата как системы и выделением нескольких направлений для достижения среднеквадратичного значения виброускорения 0,01g и ниже. Подробно описываются возможные методы снижения виброактивности по каждому из направлений и реализованные решения в разработанном образце. Описывается несколько вариантов исполнения электронасосного агрегата для экспериментального определения уровня вибрации в виде среднеквадратичного значения виброускорения в диапазоне частот 5–1000 Гц. По результатам эксперимента оценивается вклад в снижение виброактивности по нескольким направлениям. Сделан вывод о том, что только комплексный подход позволяет достичь очень низкой виброактивности при разработке электронасосного агрегата.*

*Ключевые слова: электронасосный агрегат, система терморегулирования, космический аппарат, комплексный подход, снижение виброактивности.*

### Введение

Современные космические аппараты (КА) на сегодняшний день выполняют широкий перечень задач: дистанционное зондирование Земли, обеспечение телекоммуникации, связи и навигации, научно-исследовательские миссии, решение военных и специальных задач.

В ряде случаев на КА располагается прецизионное оборудование. Подобное оборудование решает особо сложные задачи, связанные с телекоммуникацией, связью и научно-исследовательской работой, и потому может быть чувствительно к различным внешним факторам. Одним из них является вибрация на борту КА. Источников вибрации существует много, основным при этом являются приводы различных систем: ориентации солнечных панелей, ориентации и стабилизации

КА, наведения средств связи, терморегулирования и жизнеобеспечения [1].

Особо стоит выделить системы терморегулирования (СТР), которые обеспечивают требуемый тепловой режим бортовой аппаратуры [2]. СТР подразделяют на активные и пассивные. Активные СТР включают в себя электронасосный агрегат (ЭНА), бесперебойно выполняющего принудительное перекачивание жидкости (теплоносителя) в гидравлическом контуре. Исходя из этого, ЭНА является основным элементом СТР, от его работы зависит устойчивое функционирование и СТР, и КА в целом [3].

Суммируя все вышесказанное, ЭНА для СТР перспективных КА должен обладать высокими показателями надежности и ресурса (свыше 15 лет), иметь повышенную степень отказоустойчивости, также все более актуальным становится его низкая виброактивность на уровне среднеквадратичного значения (СКЗ) виброускорения 0,01g и ниже в диапазоне 5–1000 Гц [4–6]. Последнее

✉ shirok.93@mail.ru

указывает на необходимость виброзащиты бортовой прецизионной аппаратуры от вибрационного воздействия ЭНА [1; 7].

Если обратиться к вопросу общей виброзащиты (ВЗ), то в защите объекта (прецизионной аппаратуры) от вибраций источника (ЭНА) выделяют несколько способов решения задачи, а именно [8]:

- снижение виброактивности источника – уменьшение уровней механических воздействий, возбуждаемых источником;
- внутренняя виброзащита объекта – изменение конструкции объекта, при котором заданные механические воздействия будут вызывать менее интенсивные колебания объекта. Здесь необходимо выделить демпфирование, принцип работы которого основан на рассеивании (диссипации) механической энергии. Подобный способ может применяться по отношению и к объекту, и к источнику;
- динамическое гашение колебаний – присоединением к объекту дополнительной системы, изменяющей характер его колебаний;
- виброизоляция – установка между объектом и источником дополнительной системы, защищающей объект от механических воздействий.

В контексте виброзащиты бортового оборудования КА выделяют два крупных направления: ограничение интенсивности работы источника и подавление вибровозмущений источника средствами виброзащиты [1].

Для успешного решения актуальной задачи разработки ЭНА с низкой виброактивностью был применен комплексный подход, объединяющий в себе снижение собственных вибровозмущений путем применения соответствующих технических решений и виброизоляции в конструкции агрегата.

Сам ЭНА является электромеханической системой, состоящей из системы управления (блока электроники), электродвигателя и насосной части. В соответствии с этим и с учетом комплексного подхода можно выделить несколько направлений для решения задачи снижения уровня собственных вибровозмущений. Условно их следует обозначить следующим образом [9]:

- гидравлическая часть;
- подвижные узлы;
- система управления ЭНА;
- электродвигатель;
- прогнозирование и анализ характерных рабочих частот;
- способы закрепления ЭНА (применение виброзащитных устройств).

В работе подробно описаны проблемы, методики снижения виброактивности и конкретные решения, которые были реализованы в разработанном ЭНА. Представлены также результаты экспериментального определения виброактивности и выполнена оценка вклада различных направлений в решение поставленной задачи.

## 1. Гидравлическая часть

Гидравлическая часть является основным источником вибраций в ЭНА. Для применения в составе СТР КА допускается использовать несколько типов насосов, но традиционно основным является центробежный [3]. Для насосов в целом характерны следующие источники вибраций [10]:

- срыв потока или кавитация;
- пульсации жидкости;
- резонанс лопаток от пульсаций жидкости;
- флаттер лопатки;
- колебания лопатки из-за взаимодействия частей насоса;
- колебания лопатки из-за вихреобразования;
- пульсирующая радиальная сила;
- центробежная сила.

Срыв потока, как правило, связан с малым числом лопаток в крыльчатке насоса. Кавитация может возникать как по причине срыва, так и ввиду формы лопатки, приводящей к локальному падению давления в слое жидкости.

Резонанс лопаток, флаттер, колебания лопаток характерны, как правило, для турбинных машин. В случае центробежного насоса для СТР вероятность подобного крайне мала.

Пульсирующая радиальная сила обусловлена неоднородностями, конструктивными особенностями входа и отводящего аппарата насоса. И если вход и отводящий аппарат, как правило, являются частью неподвижного корпуса, то тогда эта сила действует на роторную систему, что может приводить к отказу подвижных узлов.

Центробежные силы возникают из-за неуравновешенности роторной системы.

Исходя из вышеописанного, для центробежного насоса справедливы следующие способы борьбы с вибрацией:

- увеличение числа лопаток крыльчатки при условии сохранения требуемых значений расхода и перепада давления жидкости;
- подбор «плавных» контуров, геометрии отводящего аппарата и крыльчаток для исключения срывов и пульсаций жидкости;
- применение в конструкции насоса осесимметричных решений для входа, крыльчатки и отводящего аппарата;
- балансировка роторной системы в сборе, ужесточение требований по остаточному дисбалансу.

В итоге был разработан насос, компоновка которого представляет собой двухступенчатый центробежный электронасос с зеркальным расположением крыльчаток и предвключенным шнеком перед первой ступенью (рис. 1) [11].

Такое решение приводит к взаимокompенсации осевых нагрузок от крыльчаток. Применение

крыльчаток закрытого типа повышает жесткость лопаток и исключает их колебания. Форма рабочего колеса и отводящего аппарата с лопатками подобрана с целью стабилизации потока жидкости, осесимметричные отводящие аппараты обеих ступеней и продольные каналы сводят к минимуму радиальные силы, компенсируют неравномерность тепловых полей электродвигателя (ЭД) в конструкции. Предвключенный шнек повышает давление для первой ступени насоса, что исключает возникновение кавитации в номинальных условиях работы.

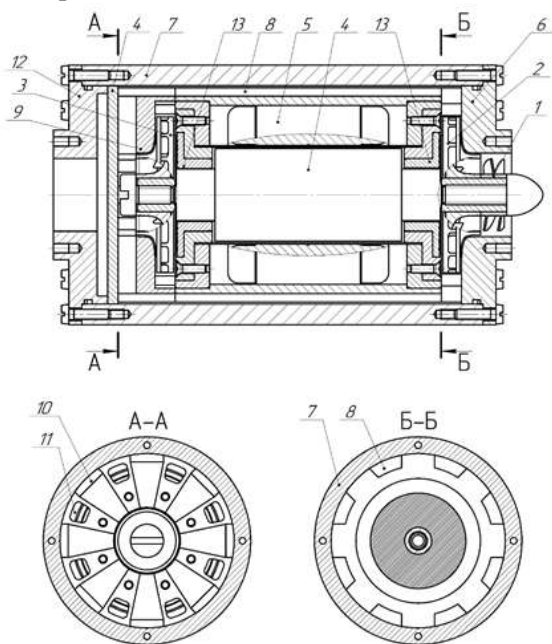


Рис. 1. Насос разработанного ЭНА: 1 – шнек; 2, 3 – центробежное колесо насоса; 4 – ротор с постоянными магнитами; 5 – статор электродвигателя; 6 – входной диффузор; 7 – корпус с каналами 8; 9 – направляющий аппарат с входными отверстиями 10 и выходными 11; 12 – выходной диффузор; 13 – радиально-упорные подшипниковые узлы

## 2. Подвижные узлы

Подвижные узлы в составе ЭНА одновременно обеспечивают свободное вращение и удержание роторной части в конструкции изделия. От них, в первую очередь, зависит механическая надежность ЭНА и устойчивое функционирование. Именно их отказ является наиболее распространенным в электромеханических системах с вращающимся ротором [12; 13].

Исходя из анализа современного технического уровня, можно выделить следующие виды подвижных узлов, подходящих для применения в ЭНА [14]:

- подшипники качения;
- подшипники скольжения;
- гидростатические опоры.

- гидростатические опоры.

В части подвижных узлов анализ современной научной и технической литературы [3] привел к выбору гидродинамических опор как наиболее подходящих для ЭНА с длительным сроком службы (до 15 лет). Они не требуют дополнительных элементов для своей работы, конструктивно просты, обладают огромным ресурсом и повышенной демпфирующей способностью [15; 16]. Из недостатков стоит отметить необходимость высокой частоты вращения роторной части (свыше 10000 об/мин) из-за с низкой кинематической вязкости теплоносителя СТР [17].

## 3. Система управления ЭНА. Электродвигатель

В качестве электродвигателя предпочтительнее бесколлекторный двигатель постоянного тока (БДПТ). Выбранный тип ЭД надежен, обладает высоким КПД, показателями мощности и момента, характеризуется широкими возможностями регулирования [18]. Подбирают БДПТ для ЭНА, в первую очередь, для формирования нужного вращающего момента крыльчаток насоса с высокой частотой вращения (свыше 10000 об/мин) для устойчивой работы гидродинамических опор. Одновременно добиваются максимально возможного количества пар полюсов, при котором можно осуществлять управление. В итоге был выбран БДПТ JCM35 производства KUBO Technologies (ООО «МДрайв», г. Санкт-Петербург). Для решения задачи виброактивности выделим следующие его параметры:

- частота вращения – до 13500 об/мин;
- число пар полюсов – 4.

В случае системы управления ЭНА (СУ ЭНА) в первую очередь стоит задача получения высоконадежного электронного блока с отказоустойчивым управлением. Ввиду применения БДПТ последнее связано с возможным отказом датчиков Холла как ключевых элементов контура управления ЭД [19].

Для получения низкого уровня вибраций система управления обеспечивает снижение, компенсацию колебаний, возбуждаемых электродвигателем. Механические колебания, источником которых является БДПТ, обусловлены следующими причинами:

- зубцовым моментом – пульсациями электромагнитного момента, обусловленного неравномерностью магнитной проницаемости статора (наличие зубцов в конструкции статора БДПТ);
- несовершенством технологии, дефектами производства (отклонения от осесимметричности зубцов статора и датчиков Холла, неравномерности намотки провода);
- пульсациями электрических сигналов управления, связанных с широтно-импульсной

модуляцией (ШИМ) и особенностью переключения фаз.

Величина зубцового момента обратно пропорциональна количеству зубцов в статоре, соответственно данная конструктивная особенность определяет амплитуду колебаний. Ротор же БДПТ состоит только из постоянных магнитов, и количество полюсов обозначают в технической литературе термином «число пар полюсов». Конструктивная особенность ротора будет определять частоту пульсации зубцового момента. Несовершенство и дефекты изготовления приводят к формированию неравномерного электромагнитного момента, а в итоге – к скачкам механического момента на валу электронасоса. Пульсации электрического сигнала прямым образом приводят к пульсациям электромагнитного момента. Таким образом, первые две причины обусловлены только конструкцией ЭД, а последнее зависит, в первую очередь, от блока управления. Значит, от СУ ЭНА для достижения низкого уровня вибрации требуется:

- формирование «гладкого» сигнала управления;
- компенсация недостатков конструкции ЭД.

Первая потребность решается при разработке программного обеспечения (ПО) с помощью корректного подбора частоты ШИМ, времени от-

ключения одной и подключения другой фазы, выбираемым для конкретной модели ЭД.

Вторая потребность решается алгоритмами компенсации пульсаций зубцового (вращающего) момента [20–22]. В общем случае подразумевается задание ПО фазных токов особой формы. Кривая токов при этом является предопределенной функцией от требуемого момента и углового положения. Это приводит к формированию желаемого механического момента с устранением нежелательных пульсаций.

При отладке программных алгоритмов виброгашения, описанных в [21], энергопотребление СУ ЭНА превысило требуемые ограничения. Это, а также высокая нагрузка на имеющийся микроконтроллер для решения широкого спектра функциональных задач привело к необходимости отказа от реализации указанных алгоритмов в ПО СУ ЭНА.

Руководствуясь положениями, описанными в [19], была разработана новая система управления электронасосного агрегата (рис. 2) на отечественной радиационнотстойкой элементной базе с программируемым микроконтроллером. Функционал включает в себя несколько отказоустойчивых режимов управления, диагностику и прогнозирование технического состояния электронасоса.



Рис. 2. Система управления электронасосным агрегатом

#### 4. Способы закрепления

В условиях, когда достигнут предел в снижении виброактивности источника или изменение конструкции невозможно, уменьшение вибрационного фона от источника на поверхности закрепления возможно посредством внедрения дополнительных устройств между источником и поверхностью. Это виброзащитные устройства (ВЗУ) различного принципа работы и исполнения. Согласно [8] выделяют следующие ВЗУ:

- демпферы;
- виброизоляторы;
- динамические виброгасители (пассивные и активные);

- комбинированные.

При разработке электронасосного агрегата для обеспечения требуемых характеристик на протяжении 15 лет работы была разработана виброизоляция (ВИ), подробно описанная в работе [7]. ВИ является одноосной системой виброизоляции из трех виброизоляторов с металлорезиной (МР). МР в качестве рабочего материала обеспечивает хорошие виброзащитные свойства в совокупности с высокими показателями надежности, ресурса и стойкости к вредным воздействующим факторам. Благодаря указанным преимуществам виброизоляторы из МР находят широкое применение в космической технике [23; 24].

## 5. Прогнозирование и анализ характерных частот

На стадии макетирования, когда становится ясна структура разрабатываемого изделия и его функциональные особенности, можно определить будущую спектральную характеристику виброускорения. В общем виде она будет представлять низкий вибрационный шум с чередующимися пиками на некоторых характерных частотах. Конкретные значения этих характерных частот напрямую связаны с параметрами функционирования и конструктивными особенностями изделия. В случае ЭНА определяющей становится рабочая частота вращения роторной части, от нее кратно рассчитываются другие. В диапазоне 5–1000 Гц могут быть следующие характерные частоты:

- $f_{вр}$  – частота вращения роторной части и кратные ей частоты;
- $f_{пол} = P \cdot f_{вр}$  – частота вращения электромагнитного поля электродвигателя и кратные ей частоты ( $P$  – число пар полюсов электродвигателя);
- $f_{р.к.} = N \cdot f_{вр}$  – частота рабочего колеса и кратные ей частоты ( $N$  – количество лопаток крыльчатки);
- $f_{к.о.} = 3 \cdot f_{пол}$  – частота коммутации обмоток (для БДПТ, являющегося трехфазным электродвигателем).

В итоге вычисляются значения характерных частот и выявляются те, которые попадают в контрольный диапазон. Затем выполняется изменение конструкции либо режима работы для увеличения значений характерных частот больше значения верхней границы диапазона. В идеальном случае в пределах контрольного диапазона будет наблюдаться только вибрационный шум. В действительности попытка достижения подобного результата может упираться в ряд ограничений. Поэтому добиваются выноса максимального числа характерных частот за пределы контрольного диапазона при условии выполнения основных требований по расходу и перепаду давления, КПД и др.

## 6. Получение экспериментальных данных. Оценка результатов

В конечном итоге в результате проводимых работ был разработан электронасосный агрегат, представленный на рис. 3. ЭНА включает в себя два электронасоса (рис. 1), две СУ ЭНА (рис. 2) и виброизоляцию.

Для оценки вклада различных методов в снижение виброактивности было выполнено несколько измерений при различных условиях эксперимента. Условия были выбраны следующие:

- центробежный электронасос с подшипниками качения (аналог действующего образца);

- центробежный электронасос оригинальной конструкции с подшипниками качения;
- центробежный электронасос оригинальной конструкции с гидродинамическими опорами;
- центробежный электронасос оригинальной конструкции с гидродинамическими опорами и виброизоляцией.



Рис. 3. Разработанный электронасосный агрегат

В первом случае был подобран функциональный малорасходный аналог, представляющий собой центробежный электронасос с БДПТ, подшипниками качения. Подобный выбор обусловлен результатами обзора отечественных образцов ЭНА [3].

Во втором случае подшипники качения заменяли гидродинамические опоры в разработанном насосе. Подшипники были выбраны с учетом статической и расчетной динамической нагрузок и без изменения конструкции на рис. 1.

В третьем случае испытывался насос, полностью соответствующий описанию патента и рис. 1.

В четвертом случае испытывался полностью комплектный электронасос, изображенный на рис. 3.

Насосы перед выполнением измерений устанавливались в специально разработанный гидростенд и работали в номинальном режиме перекачивания жидкости. Номинальный режим обеспечивается расчетной частотой вращения насоса в 11500 об/мин и гидросопротивлением гидростенда.

Регистрация измерений выполнялась анализатором Zetlab ZET 017-U8 и специальным ПО. В качестве датчика виброускорения использовался РСВ piezotronics 356B08. Измерения проводились по трем взаимноперпендикулярным осям при частоте дискретизации анализатора 50000 Гц и на протяжении 5 минут. Полученные результаты измерений подвергались фильтрации с полосой пропускания 5–1000 Гц с дальнейшим вычислением СКЗ виброускорения.

Полученные таким образом среднеквадратичные значения виброускорения представлены в таблице.



Таблица

СКЗ виброускорения, полученные по результатам измерений

Условия измерений	СКЗ виброускорения (5–1000 Гц), g
Центробежный электронасос малой мощности с подшипниками качения (функциональный аналог действующего образца)	0,04–0,2
Центробежный электронасос оригинальной конструкции с подшипниками качения	0,1–0,6
Центробежный электронасос оригинальной конструкции с гидродинамическими опорами	0,03–0,04
Центробежный электронасос оригинальной конструкции с гидродинамическими опорами и виброизоляцией	0,0009–0,001

112

Значения в таблице представлены в виде интервала, который демонстрирует разброс значений по трем осям измерений.

Как можно отметить, уровень вибрации для центробежного электронасоса с подшипниками качения оказался выше, чем у функционального аналога. Это можно связать с тем, что рабочая частота разработанного насоса очень высокая для подобранных подшипников качения.

В остальном можно наблюдать достижение уровня вибрации ниже функционального аналога. Небольшое снижение, но и с меньшим разбросом по осям, фиксируется в случае оригинальной конструкции центробежного электронасоса с гидродинамическими опорами.

Существенное снижение уровня вибрации достигалось при совокупности центробежного электронасоса с гидродинамическими опорами и виброизоляцией. Это указывает на то, что виброизоляция является крайне эффективным методом снижения уровня вибрации на поверхности закрепления насоса. С учетом предыдущего вывода можно сделать заключение, что виброизоляция позволила бы достичь существенного результата и с функциональным аналогом. Однако возможность получения значений СКЗ вибрации на уровне и ниже порога 0,001g остается под вопросом.

### Заключение

Необходимо отметить, что именно комплексный подход в решении задачи по несколь-

ким направлениям, а именно по части насоса, опорных узлов и способов закрепления, обеспечивает требуемый крайне низкий уровень виброактивности в диапазоне частот 5–1000 Гц на поверхности закрепления объекта. Дальнейшее снижение виброактивности возможно за счет доработки конструкции ЭНА с выносом большего числа характерных частот за границы контрольного диапазона, совершенствованием виброизоляции и внедрении программных методов виброгашения.

Комплексность описанного подхода при разработке изделия позволяет варьировать перечень применяемых методик в зависимости от предъявляемых технических требований и финансово-экономического обеспечения работ по разработке электронасосных агрегатов.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках НИОКТР комплексного проекта «Создание высокотехнологичного импортозамещающего производства высокоресурсных элементов систем исполнительной автоматики транспортной и авиационно-космической техники, обеспечивающей освоение и использование Мирового Океана, Арктики и Антарктики» при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-11-2019-077 от 13.12.2019) в соответствии с постановлением Правительства РФ от 09.04.2010 № 218.

### Список литературы

- [1] Телепнев П. П., Кузнецов Д. А. Методы виброзащиты прецизионных космических аппаратов. Химки : АО «НПО Лавочкина», 2019. 263 с.
- [2] ГОСТ Р 53802-2010: Системы и комплексы космические. Термины и определения. Королев : ФГУП ЦНИИмаш, 2010. 27 с.
- [3] Коротков Е. Б., Ширококов О. В., Матвеев С. А., Юдина З. А. Обзор электронасосных агрегатов систем терморегулирования космических аппаратов // Космические аппараты и технологии. 2021. Т. 5. № 4. С. 198–207.
- [4] Двирный В. В., Двирный Г. В., Хныкин А. В., Голованова В. В., Крушенко Г. Г. Обеспечение длительного ресурса малорасходных нагнетателей // Исследования наукограда. 2014. № 3. С. 12–20.

- [5] Liu W., Zhang Y., Li Z., Dong W. Control performance simulation and tests for microgravity active vibration isolation system onboard the Tianzhou-1 cargo spacecraft // *Astrodynamics*. 2018. № 2 (4). pp. 339–360.
- [6] Saggin B., Scaccabarozzi D., Comolli L. Long-term vibration monitoring onboard mars express mission // *Journal of Spacecraft and Rockets*. 2014. vol. 51. no. 51. pp. 1664–1672. doi: 10.2514/1.A32752.
- [7] Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Матвеев С. А., Слободзян Н. С., Ширококов О. В. Виброзащита прецизионного оборудования космических аппаратов от внутренних источников возмущений // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5. № 4. С. 217–226. doi: 10.26732/j.st.2021.4.05.
- [8] Вибрации в технике : справочник. Т. 6. Защита от вибрации и ударов. М. : Машиностроение, 1981. 456 с.
- [9] Матвеев С. А., Ширококов О. В., Слободзян Н. С., Горбунов А. В. Конструктивные и программно-алгоритмические методы снижения уровня вибрации электронасосного агрегата космического аппарата // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2021. № 27. С. 34–36. doi: 10.26160/2474-5901-2021-27-34-36.
- [10] Brennen C. E. *Hydrodynamics of pumps*. Cambridge University Press, 2011. 301 p.
- [11] Горбунов А. В., Матвеев С. А., Тестоедов Н. А., Леканов А. В., Порпылев В. Г. Герметичный многоступенчатый центробежный электронасос. Пат. № 2791265 Российская Федерация, 2023. Бюл. № 7.
- [12] Боровиков М. А., Доманов В. И., Доманов А. В. Оперативная диагностика вентильного двигателя на автономном объекте // Тезисы докладов науч.-прак. конф. «Электротехника и энергетика Поволжья на рубеже тысячелетий», Чебоксары. 2001. С. 35–37.
- [13] Боровиков М. А., Доманов В. И., Доманов А. В. Вопросы построения автомобильного вентильного электропривода с микроконтроллерной системой управления // *Вестник УлГТУ*. 2000. № 1. С. 66–70.
- [14] Юдина З. А., Синиченко М. И., Ладыгин А. П., Синьковский Ф. К., Усманов Д. Б. Причины возникновения вибрации в агрегате электронасосном космического аппарата и способы ее снижения // *Космические аппараты и технологии*. 2021. Т. 5. № 2. С. 63–76. doi: 10.26732/j.st.2021.2.01.
- [15] Чернавский С. А. *Подшипники скольжения*. М. : Машгиз, 1963. 243 с.
- [16] Introduction to pump rotordynamics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/RTO-EN-AVT-143/EN-AVT-143-09.pdf> (дата обращения: 15.03.2023).
- [17] Морковин А. В., Плотников А. Д., Борисенко Т. Б. Теплоносители для тепловых труб и наружных гидравлических контуров систем терморегулирования автоматических и пилотируемых космических аппаратов // *Космическая техника и технологии*. 2015. № 3. С. 89–99.
- [18] Шмарин Я. А. Повышение эффективности электропривода объемного гидронасоса многоколесной автотранспортной платформы : дис. канд. техн. наук: 05.09.03. Челябинск, 2017. 150 с.
- [19] Матвеев С. А., Тестоедов Н. А., Слободзян Н. С., Гончаров В. О., Киселев А. А., Баленко Н. А. Отказоустойчивая система управления электронасосным агрегатом космического назначения // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. 2021. № 2. С. 37–44.
- [20] Томасов В. С., Ловлин С. Ю., Егоров А. В. Алгоритмы компенсации пульсаций момента прецизионного электропривода на базе синхронной машины с постоянными магнитами // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2013. № 2 (84). С. 77–83.
- [21] Kim I., Nakazawa N., Kim S., Park Ch., Yu Ch. Compensation of torque ripple in high performance BLDC motor drives // *Control Engineering Practice*. 2010. vol. 18. issue 10. pp. 1166–1172. doi: 10.1016/j.conengprac.2010.06.003.
- [22] Nakao N., Tobar K., Sugino T., Ito Yo., Mishima M., Maeda D. Torque ripple suppression control for PMSMs using feedforward compensation and online parameter estimation // *IEEJ Journal of Industry Applications*. 2021. vol. 141. no. 1. pp. 18–27. doi: 10.1541/ieejia.20003337.
- [23] В Самарском университете им. Королева прошли испытания устройств виброзащиты для ракеты-носителя «Союз-5» [Электронный ресурс]. URL: <https://ssau.ru/news/18746-v-samarskom-universitete-im-koroleva-proshli-ispytaniya-ustroystv-vibrozhachity-dlya-rakety-nositelya-soyuz-5> (дата обращения: 13.03.2023).
- [24] Участие в миссии EхоMars 2016 [Электронный ресурс]. URL: <http://onill.ru/news/48-exomars2016.html> (дата обращения: 13.03.2023).

## ASSESSMENT OF VIBRATION SUPPRESSION METHODS FOR SPACECRAFT ELECTRIC PUMP UNIT

**O. V. Shirobokov, S. A. Matveev, N. S. Slobodzyan, A. V. Gorbunov**

*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

*This article characterizes the spacecraft as a means of performing various tasks, including by precision equipment. Emphasis is placed on vibration as one of the influencing factors and on*

the need for a low level of vibration on the spacecraft. Among the side effects of the electric pump unit of the thermal control system, the urgent task is to reduce vibration activity when developing a new model for advanced spacecraft. An integrated approach to solving the problem is indicated with the consideration of electric pump unit as a system and the selection of several directions to achieve the root-mean square value of vibration acceleration of 0,01g and below. Possible methods for reducing vibration activity in each of the directions and implemented solutions in the developed sample are described in detail. On several versions of electric pump unit for experimental determination of the level of root-mean square value vibration acceleration at a frequency of 5–1000 Hz. According to the results of the experiment, the contribution to the reduction of vibroactivity in several directions is estimated. It is concluded that only an integrated approach makes it possible to achieve a very low level of vibration activity of electric pump unit.

**Keywords:** electric pump unit, thermal control system, spacecraft, integrated approach, vibration suppression.

## References

- [1] Telepnev P. P., Kuznetsov D. A. *Metodi vibrozashchiti precizionnih kosmicheskikh apparatov* [Vibration protection methods for precision spacecraft]. Khimki, NPO Lavochkina JSC, 2019, 263 p. (In Russian)
- [2] *GOST R 53802-2010 Sistemi i kompleksi kosmicheskii. Termini i opredelenia* [State Standard R 53802-2010. Space systems and stations. Terms and definitions]. Korolev, FGUP CNIImash, 2010, 27 p. (In Russian)
- [3] Korotkov E. B., Shirobokov O. V., Matveev S. A., Yudina Z. A. *Obzor elektronasosnih agregatov sistem termoregulirovaniya kosmicheskikh apparatov* [Overview of electric pump units for spacecraft thermal control systems] // *Spacecrafts & Technologies*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 198–207. doi: 10.26732/j.st.2021.4.03. (In Russian)
- [4] Dvirny V. V., Dvirny G. V., Khnykin A. V., Golovanova V. V., Krushenko G. G. *Obespechenie dlitelnogo resursa malorashodnih agregatov* [Providing the long service life for low water/low gas consumption pumps] // *The Research of the Science City*, 2014, no. 3, pp. 12–20. (In Russian)
- [5] Liu W., Zngang Y., Li Z., Dong W. Control performance simulation and tests for microgravity active vibration isolation system onboard the Tianzhou-1 cargo spacecraft // *Astrodynamics*, 2018, no. 2 (4), pp. 339–360.
- [6] Saggin B., Scaccabarozzi D., Comolli L. Long-term vibration monitoring onboard mars express mission // *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2014, vol. 51, no. 51, pp. 1664–1672. doi: 10.2514/1.A32752.
- [7] Zhukov Yu. A., Korotkov E. B., Matveev S. A., Slobodzyan N. S., Shirobokov O. V. *Vibrozashchita precizionnogo oborudovaniya kosmicheskikh apparatov ot vnutrennih istochnikov vozmushchenij* [Protection of precision spacecraft equipment from internal sources of vibration] // *Spacecrafts & Technologies*, 2021, vol. 5, no. 4, pp. 217–226. doi: 10.26732/j.st.2021.4.05. (In Russian)
- [8] *Vibracii v tehnike: spravochnik. Tom 6: Zashita ot vibratsii i udara* [Vibration in technology. vol. 6. Protection from vibration and shock]. Moscow, Mechanical Engineering, 1981, 456 p. (In Russian)
- [9] Matveev S. A., Shirobokov O. V., Slobodzyan N. S., Gorbunov A. V. *Konstruktivnye i programmno-algoritmicheskie metody snizheniya urovnya vibracii elektronasosnogo agregata kosmicheskogo apparata* [Constructive and software methods for reducing the vibration of spacecraft electric pump unit] // *Journal of Advanced Research in Technical Science*, 2021, no. 27, pp. 34–36. doi: 10.26160/2474-5901-2021-27-34-36. (In Russian)
- [10] Brennen C. E. *Hydrodynamics of pumps*. Cambridge University Press, 2011, 301 p.
- [11] Gorbunov A. V., Matveev S. A., Testoedov N. A., Lekanov A. V., Porpylev V. G. *Hermetichny mnogostupenchatiy centrobezniy elektronasos* [Hermetically sealed multistage centrifugal electric pump]. Patent RU 2791265, 2023, bulletin no. 7.
- [12] Borovikov M. A., Domanov V. I., Domanov A. V. *Operativnaya diagnostika ventilnogo dvigatelya na avtonomnom ob'ekte* [Operational diagnostics of a brushless motor at an autonomous facility] // Abstracts of the scientific-practical conference «Electrical engineering and energy of the Volga region at the turn of the millennium», Cheboksari, 2001, pp. 35–37. (In Russian)
- [13] Borovikov M. A., Domanov V. I., Domanov A. V. *Voprosi postroeniya avtomobilnogo ventilnogo electroprivoda s mikrokontrollernoy sistemoy* [Issues of building an automobile valve electric drive with a microcontroller control system] // *Bulletin of UISTU*, 2000, no. 1, pp. 66–70. (In Russian)
- [14] Yudina Z. A., Sinichenko M. I., Ladigin A. P., Sin'kovskiy F. K., Usmanov D. B. *Prichini vozniknoveniya vibracii v aggregate elektronasosnom kosmicheskogo apparata i sposobi ee snizheniya* [The vibration origin in the electric pump of the spacecraft and methods to reduce them] // *Spacecrafts & Technologies*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 63–76. doi: 10.26732/j.st.2021.2.01. (In Russian)
- [15] Chernavskiy S. A. *Podshipniki skolzheniya* [Plain bearings]. Moscow, Mashgiz, 1963, 243 p. (In Russian)

- [16] Introduction to pump rotordynamics. Available at: <https://www.sto.nato.int/publications/STO%20Educational%20Notes/RTO-EN-AVT-143/EN-AVT-143-09.pdf> (accessed 15.03.2023).
- [17] Morkovin A. V., Plotnikov A. D., Borisenko T. B. *Teplonositeli dlya teplovih trub i naruzhnyh gidravlicheskih konturov sistem termoregulirovaniya avtomaticheskikh i pilotiruemykh kosmicheskikh apparatov* [Heat carriers for heat pipes and external hydraulic circuits of thermal control systems for automatic and manned spacecraft] // Space technique and technologies, 2015, no. 3, pp. 89–99. (In Russian)
- [18] Smarin Ya. A. Improving the efficiency of the electric drive of a volumetric hydraulic pump of a multi-wheeled motor transport platform : Cand. Diss. Chelyabinsk, 2017, 150 p.
- [19] Matveev S. A., Testodov N. A., Slobodzyan N. S., Goncharov V. O., Kiselev A. A., Balenko N. A. *Otkazoustojchivaya sistema upravleniya elektronasosnym agregatom kosmicheskogo naznacheniya* [Fail-safe control system for an electric pump unit of space application] // Izv. VUZ. Aviatsionnaya Tekhnika, 2021, no. 2, pp. 37–44. (In Russian)
- [20] Tomasov V. S., Lovlin S. Yu., Egorov A. V. *Algoritmi kompensacii pulsaciy momenta precizionnogo oborudovania na baze sinhronnoi mashini s postoyannimi magnitami* [Torque ripple compensation algorithms for a precision electric drive based on a synchronous machine with permanent magnets] // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2013, no. 2 (84), pp. 77–83. (In Russian)
- [21] Kim I., Nakazawa N., Kim S., Park Ch., Yu Ch. Compensation of torque ripple in high performance BLDC motor drives // Control Engineering Practice, 2010, vol. 18, issue 10, pp. 1166–1172. doi: 10.1016/j.conengprac.2010.06.003.
- [22] Nakao N., Tobari K., Sugino T., Ito Yo., Mishima M., Maeda D. Torque ripple suppression control for PMSMs using feedforward compensation and online parameter estimation // IEEJ Journal of Industry Applications, 2021, vol. 141, no. 1, pp. 18–27. doi: 10.1541/ieejjia.20003337.
- [23] *V Samarskom universite im. Koroleva proshni ispitania ustroystv vibrozashchity dlya raketi-nositelya «Soyuz-5»* [At the Samara University. Korolev passed tests of vibration protection devices for the Soyuz-5 launch vehicle]. Available at: <https://ssau.ru/news/18746-v-samarskom-universitete-im-koroleva-proshli-ispitaniya-ustroystv-vibrozashchity-dlya-rakety-nositelya-soyuz-5> (accessed 13.03.2023). (In Russian)
- [24] *Uchastie v missii ExoMars 2016* [Participation in the ExoMars 2016 mission]. Available at: <http://onil1.ru/news/48-exomars2016.html> (accessed 13.03.2023). (In Russian)

## Сведения об авторе

*Горбунов Андрей Владимирович* – начальник опытно-конструкторского бюро Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил аспирантуру БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2020 году. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, мехатроника.

*Матвеев Станислав Алексеевич* – кандидат технических наук, доцент, лауреат Государственной премии Российской Федерации им. Г. К. Жукова, заведующий кафедрой «Систем управления и компьютерных технологий» (И9), проректор по научной работе и инновационному развитию Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 1996 году. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, беспилотные летательные аппараты, системы специального назначения.

ORCID: 0000-0001-5206-2957

*Слободзян Никита Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Робототехнические и мехатронные системы» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил аспирантуру БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2020 году. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, мехатроника, системы управления.

ORCID: 0000-0002-8011-3923

*Ширококов Олег Вячеславович* – младший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические и мехатронные системы» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил магистратуру БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2018 году. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, мехатроника, диагностика технических систем.

ORCID: 0000-0002-8005-4353

# ПОВЫШЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЗМОМ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С. А. Матвеев, Н. С. Слободзян, А. А. Киселев✉,  
Ю. А. Жуков, Е. Б. Коротков

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

В статье рассмотрены методы повышения статической и динамической точности управления мехатронного устройства параллельной структуры космического назначения типа гексапода (платформа Гью-Стюарта). Описано решение обратной задачи кинематики и обоснована необходимость решать прямую задачу кинематики численными методами. В ходе исследований выявлено, что основной источник ошибок позиционирования гексапода без основной обратной связи – это его линейные приводы, имеющие систематические погрешности в механической части линейной передачи, редуктора, в расположении обмоток двигателя; температурные ошибки, обусловленные изменением размеров деталей за счет нагрева или охлаждения; ошибки, вызванные упругими деформациями под действием нагрузки. Для повышения статической точности гексапода предлагается ряд как конструктивных, так и программных решений: предварительный натяг механической передачи, индивидуальная калибровка каждого привода, компенсация температурных расширений и др. Для повышения динамической точности предлагается применение способа управления линейными приводами в следящем режиме наряду с обеспечением траектории движения платформы с ограничением скорости ее движения и производных скорости. Применение указанных методов позволяет значительно улучшить точность работы механизмов параллельной структуры и, тем самым, приблизиться к достижению предельных качественных свойств бортовых оптико-электронных и информационных систем космических аппаратов и станций.

**Ключевые слова:** механизм параллельной структуры, гексапод, платформа Стюарта, статическая точность, динамическая точность, погрешность, компенсация ошибок, траекторное управление.

## Введение

Современные космические аппараты (КА) применяются в широком спектре информационных систем для решения таких прикладных задач, как обеспечение телевидения, интернета, спутниковой связи, мониторинга поверхности Земли, а также передовых исследований космического пространства – реликтового излучения, черных дыр, галактик и др. [1–3].

Для достижения высокой точности работы информационных систем КА необходимо с максимальной точностью ориентировать их бортовые приборы (антенны и контррефлекторы, телескопы и др.). В современных КА требования к точности

линейного позиционирования и угловой ориентации имеют порядок микрометров и микроградусов соответственно [4].

Зачастую такие системы позиционирования и ориентации строятся на основе прецизионных механизмов параллельной структуры (МПС) [5–7], рассчитанных на длительную эксплуатацию в экстремальных условиях внешней среды: вакуум, воздействие ионизирующего излучения, широкий диапазон температур.

В БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова совместно с АО «РЕШЕТНЁВ» разработан МПС типа гексапода, кинематическая схема которого приведена на рис. 1. В гексапode неподвижное основание (1) соединяется с платформой (2) с помощью шести линейных приводов (3) через шарниры (4). Перемещение верхней платформы (система координат  $O'x'y'z'$ ) относительно нижней ( $Oxyz$ )

✉ kis.lecha@yandex.ru



происходит во всех шести степенях свободы при изменении длин линейных приводов.

Для задания положения платформы относительно основания введем декартовы координаты  $X, Y, Z$  (положение  $O'$  в системе  $Oxyz$ ), а для ее ориентации – углы Эйлера, как показано на рис. 1б).

Отметим, что для принятой системы углов сначала осуществляется поворот на угол  $\varphi$  отно-

сительно оси  $x^*$  и переход к системе координат  $O'x''y''z''$ , затем – поворот на  $\xi$  вокруг  $y''$  и переход к  $O'x'y'z'$  и, наконец, – поворот на  $\psi$  вокруг  $z'$  и переход к системе координат верхней платформы  $O'x'y'z'$ . При этом, в зависимости от конкретного назначения наводимого объекта, можно использовать другой способ задания углов Эйлера, например, повороты относительно осей абсолютной системы координат  $O'x^*y^*z^*$ .

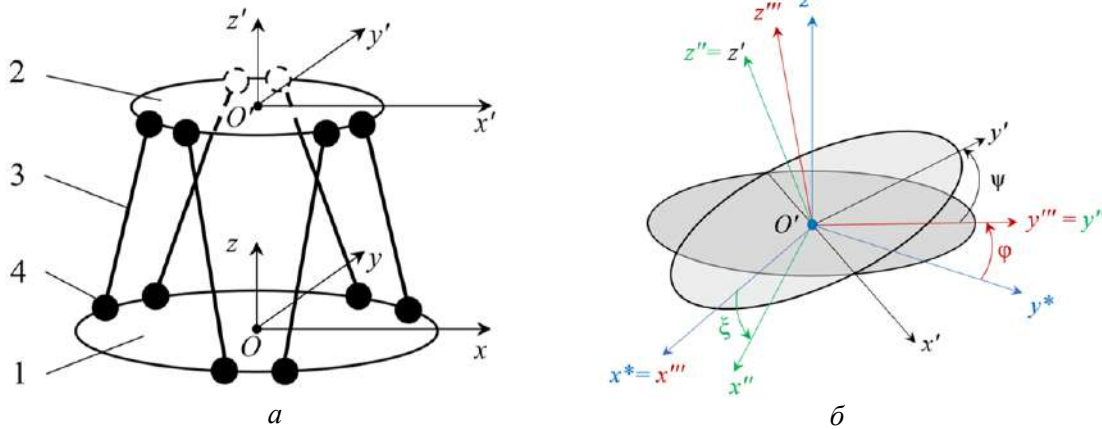


Рис. 1. Схема гексапода (а) и расположение его углов Эйлера (б)

Таким образом, положение подвижной платформы в пространстве описывается вектором:

$$\mathbf{q} = [X, Y, Z, \varphi, \xi, \psi]^T,$$

а управление гексаподом сводится к нахождению вектора  $\mathbf{L} = [L_1, \dots, L_6]^T$ , содержащего длины всех линейных приводов.

При управлении гексаподом чаще всего решаются две задачи кинематики [4; 8; 9]: обратная, то есть нахождение длин приводов  $\mathbf{L}$  по координатам верхней платформы  $\mathbf{q}$ , и прямая – определение  $\mathbf{q}$  по  $\mathbf{L}$ .

Решение задач кинематики базируется на преобразовании однородных координат платфор-

мы и основания:  $\mathbf{r} = \mathbf{T}_h \mathbf{r}'$ , где  $\mathbf{r} = [X, Y, Z, 1]^T$  – вектор координат некой точки в неподвижной системе  $Oxyz$  (рис. 1а),  $\mathbf{r}'$  – аналогичный вектор этой же точки, но в подвижной системе координат  $O'x'y'z'$ .

При этом матрица:

$$\mathbf{T}_h = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_p & \mathbf{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $\mathbf{p} = [X, Y, Z]^T$  – координаты в системе основания  $Oxyz$  центра системы платформы  $O'x'y'z'$ ,  $\mathbf{R}_p$  – матрица поворота, которая при использовании углов Эйлера, как показано на рис. 1б, равна:

$$\mathbf{R}_p = \begin{bmatrix} \cos \xi \cos \psi & -\cos \xi \sin \psi & \sin \xi \\ \cos \varphi \sin \psi + \cos \psi \sin \xi \sin \varphi & \cos \psi \cos \varphi - \sin \xi \sin \psi \sin \varphi & -\cos \xi \sin \varphi \\ \sin \psi \sin \varphi - \cos \psi \cos \varphi \sin \xi & \cos \psi \sin \varphi + \cos \varphi \sin \xi \sin \psi & \cos \xi \cos \varphi \end{bmatrix}.$$

Отметим, что кинематическая схема гексапода может строиться на основе приводов и шарниров с различным количеством степеней свободы.

Длину  $i$ -го привода гексапода можно найти с помощью выражения  $L_i = \|\mathbf{r}_{A_i} - \mathbf{T}_h \mathbf{r}'_{B_i}\|$ , где  $\mathbf{T}_h$  – матрица преобразования, вычисленная по приведенным выше уравнениям для заданного вектором  $\mathbf{q} = [X, Y, Z, \varphi, \xi, \psi]^T$  положения подвижной платформы гексапода;  $\mathbf{r}_{A_i}$  – вектор однородных координат в системе  $Oxyz$  шарнира основания  $A_i$ ,  $\mathbf{r}'_{B_i}$  – вектор однородных координат в системе  $O'x'y'z'$  шарнира платформы  $B_i$ .

Находя таким образом длину каждого привода гексапода, можем решить обратную задачу его кинематики.

В свою очередь, прямая задача кинематики для подобных механизмов не имеет единственного аналитического решения [10]. Так, для платформы Гью-Стюарта возможно существование до 40 таких решений, обусловленных в некоторых случаях количеством конфигураций сборки МПС с заданными длинами приводов.

Учитывая это обстоятельство, в рассматриваемом гексапode прямая задача кинематики гек-

сапода решается преимущественно численными методами. При этом чтобы избежать сингулярности, во время численных расчетов вместо углов Эйлера применяются кватернионы [4].

При прецизионном управлении полезной нагрузкой основным требованием является обеспечение высокой статической (квазистатической при движении с малыми скоростями) и динамической точности угловой ориентации и линейного позиционирования объектов.

## 1. Повышение статической и квазистатической точности гексапода

Для построения качественной системы управления МПС необходимо применение обратной связи по координатам платформы  $q$ . Однако экстремальные условия внешней среды делают ее реализацию практически невозможной из-за существенных ограничений на применяемую компонентную базу [11].

При реализации разомкнутой системы управления на точность наведения и позиционирования аппаратуры, закрепленной на подвижной платформе, будут влиять такие источники ошибок, как погрешности изготовления и сборки механической части, температурные расширения деталей, а также точность учета данных ошибок и параметров кинематики в программном обеспечении. При этом большая часть этих ошибок связана с линейными приводами МПС.

Таким образом, для повышения точности наведения, учитывая практические сложности при построении системы измерения координат подвижной платформы космического применения [12], а также для построения модульной конструкции рассматриваемого механизма, наиболее оптимальным является обеспечение функционирования линейных приводов как замкнутых исполнительных устройств или сервоприводов со встроенными датчиками линейного положения.

Накладываемые ввиду экстремальных условий эксплуатации ограничения на используемую компонентную базу значительно усложняют построение замкнутого по перемещению линейного привода, поэтому авторами было предложено [12; 13] использовать косвенную обратную связь по углу поворота в шарико-винтовой передаче (ШВП) с ее индивидуальной калибровкой и алгоритмом программной компенсации линейного теплового изменения размеров элементов гексапода.

Авторами было показано, что построение такого линейного привода требует ряд мероприятий для увеличения точности его работы. Так, необходимо обеспечить предварительный натяг в ШВП, высококачественную сборку, настройку датчиков нулевого положения. Также требуется

соблюдать допустимые режимы работы в части механических нагрузок, температурного диапазона и параметров движения, в том числе для того, чтобы не нарушать режимы смазывания.

При этом дополнительно вводится программная компенсация основных ошибок линейного привода, к которым относятся:

- систематические ошибки: погрешности ШВП, редуктора, обмоток двигателя и др.;
- температурные ошибки из-за изменения размеров деталей, вызванного нагревом или охлаждением;
- ошибки, вызванные упругими деформациями МПС под действием нагрузки.

Систематические ошибки можно компенсировать с помощью предварительной калибровки каждого линейного привода, температурные – путем размещения соответствующих датчиков и введения поправок в алгоритмы управления. Уменьшить влияние упругих деформаций при движении платформы МПС космического применения можно как путем снижения динамических нагрузок (работа в квазистатическом режиме), так и путем введения специального наблюдателя состояния в части линейной нагрузки на каждый привод и последующей программной компенсации упругой деформации [12; 13].

Применение указанных методов позволяет повысить в несколько раз статическую и квазистатическую точность механизма параллельной структуры, а также получить более дешевую и надежную систему наведения и ориентации различных приборов для космических аппаратов.

## 2. Повышение динамической точности гексапода

К механизмам параллельной структуры предъявляются жесткие требования не только в части показателей качества в статическом режиме (точность позиционирования), но и в динамическом режиме. Так, при управлении крупногабаритной конструкцией МПС должен минимизировать длительность переходных процессов позиционирования и наведения объекта и оказывать минимальные динамические возмущения как на объект управления, так и на КА, на котором закреплен МПС.

Достичь этого можно введением ограничений на развиваемые скорости, ускорения, и другие производные положения подвижной платформы МПС. Это позволяет как защитить оборудование и КА от чрезмерных динамических нагрузок, так и ограничить мощность, потребляемую МПС.

Для реализации управления МПС с динамическими ограничениями необходимо применять специальные алгоритмы планирования траектории движения верхней платформы. При этом

управление МПС может осуществляться в различных режимах:

- контурное управление – платформа движется от начальной к конечной точке по непрерывному, жестко заданному пути;
- траекторное управление – платформа движется от начальной к конечной точке по непрерывному пути с прохождением заданных промежуточных точек (узлов);
- позиционное управление – платформа движется от начальной к конечной точке по произвольной траектории.

Планирование пути между заданными начальной, конечной и (при наличии) узловыми точками может быть реализовано различными методами интерполяции траектории [13]. При этом для многосвязных механизмов такая задача может решаться как на устройстве верхнего уровня, реализующем управление выходной координатой всего устройства [14–16], так и на устройствах нижнего уровня, управляющих отдельными приводами.

Преимуществом реализации траектории системой управления нижнего уровня (непосредственно привода) является более простой контроль развиваемых им скоростей, ускорений и рывков (скоростей ускорений), так как в реальных системах помимо заданных ограничений динамического воздействия на полезную нагрузку и несущую платформу, есть еще физические ограничения возможностей приводов (например, ограниченные возможностями электродвигателя и источника питания скорость и развиваемый момент).

Однако, при такой реализации планирования траектории практически невозможно добиться движения верхней платформы гексапода по заданному пути, а также довольно трудно пересчитывать ограничения по динамике, накладываемые на платформу к ограничениям на приводах [17].

В свою очередь, реализация алгоритма планирования траектории на устройстве верхнего уровня (в координатах платформы) позволяет ограничивать такие динамические возмущения напрямую для объекта управления, а также обеспечивать движение платформы по заданному пути.

Для позиционного режима такое управление обычно реализуется разбиением пути на участки, которые интерполируются полиномами различных степеней. Так, часто используемая траектория типа 4-3-4 включает три участка, описываемые полиномами четвертой, третьей и четвертой степеней соответственно [16]. При этом рассчитать коэффициенты полиномов 4-3-4 напрямую, исходя из заданных ограничений на скорости, ускорения и рывки платформы, затруднительно. Для ограничения динамики движения объекта целесообразно использовать траекторию движения 3-2-3-1-3-2-3. Входными данными алгоритма расчета ее коэффици-

циентов, предложенного в [14], являются указанные ограничения напрямую.

Отметим, что на практике применить алгоритм планирования траектории 3-2-3-1-3-2-3 напрямую для обобщенных координат длин приводов  $\mathbf{L}$  не получается, так как после решения обратной задачи кинематики траектории приводов будут иметь производные более высоких порядков, чем траектория платформы гексапода. При этом получение первой и последующих производных  $\mathbf{L}$  требует проведения многократного численного дифференцирования, при котором погрешность значительно возрастает вместе с порядком производных.

Известно, что для уменьшения как статических, так и динамических ошибок управления многосвязными объектами можно применить алгоритмы управления, обеспечивающие учет и компенсацию влияния динамических эффектов на основе решения обратной задачи динамики механизма. Так, динамика гексапода может быть описана уравнением Лагранжа второго рода:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q}),$$

где  $\boldsymbol{\tau}$  – вектор усилий и моментов в пространстве декартовых координат;  $\mathbf{M}(\mathbf{q})$  – матрица инерции гексапода;  $\mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  – матрица кориолисовых и центробежных усилий и моментов;  $\mathbf{G}(\mathbf{q})$  – матрица гравитационных сил.

При управлении с компенсацией составляющих  $\boldsymbol{\tau}$  можно уменьшить влияние нелинейных и нестационарных элементов матриц  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$  и  $\mathbf{G}$ , и, тем самым, уменьшить ошибки управления, задаваемые разностями реальных координат платформы  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \ddot{\mathbf{q}}$  и задаваемых величин  $\mathbf{q}_3, \dot{\mathbf{q}}_3, \ddot{\mathbf{q}}_3$ .

На рис. 2 приведен пример реализации такой системы управления гексаподом, использующей решение прямой задачи кинематики (ПЗК) и обратной задачи динамики (ОЗД) [8]. Здесь  $\mathbf{J}$  – матрица Якоби гексапода,  $\mathbf{F} = (\mathbf{J}^T)^{-1} (\boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2)$  – вектор сил в линейных приводах гексапода, где  $\boldsymbol{\tau}_1$  формируется ПД-регулятором с матрицами коэффициентов  $\mathbf{K}_\Pi$  и  $\mathbf{K}_\Delta$ , а  $\boldsymbol{\tau}_2 = \mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}}_3 + \mathbf{N}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{G}(\mathbf{q})$  – рассчитываемый с помощью ОЗД компенсационный вектор.

Отметим, что, несмотря на все имеющиеся преимущества, практическая реализация такой системы управления затруднительна. В первую очередь, необходимо знать точные параметры матриц  $\mathbf{J}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{N}$  и  $\mathbf{G}$ , характеризующие массо-инерционные и упруго-демпфирующие свойства конкретного гексапода. При этом нахождение этих матриц на каждом такте управления требует значительных вычислительных мощностей.

Рассмотрим силы, возникающие в линейном приводе гексапода при сложном гармоническом движении подвижной платформы по всем шести

степеням свободы одновременно в квазистатическом режиме, а также при увеличенных в 20 и 60 раз

скоростях по каждой координате. На рис. 3–5 приведены графики составляющих этих усилий.

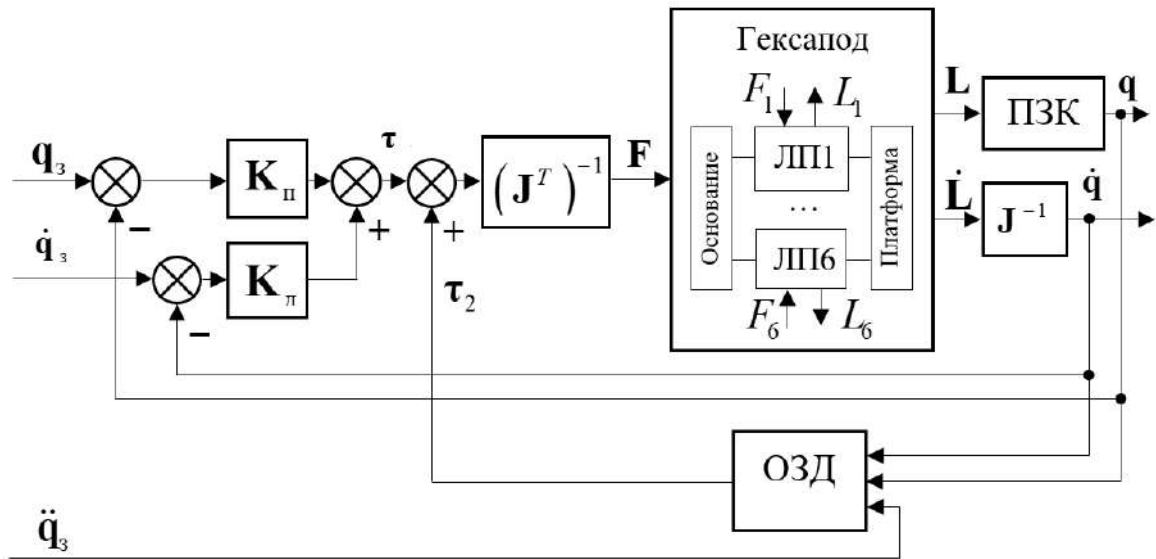


Рис. 2. Система управления гексапода с решением ПЗК и ОЗД

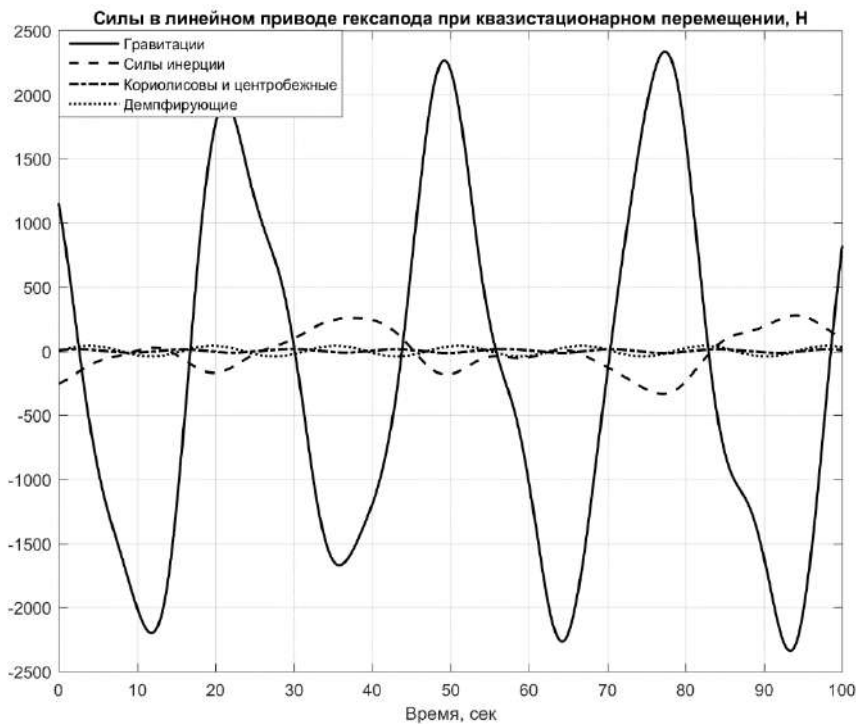


Рис. 3. Силы, возникающие в линейном приводе при квазистатическом режиме работы гексапода

Из рисунков видно, что помимо гравитационных сил, которые не зависят от скоростей движения и практически не проявляются при работе МПС в условиях микрогравитации, основной вклад в суммарное усилие нагрузки привода вносят силы инерции.

Учитывая вышесказанное, а также сложность построения системы управления, компенсирую-

щей динамику движения механизмов параллельной структуры (рис. 2) и условия функционирования рассматриваемого гексапода (квазистатический режим в невесомости), рассмотрим вариант построения системы управления в пространстве обобщенных координат платформы механизма параллельной структуры (длин приводов), приведенный на рис. 6.

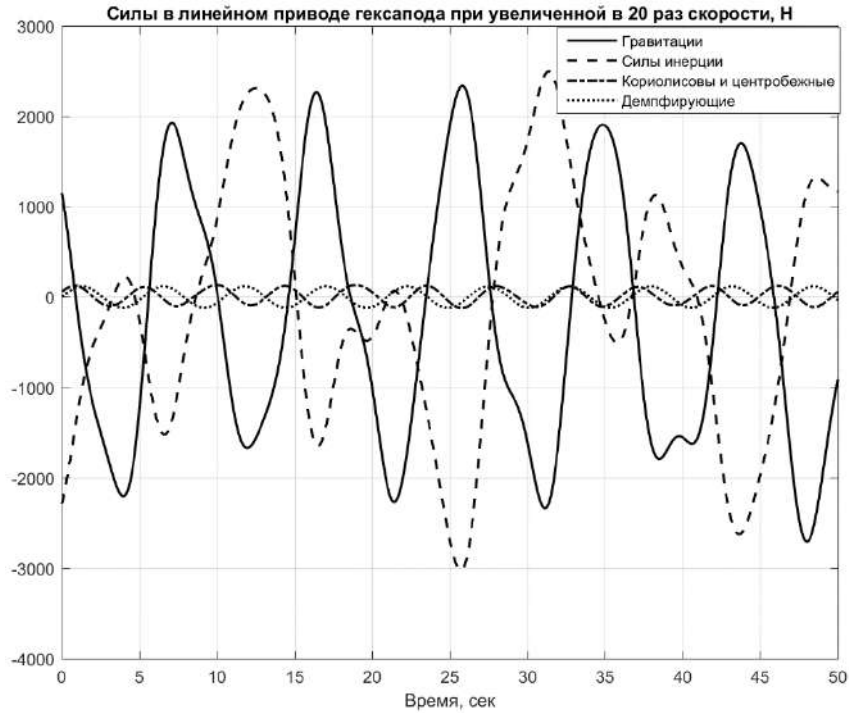


Рис. 4. Силы, возникающие в линейном приводе гексапода при увеличенных в 20 раз скоростях движения платформы

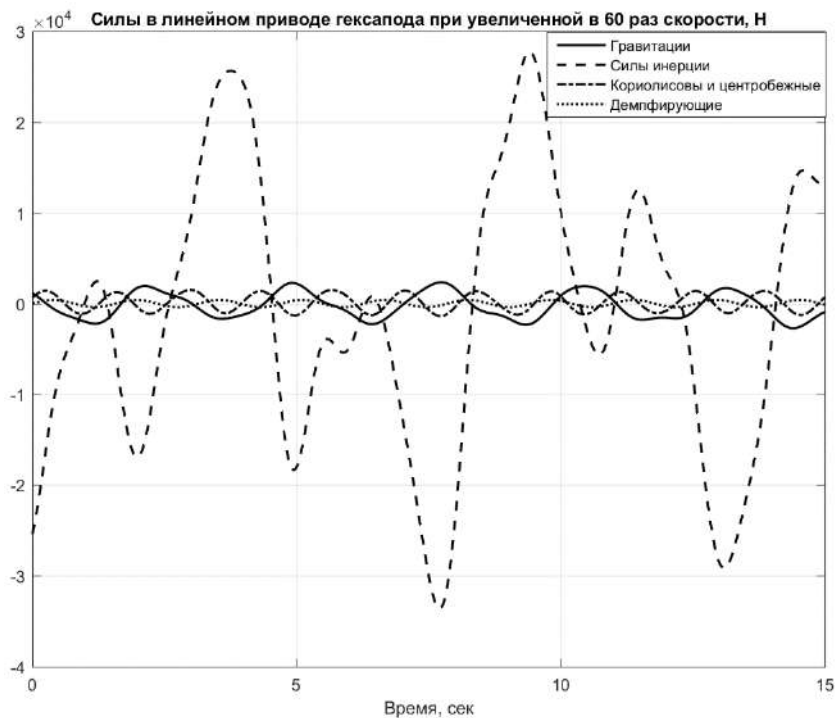


Рис. 5. Силы, возникающие в линейном приводе гексапода при увеличенных в 60 раз скоростях движения платформы

Система на рис. 6 работает следующим образом. На этапе подготовки к движению МПС (объекта управления) выполняется по алгоритму [14] расчет траектории для заданного вектора конечного поло-

жения платформы  $\bar{\mathbf{q}}_3 = [\bar{X}_3, \bar{Y}_3, \bar{Z}_3, \bar{\varphi}_3, \bar{\xi}_3, \bar{\psi}_3]$  с учетом ограничений  $\bar{\mathbf{q}}_3, \dot{\bar{\mathbf{q}}}_3, \ddot{\bar{\mathbf{q}}}_3$ . Результатом этого расчета для цифровой системы управления является вектор:

$$\mathbf{q}_3(kT) = [x_3(kT), y_3(kT), z_3(kT), \alpha_3(kT), \beta_3(kT), \gamma_3(kT)],$$

где  $k = \overline{1, n}$  – номер такта системы управления,  $T$  – период ее дискретизации.



Путем решения обратной задачи кинематики механизмов параллельной структуры полученный набор данных  $\langle \mathbf{q}_3(T), \mathbf{q}_3(nt) \rangle$  пересчитывается в набор задаваемых длин линейных приводов  $\langle \mathbf{q}_3(T), \mathbf{q}_3(nt) \rangle$ , которые в режиме реального времени передаются на соответствующие системы управления нижнего уровня. Реализуя ограничения  $\mathbf{q}_3, \dot{\mathbf{q}}_3, \ddot{\mathbf{q}}_3$  таким образом, чтобы гексапод функционировал в квазистатическом режиме, и учитывая практически полное отсутствие сил гравитации, можем предположить, что основные статические и динамические ошибки такого движения будут определяться только квазистатическими ошибками линейных приводов.

Отметим, что на практике при физических ограничениях интерфейсов связи в части скорости передачи данных и соответствующем увеличении периода дискретизации  $T$ , возможно применять дополнительную внутрипериодную интерполяцию значений, принимаемых системой управления привода. Управление электродвигателем такого следящего привода может быть реализовано в векторном режиме с помощью датчика угла (например, вращающийся трансформатор) и датчиков тока (шунтов), что позволяет улучшить его динамические характеристики, регулируя момент и потокосцепление ротора [13].

## Заключение

Для прецизионного управления МПС, предназначенного для функционирования в экстремальных условиях космического пространства, требуется построение замкнутой по положению подвижной платформы системы управления. При этом из-за практической невозможности применения датчиков такую обратную связь следует реализовывать косвенным методом по углу поворота вала исполнительного двигателя линейного привода. При этом, для обеспечения высокой точности работы МПС такая система требует применения различных решений для компенсации ошибок. Так, для повышения статической точности МПС необходим предварительный натяг шарико-винтовой передачи и другие конструктивные решения, при этом погрешность изготовления передачи и ее температурное расширение можно компенсировать программно.

Для повышения динамической точности управления необходимо применение траекторного управления с ограничениями максимальных рывков, ускорений и скоростей движения платформы гексапода. При этом формировать траекторию движения МПС следует в координатах платформы, далее пересчитывать в обобщенные координаты (длины линейных приводов) и обрабатывать их в следящем режиме.

## Список литературы

- [1] Тестоедов Н. А. Сибирский центр российского спутникостроения // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2012. № 2. С. 126–139.
- [2] Космическая обсерватория «Миллиметрон» [Электронный ресурс]. URL: <http://millimetron.ru> (дата обращения: 01.03.2023).
- [3] Lightsey P., Atkinson Ch., Clampin M., Feinberg L. James Webb Space Telescope: Large deployable cryogenic telescope in space // Optical Engineering. 2012. vol. 51. issue 1. 011003. doi: 10.1117/1.OE.51.1.011003.
- [4] Жуков Ю. А., Лычагин Ю. В., Слободзян Н. С. Решение задач кинематики гексапода в реальном времени // Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. 2017. С. 87–91.
- [5] Sayarin S. N., Artemenko Y. N. Intelligence System for Active Vibration Isolation and Pointing of Ultrahigh-Precision Large Space Structures in Real Time. Springer International Publishing. pp. 103–115.
- [6] Дорофеева Е. С., Мирзаев Р. А., Смирнов Н. А. Механизмы ориентации антенн космических аппаратов // Сб. материалов конф. «Актуальные проблемы авиации и космонавтики». 2014. Т. 1. №. 10. С. 83–84.
- [7] Kong Y., Huang H. Vibration isolation and dual-stage actuation pointing system for space precision payloads // Acta Astronautica. 2018. vol. 143. pp. 183–192. doi: 10.1016/j.actaastro.2017.11.038.
- [8] Джукич Д. Й., Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Мороз А. В., Слободзян Н. С. Цифровое управление гексаподом на основе обратной модели динамики с реализацией на радиационно стойком ARM-микроконтроллере // Вопросы радиоэлектроники. 2018. № 7. С. 103–110.
- [9] Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С., Яковенко Н. Г. Оценка решения задач кинематики в системе управления механизмом с параллельной кинематикой космического применения на базе гексапода // Оборонная техника. 2017. № 9. С. 29–37.
- [10] Dietmaier. The Stewart-Gough Platform of General Geometry can have 40 Real Postures // Journal of Mechanical Design. 1998. vol. 115. no. 2. pp. 277–282.
- [11] International Space Station (ISS) Researcher's Guide [Электронный ресурс]. URL: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-015-JSC\\_Space\\_Environment-ISS-Mini-Book-2015-508.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-015-JSC_Space_Environment-ISS-Mini-Book-2015-508.pdf) (дата обращения: 01.03.2023).
- [12] Матвеев С. А., Коротков Е. Б., Слободзян Н. С., Жуков Ю. А., Киселев А. А. Прецизионное управление шестистепенным механизмом с параллельной кинематикой космического назначения на основе компенсации

- кинематических и температурных ошибок // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2020. № 2. С. 12–20.
- [13] Слободзян Н. С. Позиционное управление линейным приводом мехатронного устройства с параллельной кинематикой // Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 9. С. 6–13.
- [14] Lambrechts P., Boerlage M., Steinbuch M. Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems // Control Engineering Practice. 2005. vol. 13. no. 2. pp. 145–157.
- [15] Артеменко Ю. Н., Агапов В. А., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа // Информационно-управляющие системы. 2012. № 4 (59). С. 2–9.
- [16] Жуков Ю. А., Коротков Е. Б., Мороз А. В. Кинематическое управление гексаподом космического применения // Материалы Всерос. науч.-техн. конф. «Интеллектуальные системы, управление и мехатроника». 2018. С. 67–71.
- [17] Beiki M., Irani-Rahaghi M. Optimal trajectory planning of a six DOF parallel Stewart manipulator // 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM). 2018. pp. 120–125.

## INCREASING THE STATIC AND DYNAMIC ACCURACY OF THE PARALLEL STRUCTURE MECHANISM FOR SPACE APPLICATION

**S. A. Matveev, N. S. Slobodzyan, A. A. Kiselev,  
Yu. A. Zhukov, E. B. Korotkov**

*Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D. F. Ustinov,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

*The article considers the control system of a parallel structure mechatronic device for space application such as a hexapod (Stewart platform). The solution of the inverse problem of kinematics is described and the necessity of solving the direct problem of kinematics by numerical methods is substantiated. During the research, it was revealed that the main source of positioning errors of the hexapod without the main feedback is its linear drives, which have systematic errors in the mechanical part of the linear transmission, gearbox, in the location of the motor windings; temperature errors due to changes in the dimensions of parts due to heating or cooling; errors caused by elastic deformations under load. To improve the static accuracy of the hexapod, a number of both design and software solutions are proposed: mechanical transmission preload, individual calibration of each drive, compensation for thermal expansion, etc. To improve the dynamic accuracy, it is proposed to use the method of controlling linear drives in the servo mode along with ensuring the trajectory of the platform with the limitation of the speed of its movement and derivatives of the speed. The use of these methods makes it possible to significantly improve the accuracy of the operation of the mechanisms of a parallel structure and, thereby, to approach the achievement of the limiting qualitative properties of onboard optical-electronic and information systems of spacecraft and stations.*

*Keywords: parallel structure mechanism, hexapod, Stewart platform, static accuracy, dynamic accuracy, error, error compensation, trajectory control.*

### References

- [1] Testoedov N. A. *Sibirskij centr rossijskogo sputnikostroeniya* [Siberian Centre of Russian satellite designing] // Journal of Siberian Federal University. Technics and technology, 2012, no. 2, pp. 126–139. (In Russian)

- [2] *Kosmicheskaya observatoriya «Millimetron»* [Space Observatory «Millimetron»]. Available at: <http://millimetron.ru> (accessed 01.03.2023). (In Russian)
- [3] Lightsey P., Atkinson Ch., Clampin M., Feinberg L. James Webb Space Telescope: Large deployable cryogenic telescope in space // *Optical Engineering*, 2012, vol. 51, issue 1, 011003. doi: 10.1117/1.OE.51.1.011003.
- [4] Zhukov Yu. A., Lychagin Yu. V., Slobodzyan N. S. *Reshenie zadach kinematiki geksapoda v real'nom vremeni* [Real-time solution of hexapod kinematics problems] // Materials of the III All-Russian scientific and technical conference of young scientists, graduate students and students, 2017, pp. 87–91. (In Russian)
- [5] Sayapin S. N., Artemenko Y. N. *Intelligence System for Active Vibration Isolation and Pointing of Ultrahigh-Precision Large Space Structures in Real Time*. Springer International Publishing, pp. 103–115.
- [6] Dorofeeva E. S., Mirzaev R. A., Smirnov N. A. *Mekhanizmy orientacii antenn kosmicheskikh apparatov* [Mechanisms for orientation of spacecraft antennas] // Materials of the conference «Actual problems of aviation and astronautics», 2014, vol. 1, no. 10, pp. 83–84. (In Russian)
- [7] Kong Y., Huang H. Vibration isolation and dual-stage actuation pointing system for space precision payloads // *Acta Astronautica*, 2018, vol. 143, pp. 183–192. doi: 10.1016/j.actaastro.2017.11.038.
- [8] Dzhukich D. Y., Zhukov Yu. A., Korotkov E. B., Moroz A. V., Slobodzyan N. S. *Cifrovoye upravlenie geksapodom na osnove obratnoy modeli dinamiki s realizaciej na radiacionno stojkom ARM-mikrokontrollere* [Digital control of a hexapod based on an inverse dynamics model with implementation on a radiation-resistant ARM microcontroller] // *Voprosy radioelektroniki*, 2018, no. 7, pp. 103–110. (In Russian)
- [9] Zhukov Yu. A., Korotkov E. B., Slobodzyan N. S., Yakovenko N. G. *Ocenka resheniya zadach kinematiki v sisteme upravleniya mekhanizmom s parallel'noj kinematikoj kosmicheskogo primeneniya na baze geksapoda* [Evaluation of the solution of kinematics problems in the control system of a mechanism with parallel kinematics of space application based on a hexapod] // *Defense Engineering*, 2017, no. 9, pp. 29–37. (In Russian)
- [10] Dietmaier. The Stewart-Gough Platform of General Geometry can have 40 Real Postures // *Journal of Mechanical Design*, 1998, vol. 115, no. 2, pp. 277–282.
- [11] International Space Station (ISS) Researcher's Guide. Available at: [https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-015-JSC\\_Space\\_Environment-ISS-Mini-Book-2015-508.pdf](https://www.nasa.gov/sites/default/files/files/NP-2015-03-015-JSC_Space_Environment-ISS-Mini-Book-2015-508.pdf) (дата обращения: 01.03.2023).
- [12] Matveev S. A., Korotkov E. B., Slobodzyan N. S., Zhukov Yu. A., Kiselev A. A. *Precizionnoye upravlenie shestistepennym mekhanizmom s parallel'noj kinematikoj kosmicheskogo naznacheniya na osnove kompensacii kinematicheskikh i temperaturnykh oshibok* [Precision control of a six-degree mechanism with parallel space kinematics based on kinematic and temperature error compensation] // *Izv. VUZ. Aviatsionnaya Tekhnika*, 2020, no. 2, pp. 12–20. (In Russian)
- [13] Slobodzyan N. S. *Pozicionnoye upravlenie linejnym privodom mekhatronnogo ustrojstva s parallel'noj kinematikoj* [Positional control of a linear drive of a mechatronic device with parallel kinematics] // *Voprosy radioelektroniki*, 2020, no. 9, pp. 6–13. (In Russian)
- [14] Lambrechts P., Boerlage M., Steinbuch M. Trajectory planning and feedforward design for electromechanical motion systems // *Control Engineering Practice*, 2005, vol. 13, no. 2, pp. 145–157.
- [15] Artemenko Yu. N., Agapov V. A., Dubarenko V. V., Kuchmin A. Yu. *Gruppovoye upravlenie aktuatorami kontrreflektora radioteleskopa* [Group control of radio telescope counterreflector actuators] // *Information and control systems*, 2012, no. 4 (59), pp. 2–9. (In Russian)
- [16] Zhukov Yu. A., Korotkov E. B., Moroz A. V. *Kinematicheskoye upravlenie geksapodom kosmicheskogo primeneniya* [Kinematic control of a hexapod for space applications] // Materials of the conference «Intelligent systems, control and mechatronics», 2018, pp. 67–71. (In Russian)
- [17] Beiki M., Irani-Rahaghi M. Optimal trajectory planning of a six DOF parallel Stewart manipulator // 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM), 2018, pp. 120–125.

## Сведения об авторах

*Жуков Юрий Александрович* – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические и мехатронные системы», старший преподаватель кафедры И8 «Системы приводов, мехатроника и робототехника» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Область научных интересов: робототехника, мехатроника, компьютерное моделирование сложных систем.

ORCID: 0000-0001-7552-2899

*Киселев Алексей Александрович* – аспирант, инженер второй категории научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические и мехатронные системы» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Область научных интересов: микропроцессорная техника, системы управления электроприводом, робототехника.

ORCID: 0000-0002-7767-9969

*Коротков Евгений Борисович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Робототехнические и мехатронные системы», доцент кафедры И8 «Системы приводов, мехатроника и робототехника» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Область научных интересов: информационные системы в мехатронике и робототехнике, электропривод, системы управления.

*Матвеев Станислав Алексеевич* – кандидат технических наук, проректор по научной работе и инновационному развитию, заведующий кафедрой И9 «Системы управления и компьютерные технологии» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, лауреат Государственной премии имени маршала Г. К. Жукова. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, беспилотные летательные аппараты, системы специального назначения.

ORCID: 0000-0001-5206-2957

*Слободзян Никита Сергеевич* – кандидат технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией «Робототехнические и мехатронные системы», доцент кафедры И8 «Системы приводов, мехатроника и робототехника» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова. Окончил аспирантуру БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова в 2020 году. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, мехатроника, системы управления.

ORCID: 0000-0002-8011-3923

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕТСТВЕННЫХ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

К. Е. Пономарев, И. В. Стрельников✉

АО «НПО Лавочкина»,

г. Химки, Московская область, Российская Федерация

*Обоснована возможность применения в качестве альтернативы термической обработке вибрационных технологий, имеющих меньшую длительность, малую энергозатратность, низкие капитальные затраты и сопоставимую эффективность. Выделены приоритетные области применения способов вибрационной обработки ответственных сварных конструкций: послесварочной и сопутствующей. Показаны достоинства и сложности при внедрении данных способов: возможность контроля эффективности послесварочной обработки по изменению амплитудно-частотной характеристики, повышение прочности и пластичности и оптимизация геометрических параметров сварного шва, совмещение времени обработки совместно со сварочным производственным циклом при сопутствующей обработке. Приведены краткие результаты опытных работ по критериям остаточных напряжений и остаточных деформаций для разных типов сварных соединений, таких как стыковое, тавровое и нахлесточное, и нескольких групп материалов, таких как алюминиевые сплавы, углеродистые и нержавеющие стали. Сделано заключение о перспективности применения послесварочной вибрационной обработки для габаритных жестких, образующих замкнутый контур, составленных из множества деталей и подборок, сварных конструкций в сборочно-сварочных специальных кондукторах или универсально-сборочных приспособлениях, а также об изначальном снижении остаточных деформаций при сопутствующей вибрационной обработке сварных соединений.*

*Ключевые слова: вибрационная обработка, дуговая сварка, сопутствующая виброобработка, послесварочная виброобработка, остаточная деформация, остаточное напряжение.*

### Введение

Современные сварные конструкции космического машиностроения требуют стабилизации геометрических размеров и уменьшения сварочных деформаций во времени путем снижением уровня внутренних напряжений при изготовлении. Эти особенности обусловлены закономерностями протекания термомодеформационного цикла дуговой сварки, приводящего к изменению формы и размеров конструкции вследствие образования неравномерных полей остаточных напряжений и, как следствие, деформаций. Деформации затрудняют процесс сборки, увеличивают припуски на механическую обработку. Релаксация напряжений приводит к дополнительным деформациям, в том числе, в процессе изготовления.

Для минимизации послесварочных деформаций в ответственных случаях применяется сборка и сварка в жестких точных кондукторах с последующей термической обработкой в том же кондукторе. Поэтому необходимость изготовления дорогостоящей, точной и фактически одноразовой оснастки является одним из основных недостатков термической обработки в заневоленном состоянии. Также велика энергозатратность, а в ряде случаев и просто неосуществимость такой термообработки из-за размеров сварной конструкции. Требуются повышенные капитальные затраты на оборудование. При этом возможно и нежелательное изменение свойств материала сварной конструкции [1; 2].

Вибрационная обработка имеет перспективу применения в качестве эффективной альтернативы термической обработке из-за лучшей технологической осуществимости. Технология имеет два технологических варианта исполнения: сопут-

✉ StrelnikovIV@laspace.ru



ствующая сварке виброобработка и послесварочная виброобработка [3–9].

### 1. Технологические особенности послесварочной виброобработки

Послесварочная виброобработка основана на микропластических деформациях при превышении суммы послесварочных напряжений и напряжений от вибровоздействия над пределом текучести и применяется для двух случаев: во-первых, для стабилизации размеров массивных или толстостенных сварных конструкций и, во-вторых, для минимизации послесварочных деформаций ферменных сварных конструкций, жестко закрепленных в сборочно-сварочных конструкциях. Следует также отметить, что существуют обстоятельства, когда предпочтительно применение послесварочной виброобработки: при сварке короткой дугой, при неудобном положении сварщика, при последовательном группировании сборок в большие громоздкие конструкции. Послесварочная виброобработка проводится на резонансных частотах (обычно ограничиваются первой резонансной частотой). При физических ограничениях, связанных с возможными поломками или повреждениями сварных конструкций, обработка проводится на околорезонансных частотах [7–14]. Актуальность использования послесварочной виброобработки достаточно многогранна и наглядна. Особенно эффективно ее применение в космическом машиностроении на сварных силовых высоконагруженных стержневых конструкциях в условиях единичных разработок или мелкой серии, когда еще не известны деформации узловых посадочных мест и не определена оптимальная последовательность сварки всех соединений. Сборку таких конструкций удается производить в жестких универсальных сборочно-сварочных приспособлениях, детали которых используются впоследствии многократно. Сварку конструкций производят также в данных приспособлениях, при этом посадочные места удерживаются в требуемых конструкторской документацией положениях. После сварки производится комплексная виброобработка сварной конструкции в целом совместно с универсальным сборочно-сварочным приспособлением (УССП), при этом УССП виброизолируется от пола цеха или столов сварщиков. Учитывая сложность конструкции, иногда приходится производить обработку в несколько приемов, с переустановкой вибратора на новое место. Время виброобработки составляет, как правило, менее 1–10 % от времени вибрационных испытаний и практически не влияет на расчетный ресурс по усталости. Результат положителен: после раскрепления конструкции посадочные места находятся в рамках припусков на механическую

обработку, после проведения которой размеры попадают в допуск конструкторской документации.

### 2. Технологические особенности сопутствующей виброобработки

Сопутствующая виброобработка основана на интенсификации процессов ползучести в твердом металле при повышенных температурах, а также на особенностях механического воздействия на жидкий и кристаллизующийся металл сварочной ванны, и может применяться для различных ситуаций. Например, когда возможно стабилизировать размеры и уменьшить остаточные деформации при:

- сварке жестких, закрепленных сварных конструкций малых или средних размеров;
- сварке негерметичных конструкций;
- сварке толстостенных заготовок между собой;
- наплавке поверхностей.

Сопутствующая виброобработка выполняется в режимах, определяемых опытным путем из учета оптимального формирования проплава сварного шва, стабильного горения сварочной дуги, а также отсутствия тремора у сварщика; рабочий диапазон частот обычно составляет от 10 до 80 Гц, амплитуды – от  $\pm 0,05$  до  $\pm 0,3$  мм [7–14]. Также у сопутствующей виброобработки имеются дополнительные достоинства: увеличивается усталостная прочность в результате получения сварного соединения с плавными сопряжениями с основным материалом, повышаются механические свойства – повышаются пластичность и прочностные характеристики; шов получается более узким [10; 13]. В перспективе возможна замена ручной сварки на автоматическую, например, роботизированную.

### 3. Сравнение эффективности различных способов виброобработки

Для стальных и алюминиевых сварных конструкций перспективно внедрение виброобработки прежде всего для стыковых соединений: как послесварочная, так и сопутствующая виброобработка позволяют добиться почти двукратного снижения величины остаточных напряжений. Напряжения в нахлесточных сварных соединениях для стальных и алюминиевых сварных конструкций при сопутствующей виброобработке снижаются на 50 %, в то время как при послесварочной – только на 10 %. В тавровых соединениях уровень напряжений снижается на 40 % для стали и на 30 % для алюминия при сопутствующей, а при послесварочной – на 15 % для обоих материалов [7–14].

Суммируя, следует отметить, что эпюры сопутствующей виброобработки имеют отчетли-

во «сглаженный» вид, в то время как эпюры после сварочной обработки получают «срез» прежде всего пиковых значений, причем характер эпюр для после сварочной обработки зависит от жесткости (расстояния от заделки) (рисунок). Таким

образом, сопутствующая вибрационная обработка приводит к перераспределению напряжений равномерно по всей конструкции, что позволяет ожидать ее повышенной размерной стабильности во времени [11–14].

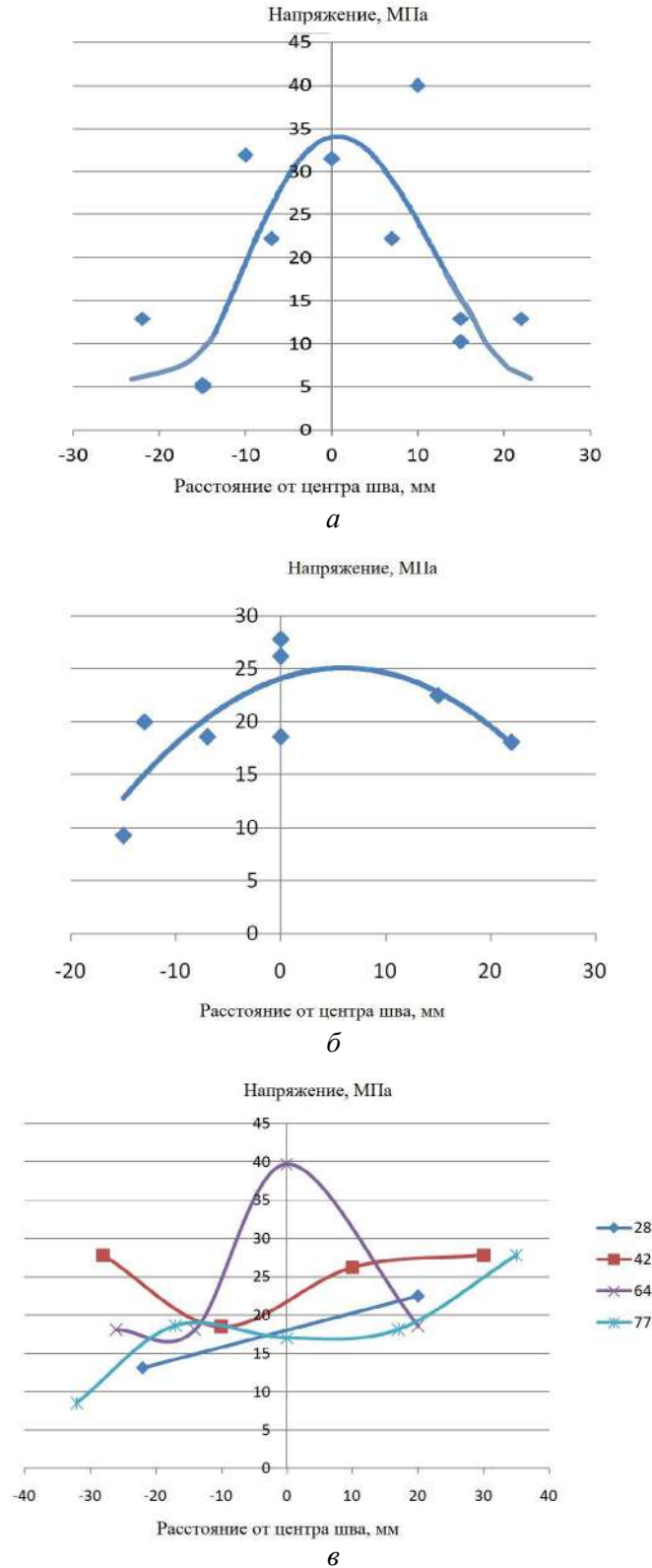


Рис. Эпюры остаточных напряжений для алюминиевых сплавов: *а* – традиционная сварка; *б* – сварка с сопутствующей виброобработкой; *в* – сварка и после сварочная виброобработка (цифрами указаны расстояния от заделки в мм) [11–14]

Оба способа вибрационной обработки пригодны для контроля одними и теми же методами: рентгеновской дифрактометрией, спеклинтерферометрией с засверливанием отверстий, ультразвуковым методом. Однако послесварочная обработка имеет возможность дополнительного контроля результативности процесса сравнением амплитудно-частотных характеристик до и после процесса, а также изменением электропотребления вибратора [15].

## Заключение

Таким образом, выявлена перспективность применения различных способов виброобработки при получении ответственных, высокостабильных во времени сварных конструкций. При этом значительно сокращается время, а также уменьшаются капитальные вложения и энергозатраты по сравнению с термической обработкой. Способы вибрационных обработок – послесварочная и сопутствующая – имеют свои достоинства и области применения: послесварочную обработку эффективно применять в процессе изготовления жестких, громоздких, состоящих из нескольких подузлов конструкций, предварительно собранных и сваренных в заневоленном состоянии с даль-

нейшей виброобработкой в этом же состоянии, сопутствующую обработку можно реализовать для небольших тонкостенных сварных конструкций большой и средней жесткости, для наплавки элементов и для толстостенных конструкций. Внедрение вибрационной обработки для получения высокоточных, надежных и высокостабильных сварных конструкций в ряде случаев имеет беспспорную перспективу.

Кроме того, можно сделать следующие выводы:

1. Для стальных и алюминиевых сварных конструкций наиболее перспективно внедрение виброобработки для стыковых соединений: как послесварочная, так и сопутствующая виброобработки позволяют добиться почти двукратного снижения величины остаточных напряжений.

2. Эффективность виброобработки для стальных сварных конструкций несколько выше, чем для алюминиевых.

3. Сопутствующая виброобработка уменьшает остаточные деформации.

4. Сопутствующая виброобработка приводит к получению сварного соединения с плавными сопряжениями с основным материалом, повышаются пластичность и прочностные характеристики, а ширина сварного шва уменьшается.

## Список литературы

- [1] Сагалевиц В. М. Устранение сварочных деформаций в машиностроительных конструкциях. М. : НИИИИформтяжмаш, 1969. 79 с.
- [2] Дрыга А. И. Вибростабилизирующая обработка сварных и литых деталей в машиностроении (теория, исследования, технология). Краматорск : ДГМА, 2004. 168 с.
- [3] Govindarao P., Gopalakrishna A. Affect of vibratory welding process to improve the mechanical properties of butt welded joints // International journal of modern engineering research. 2012. vol. 2. issue 4. pp. 2766–2770.
- [4] Shaikh S. N. Vibratory Residual Stress Relieving- A Review // Journal of Mechanical & Civil Engineering. 2016. no. 3. pp. 01–04. doi: 10.9790/1684-15008030301-04.
- [5] Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds // Science and Technology of Welding & Joining. 2016. issue 4. pp. 45–49. doi: 10.1179/1362171815Y.0000000088.
- [6] Лашенко Г. И. Технологические возможности вибрационной обработки: обзор // Автоматическая сварка. 2016. № 7. С. 28–34.
- [7] Ebrahimi S. M., Farahani M., Akbari D. The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. vol. 102. pp. 2147–2158. doi: 10.1007/s00170-019-03288-y.
- [8] Singh J., Kumar G., Garg N. Influence of vibrations in arc welding over mechanical properties and microstructure of butt-welded-joints // International Journal of Science & Technology. 2012. vol. 2. issue 1. pp. 1–6.
- [9] Пономарев К. Е., Стрельников И. В. К вопросу применения вибрационной обработки сварных конструкций космических аппаратов для повышения точности и размерной стабильности. Обзор // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. 2017. № 4 (38). С. 89–95.
- [10] Стрельников И. В. Влияние сопутствующей вибрационной обработки на остаточную деформацию и геометрию сварных соединений переменной жесткости // Сварка и диагностика. 2018. № 3. С. 24–29.
- [11] Пономарев К. Е., Стрельников И. В., Антонов А. А., Уткин И. Ю. Оценка влияния параметров режима сопутствующей вибрационной обработки на остаточные напряжения алюминиевых сварных конструкций с привлечением полного факторного эксперимента // Сварка и диагностика. 2022. № 2. С. 30–33.
- [12] Ratnathicam Sh. A study of the effect of vibration on the residual stresses in a welded fabricated tube // Thesis of Master of Science in Applied Science. Portland State University. 1979. 84 p. doi: 10.15760/etd.2891.

- [13] Sedec P. Vibration treatment—effective method of improving the dimensional stability of welded structures: investigation and practice // *Welding and Surfacing*. 1997. vol. 8. pp. 221–228.
- [14] Aoki S. Reduction of Residual Stress by Ultrasonic Surface Vibration // *Japanese Society of Mechanical Engineers*. 1995. pp. 173–177.
- [15] Пономарев К. Е., Стрельников И. В. К вопросу выбора экспериментального метода оценки остаточных напряжений в сварных конструкциях // *Сварка и Диагностика*. 2018. № 2. С. 29–34.

## PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF VARIOUS METHODS OF VIBRATION PROCESSING IN THE WELDED STRUCTURES OF SPACECRAFT

**K. E. Ponomarev, I. V. Strelnikov**  
*JSC «NPO Lavochkina»,  
Khimki, Moscow region, Russian Federation*

*The possibility of using vibration technologies as an alternative to heat treatment, but having a shorter duration, low energy consumption, low capital costs and comparable efficiency, is substantiated. Priority areas of application of methods of vibration treatment of critical welded structures are highlighted: post-welding and related. The advantages and difficulties in the implementation of these methods are shown: the ability to control the efficiency of post-welding processing by changing the amplitude-frequency characteristics, increasing strength and plasticity and optimizing the geometric parameters of the weld, combining the processing time together with the welding production cycle with accompanying processing. Brief results of experimental work on the criteria of residual stresses and residual deformations for different types of welded joints, such as butt, T-bar and lap joints, and several groups of materials, such as aluminum alloys, carbon steels and stainless steels, are presented. The conclusion is made about the prospects of using post-welding vibration treatment for dimensional rigid, forming a closed contour, composed of their many parts and subassemblies of welded structures in assembly-welding special conductors or universal assembly devices, as well as about the initial reduction of residual deformations during concomitant vibration treatment of welded joints.*

*Keywords: vibration treatment, arc welding, concomitant vibration treatment, post-welding vibration treatment, residual deformation, residual stress.*

### References

- [1] Sagalevich V. M. *Ustranenie svarochnykh deformacij v mashinostroitel'nyh konstrukciyah* [Elimination of welding deformations in machine-building structures]. Moscow, Niinformtyazhmash, 1969, 79 p. (In Russian)
- [2] Dryga A. I. *Vibrostabiliziruyushchaya obrabotka svarnykh i litykh detalej v mashinostroyenii (teoriya, issledovaniya, tekhnologiya)* [Vibration-stabilizing treatment of welded and cast parts in mechanical engineering (theory, research, technology)]. Kramatorsk, DGMA, 2004, 168 p. (In Russian)
- [3] Govindarao P., Gopalakrishna A. Affect of vibratory welding process to improve the mechanical properties of butt welded joints // *International journal of modern engineering research*, 2012, vol. 2, issue 4, pp. 2766–2770.
- [4] Shaikh S. N. Vibratory Residual Stress Relieving- A Review // *Journal of Mechanical & Civil Engineering*, 2016, no. 3, pp. 01–04. doi: 10.9790/1684-15008030301-04.
- [5] Jose M. J., Kumar S. S., Sharma A. Vibration assisted welding processes and their influence on quality of welds // *Science and Technology of Welding & Joining*, 2016, issue 4, pp. 45–49. doi: 10.1179/1362171815Y.0000000088.
- [6] Laschenko G. I. *Tekhnologicheskie vozmozhnosti vibracionnoj obrabotki: obzor* [Technological possibilities of vibration processing: review] // *Automatic welding*, 2016, no. 7, pp. 28–34. (In Russian)

- [7] Ebrahimi S. M., Farahani M., Akbari D. The influences of the cyclic force magnitude and frequency on the effectiveness of the vibratory stress relief process on a butt welded connection // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, vol. 102, pp. 2147–2158. doi: 10.1007/s00170-019-03288-y.
- [8] Singh J., Kumar G., Garg N. Influence of vibrations in arc welding over mechanical properties and microstructure of butt-welded-joints // *International Journal of Science & Technology*, 2012, vol. 2, issue 1, pp. 1–6.
- [9] Ponomarev K. E., Strelnikov I. V. *K voprosu primeneniya vibracionnoj obrabotki svarnyh konstrukcij kosmicheskikh apparatov dlya povysheniya tochnosti i razmernoj stabil'nosti. Obzor* [On the application of vibration processing of welded spacecraft structures to improve accuracy and dimensional stability. Review] // *Vestnik NPO im. S. A. Lavochkina*, 2017, no. 4 (38), pp. 89–95. (In Russian)
- [10] Strelnikov I. V. *Vliyaniye soputstvuyushchej vibracionnoj obrabotki na ostatochnuyu deformatsiyu i geometriyu svarnyh soedinenij peremennoj zhestkosti* [Influence of concomitant vibration treatment on residual deformation and geometry of welded joints of variable stiffness] // *Welding and Diagnostics*, 2018, no. 3, pp. 24–29. (In Russian)
- [11] Ponomarev K. E., Strelnikov I. V., Antonov A. A., Utkin I. Yu. *Ocenka vliyaniya parametrov rezhima soputstvuyushchej vibracionnoj obrabotki na ostatochnyye napryazheniya alyuminievyh svarnyh konstrukcij s privlecheniem polnogo faktornogo eksperimenta* [Evaluation of the influence of the parameters of the mode of concomitant vibration treatment on the residual stresses of aluminum welded structures with the involvement of a full factor experiment] // *Welding and diagnostics*, 2022, no. 2, pp. 30–33. (In Russian)
- [12] Ratnathicam Sh. A study of the effect of vibration on the residual stresses in a welded fabricated tube // Thesis of Master of Science in Applied Science, Portland State University, 1979, 84 p. doi: 10.15760/etd.2891.
- [13] Sedec P. Vibration treatment—effective method of improving the dimensional stability of welded structures: investigation and practice // *Welding and Surfacing*, 1997, vol. 8, pp. 221–228.
- [14] Aoki S. Reduction of Residual Stress by Ultrasonic Surface Vibration // *Japanese Society of Mechanical Engineers*, 1995, pp. 173–177.
- [15] Ponomarev K. E., Strelnikov I. V. *K voprosu vybora eksperimental'nogo metoda ocenki ostatochnyyh napryazhenij v svarnyh konstrukciyah* [On the issue of choosing an experimental method for assessing residual stresses in welded structures] // *Welding and Diagnostics*, 2018, no. 2, pp. 29–34. (In Russian)

## Сведения об авторах

*Пономарев Константин Ефимович* – главный сварщик, специалист АО «НПО Лавочкина». Окончил Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана в 1973 году. Область научных интересов: гидродинамика потоков сварочной ванны, планирование эксперимента, испытание сварочных материалов, послесварочные напряжения и деформации.

*Стрельников Илья Владимирович* – кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог АО «НПО Лавочкина». Окончил Тверской государственный технический университет в 2007 году. Область научных интересов: послесварочные напряжения и деформации, точечная аргонодуговая сварка.



# ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ СЕРВИС И ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА ПОТЕНЦИАЛЬНО ОПАСНЫХ ЗОН ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОГО МНОГОСПЕКТРАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Е. Ф. Чичкова✉, Д. А. Кочин, С. А. Рогачев

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Представлен информационно-аналитический сервис, созданный на основе практического внедрения инновационных технологий в процессы обработки многоспектральных спутниковых данных и предоставления результатов мониторинга потенциально опасных зон в различных средах (грозовые очаги, загрязнения водной поверхности взвешенными веществами, экзогенные процессы земной поверхности и степень антропогенной нарушенности территорий). Рассмотрены технологии мониторинга и методы идентификации различных типов подстилающих поверхностей, применяемые при аналитической работе, в том числе метод эшелонированного мониторинга. Приведены описания специально разработанных способов автоматического определения параметров состояния заданных объектов и явлений по данным многоспектрального аэрокосмического зондирования. В качестве аналоговых моделей параметров контролируемых из космоса объектов и природных зон предложено использовать цифровые карты геопространственных слоев информации. Исходными данными для построения моделей служат аэрокосмическая информация различного пространственного разрешения, а также материалы маршрутных обследований, в том числе спектральные характеристики отражения для компонентов антропогенной нарушенности, полученные по данным полевого спектро-радиометра. Создана геопортальная технология представления результатов распознавания потенциально опасных зон. В работе представлены фрагменты цифровых карт, как примеры результатов проведенного мониторинга опасных явлений и процессов. Разработанный сервис возможно применять для решения различных отраслевых задач мониторинга опасных явлений и фоновых параметров природных сред, сопоставимых с пространственным и временным разрешением данных аэрокосмического зондирования.*

*Ключевые слова:* информационно-аналитический сервис, мониторинг, потенциально опасная зона, аэрокосмическое зондирование, цифровая карта, геопортальная технология.

## Введение

Создание новых технологий в области мониторинга окружающей среды резко повышает уровень осведомленности и своевременности получения информации, например, об антропогенной нарушенности экосистем и об угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций. В центре космических услуг «КосмоИнформ-Центр» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП) на основе многолетнего выполнения оперативных задач отраслей экономики и сельского

хозяйства создан информационно-аналитический сервис. Данный сервис предназначен для аналитической обработки данных, получаемых при помощи многоспектрального аэро- и спутникового зондирования. Сервис выполняет ряд функций информационно-аналитических систем (ИАС), несмотря на тот факт, что понятие ИАС до данного времени не получило достаточно четкого определения. Наиболее подходящим для решения задач мониторинга окружающей среды можно считать определение ИАС как особого класса информационных систем, предназначенных для агрегации, интеграции и интерпретации данных из разнородных информационных систем с тем, чтобы превратить их в удобную для принятия решений информацию [1]. Аналогом ИАС за рубежом явля-

✉ efchichkova@yandex.ru

ется достаточно обширный класс систем поддержки принятия решений Decision Support System или систем бизнес-аналитики Business Intelligence [2]. В настоящее время разработки ИАС в области экологического мониторинга регионального масштаба наиболее востребованы в отраслях первичного сектора экономики [3–6].

### 1. Функциональная схема информационно-аналитического сервиса

Синтез систем мониторинга окружающей среды, обеспечивающих сбор, хранение и обработку необходимой информации, формируемой

космическими, воздушными, наземными (водными) источниками, необходим для решения научных и практических задач оперативного контроля различных объектов, а также обнаружения катастрофических природных и техногенных процессов [7]. Принципы построения информационно-аналитического сервиса основаны на подобном синтезе технологий получения, обработки и представления данных аэрокосмического зондирования и сопутствующей информации. Целевое назначение – мониторинг потенциально опасных зон (ПОЗ), в основном на территории Северо-Западного федерального округа. На рис. 1 представлена функциональная схема информационно-аналитического сервиса.

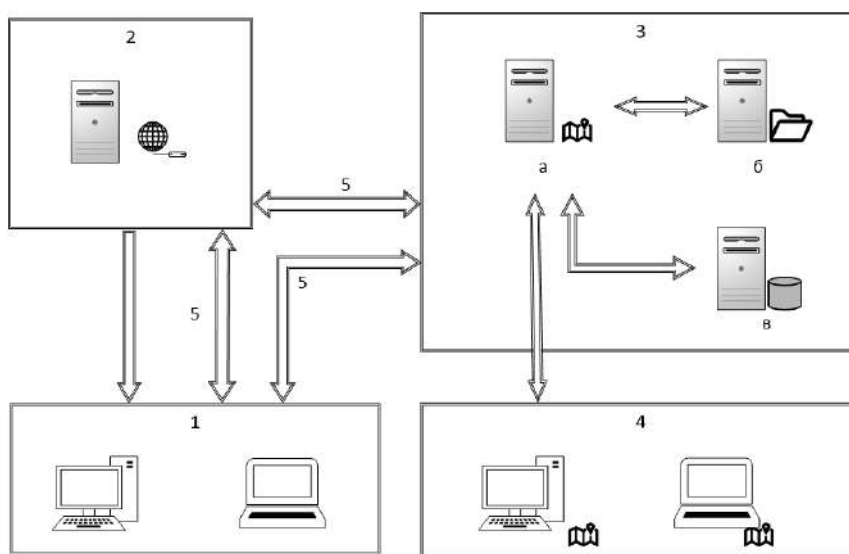


Рис. 1. Схема информационно-аналитического сервиса мониторинга ПОЗ: 1 – веб-приложение; 2 – геоинформационный веб-сервер; 3 – сервер данных: а – картографический сервер, б – файловый сервер, в – сервер баз данных; 4 – настольная геоинформационная система; 5 – картографические данные

### 2. Мониторинг ПОЗ по многоспектральной спутниковой информации

Термин «мониторинг» применительно к окружающей среде был использован при проведении Стокгольмской конференции ООН по окружающей среде в 1972 году. Наиболее употребляемо в научных кругах определение мониторинга окружающей среды – комплексная система наблюдений, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под влиянием антропогенных воздействий. Но предметом исследования мониторинга при потенциальных угрозах также могут выступать явления, подверженные естественным динамическим изменениям природной среды (например, в нашем случае, грозные очаги). Поэтому под термином «мониторинг ПОЗ» далее будем понимать многоуровневую систему наблюдений, оценки, анализа и прогноза состояния окружаю-

щей среды, находящейся под воздействием естественных и антропогенных факторов.

Целеуказание на проведение мониторинга тех или иных компонентов окружающей среды (территорий, объектов, процессов, явлений) производится для идентификации ПОЗ, отслеживания их временной и пространственной динамики. Процедура мониторинга включает в себя получение и предварительную обработку данных дистанционного зондирования, тематическую обработку с привлечением вспомогательной информации, верификацию результатов, представление информации в цифровом и графическом виде для решения задач заказчиков. В качестве исходной информации дистанционного зондирования в работе сервиса используются многоспектральные данные с космических аппаратов (КА) метеорологического и природно-ресурсного назначений, данные, полученные по многоспектральным измерениям с беспилотных или пилотируемых воз-

душных судов, и данные измерений полевым спектрорадиометром PSR-1100. Многоспектральные спутниковые данные низкого пространственного разрешения (ПР) (250 м, 1 км) принимаются на собственную станцию Центра космических услуг ГУАП. Данные среднего ПР (5–30 м) являются коммерческой информацией, часть из них находится в свободном доступе для научных и образовательных целей. Спутниковые данные высокого ПР являются в настоящее время исключительно коммерческой информацией и закупаются для выполнения работ.

и др.) предназначены для решения целевых задач сервиса и основаны на собственных инновационных методах и способах обработки спутниковых данных. ПО выполняет функции предварительной обработки, каталогизации данных, тематической обработки данных ДЗЗ и интеграции полученных результатов в ГИС, создания, управления, анализа и визуального представления пространственных данных, детального анализа изображений, восстановления количественных параметров типов поверхностей.

Наиболее эффективно проведение мониторинга ПОЗ при использовании разработанной технологии эшелонированного мониторинга, когда применяются три уровня синхронных (по возможности) измерений и наблюдений: космическими аппаратами, аппаратурой воздушных судов и полевыми обследованиями. Базовые технологии мониторинга ПОЗ включают в себя набор методов и средств обработки многоспектральной информации, разработанные в том числе при выполнении научно-исследовательских работ [8]. В таблице сведены основные проекты сервиса, реализованные в период с 2012 по 2022 гг.

### 3. Технологии мониторинга ПОЗ

Технологии сервиса по проведению мониторинга ПОЗ включают в себя лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение (ПО): ScanMagic, Scanex Image Processor, Scanex TaskFlow, Quantum GIS, ERDAS IMAGINE Professional, ARGCGIS ArcEditor Desktop, Feature Analyst. ПО и программные модули собственной разработки (MeteoGamma, Monitoring, CSIndexs, CSSWebMap, RSDownload

Таблица

Основные проекты сервиса по проведению мониторинга ПОЗ

№ п/п	Наименование проекта мониторинга ПОЗ	Основные методы и технологии мониторинга	Исходные данные (КА/аппаратура)	Заказчик
1	Грозовые очаги	Программный комплекс «МетеоГамма». Кластерный анализ. Аппроксимационные модели восстановления параметров верхней границы облаков, статистические модели	NOAA/AVHRR. METOP/AVHRR	ГУАП: высшее образование, дополнительное образование
2	Загрязнение воды взвешенными минеральными и органическими веществами; цветение воды сине-зелеными водорослями; тепловое загрязнение.	ПО обработки данных MODIS «Monitoring». Специализированная программа IMAPP. Метод расщепленного окна	Terra/MODIS. Aqua/MODIS. Landsat-5, 7, 8/TM	ФКП «Дирекция КЗС г. СПб Минстроя России»
3	Заращение сельскохозяйственных земель древесно-кустарниковой растительностью и сорняками	Классификационные модули ПО. Нормализованные дифференцированные разностные индексы. Трехуровневый метод эшелонированного мониторинга	Sentinel-2A, 2B. Гексакоптер/ MicaSense RedEdge 3	Комитет по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области
4	Ареалы борщевика Сосновского на землях сельхоз назначения	Классификационный модуль ПО. Изобретение в части способа определения параметров состояния почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального аэрокосмического зондирования (Индекс борщевика Сосновского)	RapidEye. Sentinel-2A, 2B. Landsat-7, 8	Комитет по агропромышленному и рыбохозяйственному комплексу Ленинградской области

Окончание таблицы

5	Опасные геологические процессы вдоль линейных объектов	Классификационные модули ПО. Динамический метод использования разновременной информации. Метод комплексирования данных разного пространственного разрешения	Sentinel-2A, 2B. WorldView-2, 3. Spot-4,5,6. GeoEye-1. Pleiades 1B	ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Северо-Западному федеральному округу»
6	Экзогенные процессы (заболачивание, эрозионные процессы, подтопление) при строительстве и эксплуатации производственных объектов	Классификационные модули ПО. Динамический метод использования разновременной информации. Метод комплексирования данных разного пространственного разрешения. Двухуровневый метод эшелонированного мониторинга	Sentinel-2A, 2B. WorldView-2, 3	ФГБУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Северо-Западному федеральному округу»
7	Свалки, вырубки леса, карьеры	Классификационные модули ПО. Трехуровневый метод эшелонированного мониторинга Sentinel-2A, 2B. RapidEye. WorldView-2, 3. Квадрокоптер/ GoPro Hero 3	Sentinel-2A, 2B. RapidEye. WorldView-2, 3. Квадрокоптер/ GoPro Hero 3	Государственное задание СПбНЦ РАН в 2014–2016 гг.

#### 4. Примеры реализованных проектов

Результаты прикладных работ по мониторингу, предоставляемые через информационно-аналитический сервис заказчикам, представляют собой карты-схемы с нанесением ПОЗ, а именно грозовых очагов (рис. 2), загрязнения водных объектов (рис. 3), опасных геологических процессов, вырубок леса (рис. 4), ареалов сорной растительности (рис. 5), произрастания кустарниково-древесной растительности на землях сельскохозяйственного назначения, заболачивания, подтопления объектов, тепловых аномалий (рис. 6) и пр.

К опасным метеорологическим явлениям относятся явления погоды, которые интенсивностью, продолжительностью и временем возникновения представляют угрозу безопасности людей, а также могут нанести значительный ущерб отраслям экономики. На рис. 2 в оперативном режиме по информации с метеорологического спутника через восстановление высоты верхней границы определены ПОЗ кучево-дождевой облачности, вызывающие сильный ветер и сильный дождь.

Контроль состояния восточной части Финского залива производится в связи с многократно возросшей антропогенной нагрузкой на акватории восточной части Финского залива, где регулярно проводятся строительные, грунтонамывные, дноуглубительные работы. Структура и текстура оптических неоднородностей, выявляемых на спутниковых изображениях в видимом и инфракрасном диапазонах, зависят от степени антропогенной нагрузки, типа взвешенных ве-

ществ поверхностного слоя воды, наличия процесса цветения воды водорослями, гидродинамических условий в акватории на момент съемки. На изображении (рис. 3) хорошо различимы источники загрязнения в восточной части Финского залива в зоне влияния комплекса защитных сооружений (КЗС) в период окончания строительства (2009 г.). В Невской губе выделяется зона строительства Морского фасада Санкт-Петербурга небольшим шлейфом повышенной мутности (7,5 км<sup>2</sup>), направленным в сторону острова Котлин. Другим источником загрязнения в Невской губе является зона вдоль прибрежной линии от Южной Лахтинской отмели. Здесь зона повышенной мутности площадью 52 км<sup>2</sup> расположена вдоль Морского канала и пополняет зону загрязнения вдоль КЗС. Третий источник повышенной мутности в Невской губе – очистные сооружения в северной части акватории с направленностью стока в северные ворота дамбы. Зоны повышенной мутности на данном изображении занимают 40 % площади Невской губы [9].

На рис. 4 приведено расположение вырубок леса, являющихся ПОЗ, обнаруженных модулями классификации данных КА RapidEye и Sentinel-2 за период 2013–2016 гг., вдоль трассы Северо-Европейского газопровода. Вырубки определяют изменения природной среды (переувлажнение почв, ухудшение дренажа, изменение гидрологического режима, увеличение поверхностного стока) и, таким образом, оказывают влияние на состояние газопровода. Происходит почти полное разрушение растительности и сильнейшее изменение условий существования растений.



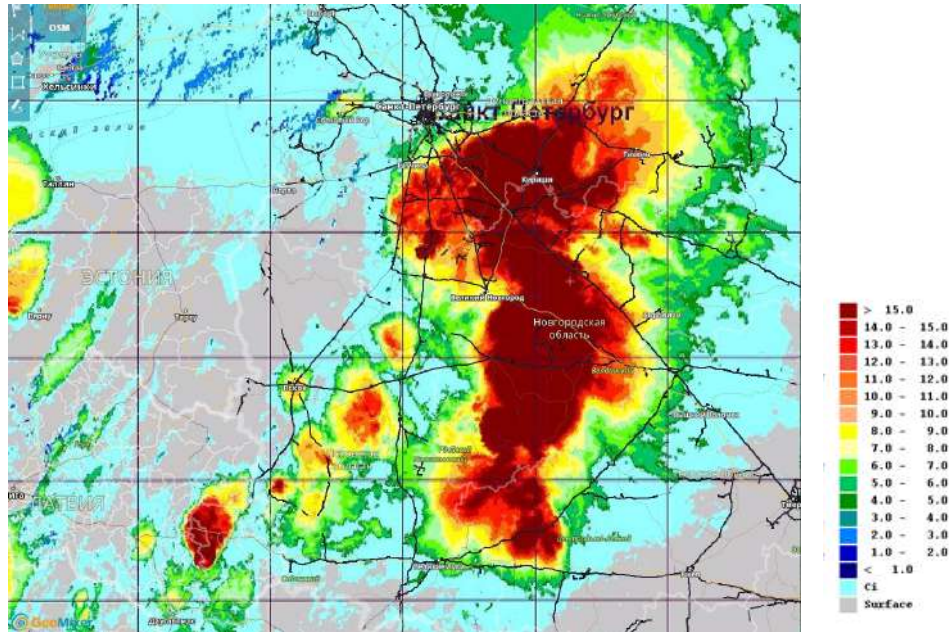


Рис. 2. Высота верхней границы кучево-дождевых (грозовых) облаков, КА NOAA 17

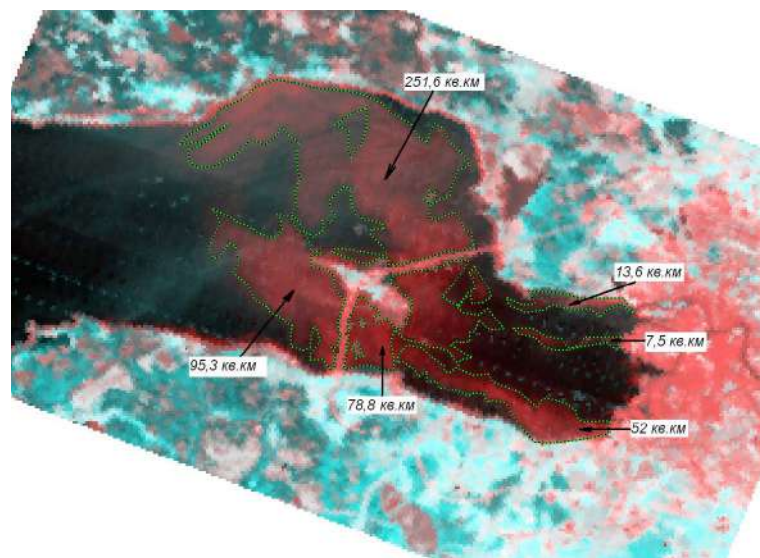


Рис. 3. Оценка площадей зон повышенной мутности в зоне влияния КЗС, КА Terra/MODIS

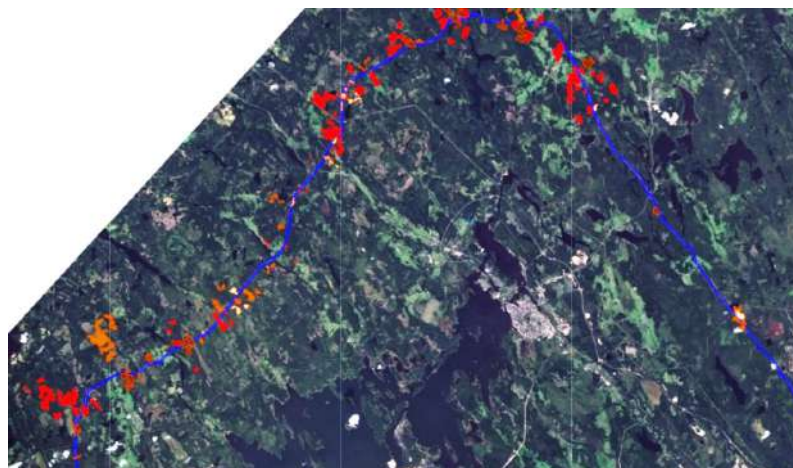


Рис. 4. Расположение основных зон вырубок леса в 2013–2016 гг. вдоль трассы Северо-Европейского газопровода на территории Ленинградской области, КА Sentinel-2



Так как нагревание воды в водоемах-охладителях Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС) приводит к сбросу в Финский залив воды, сильно отличающейся по температуре от фоновых значений, то важен контроль ПОЗ теплового загрязнения Копорской губы. На рис. 5 приведена тепловая карта с восстановленной по спутниковым данным температурой поверхности воды. По полученным данным рассчитываются температурные градиенты и выявляются ПОЗ зарастания и изменчивости прибрежных вод в зависимости также от других факторов среды.

На рис. 6 приведены результаты обнаружения зон произрастания борщевика Сосновского (БС). Широкое распространение БС получил в результате программы решения проблем производства кормов для животноводства еще в СССР. В настоящее время БС внесен в реестр сорных растений и представляет опасность для окружающей среды и человека. Опасность наличия БС вблизи населенных пунктов заключается в высокой ве-

роятности травмирования местного населения, вблизи водоемов – вероятности попадания гербицидов в водоем при уничтожении БС химическим способом. Высокая скорость распространения БС определяет актуальность проведения мониторинга ареалов его произрастания на регулярной основе по спутниковым данным. Разработанный метод отслеживания зон распространения БС по космическим данным [8] применен для оценки площади, занимаемой растениями данного вида, в Новгородской области.

Пример результата проведения эшелонированного мониторинга ПОЗ (полигонов твердых бытовых отходов; свалок промышленных, строительных и бытовых отходов) в прибрежной полосе Ладожского озера и на его водосборе приведен на рис. 7. Эшелонированный мониторинг – специально разработанная методика, предполагающая одновременную обработку информации с космических аппаратов, беспилотных воздушных судов (БВС) и наземных обследований. Верификация

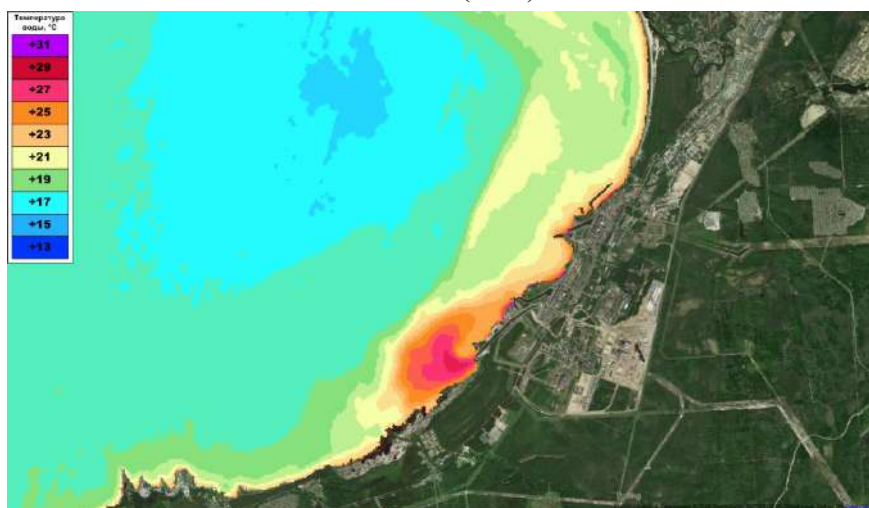


Рис. 5. Температурный режим, зона сброса из водоемов-охладителей ЛАЭС в Финский залив, КА Landsat-8



Рис. 6. Результаты обнаружения БС в Старорусском районе Новгородской области, КА Sentinel-2A



Рис. 7. Эшелонированный мониторинг водотоков южного побережья Ладожского озера.  
Свалки на карьере у поселка Приладожский, КА RapidEye и БВС

полученных данных дистанционного зондирования проведена по результатам маршрутных исследований, включающих забор проб воды из ближайших к местам экологической опасности водотоков на предмет токсичности. Применение беспилотных воздушных судов с целью верификации космических данных выявило целый ряд его достоинств, а именно позволило быстро и точно идентифицировать заброшенные полигоны промышленных отходов и несанкционированные свалки в заданном районе, в том числе ряд объектов, недоступных для наземного обследования.

Рис. 8 представляет собой совмещенные ГИС слои, выделенные по спутниковой информации высокого пространственного разрешения (0,5 м) на основе заверочных полевых маршрутов. При строительстве и эксплуатации линейных объектов производится мониторинг потенциально опасных зон в разные временные пери-

оды и отслеживается динамика происходящих процессов.

На рис. 9 представлен список слов геопроостранственной информации проекта QGIS с данными эшелонированного мониторинга на основе съемки с КА WorldView-3 и синхронных многоспектральных измерений с БВС [6]. При анализе данных использованы 10 нормализованных индексов для идентификации почв и состояния растительного покрова. Проект содержит тематические векторные слои, а также растровые слои, полученные в результате обработки данных спутниковой съемки поля с культурой тритикале и полей под паром в Самарской области.

Для всех представленных в таблице проектов ключевым звеном информационно-аналитического сервиса является использование геоинформационной системы в качестве инструмента представления и анализа геопроостранственных данных [7].



Рис. 8. Заболоченная ПОЗ в районе строительства автодорог,  
КА WorldView-3



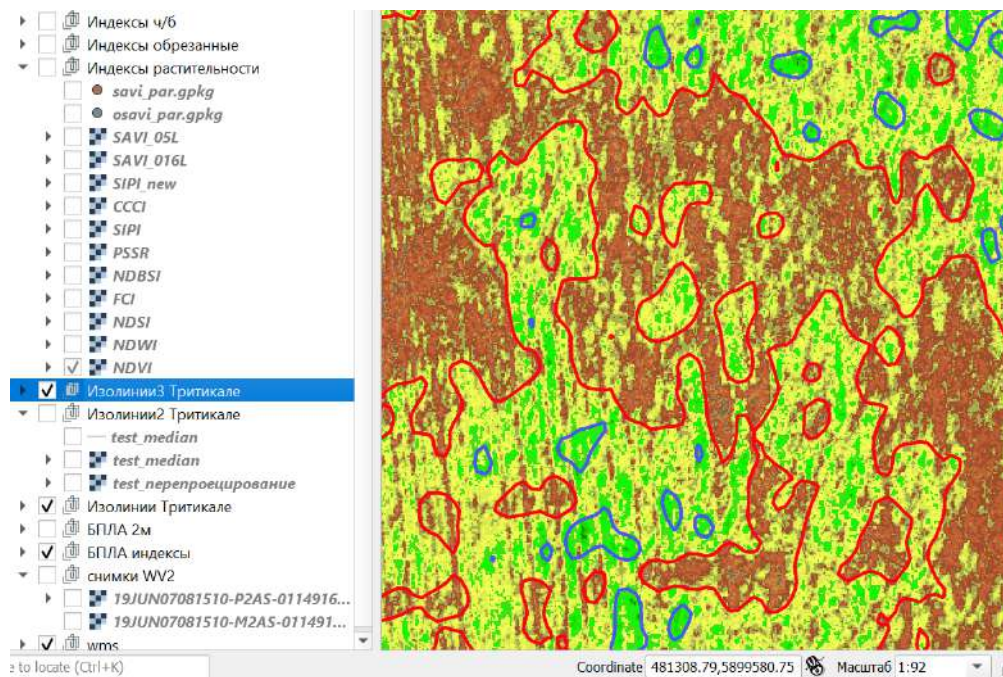


Рис. 9. Геоинформационной проект «Самара-поле» в системе QGIS

## Заключение

Разработанный информационно-аналитический сервис в данный момент применяется для автоматизированной обработки аэрокосмических данных разного пространственного разрешения от сантиметрового до километрового диапазонов. Его функционал позволяет идентифицировать и классифицировать различные подстилающие поверхности, распознавать ПОЗ, используя разнородную геопространственную информацию,

а также данные полевых обследований и ретроспективные материалы. Сервис развивается методологически и технологически по мере появления данных современной многоспектральной аппаратуры и постановке новых задач мониторинга ПОЗ, а также с ростом уровня технического оснащения и автоматизации. Результаты мониторинга ПОЗ и определения фоновых параметров природных сред, предоставляемые сервисом, используются для решения различных отраслевых задач в Северо-Западном федеральном округе.

## Список литературы

- [1] Пьянков О. В. Информационно-аналитическая система: назначение, роль, свойства // Информационная безопасность регионов. 2014. № 1 (14). С. 21–26.
- [2] Schlegel K. Magic Quadrant for Business Intelligence and Analytics Platforms [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gartner.com> (дата обращения: 02.10.2022).
- [3] Соколов С. С., Сторчак Т. В., Тихомиров Я. Н. Разработка информационно-аналитической системы экологического мониторинга для слежения за текущим состоянием окружающей среды на территории нефтяных месторождений // Бюллетень науки и практики. 2017. № 4 (17). С. 170–183.
- [4] Телегина М. В. Визуализация данных системы производственного экологического мониторинга // Прикладная информатика. 2009. № 2 (20). С. 107–114.
- [5] Путивцева Н. П., Наливко К. В. Автоматизированная система экологического мониторинга // Проблемы современной науки и образования. 2013. № 4 (18). С. 22–23.
- [6] Юронен Ю. П., Иванов В. В., Борисевич А. Н. Разработка системы оперативного экологического мониторинга Красноярского края // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. Т. 4. № 2. С. 98–102.
- [7] Бондур В. Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4–17.
- [8] Григорьев А. Н., Зайцев В. В., Рыжиков Д. М., Чичкова Е. Ф. Способ определения параметров состояния почвенно-растительного покрова по данным многоспектрального аэрокосмического зондирования. Пат. № 2657363 Российская Федерация, 2018. Бюл. № 17.
- [9] Чичкова Е. Ф., Минаков Е. П. Мониторинг Финского залива на основе спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 208–212.

- [10] Чичкова Е. Ф., Грядунов Д. А., Зайцев В. В., Каплин В. Г., Кочин Д. А. Оценка фитосанитарного состояния полей самарского полигона по данным эшелонированного мониторинга // Исследование Земли из космоса. 2022. № 5. С. 74–86.
- [11] Рогачев С. А., Матьяш В. А. Веб-картография. Представление разнородной пространственной информации // Труды СПИИРАН. 2013. № 6 (29). С. 132–143.

## INFORMATION AND ANALYSIS SERVICE AND TECHNOLOGY FOR MONITORING POTENTIALLY HAZARDOUS AREAS FROM SATELLITE MULTI-SPECTRAL SENSING DATA

**E. F. Chichkova, D. A. Kochin, S. A. Rogachev**

*Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,  
Saint Petersburg, Russian Federation*

*An information and analytical service is presented, created on the basis of the practical implementation of innovative technologies in the processing of multispectral satellite data and the provision of monitoring results for potentially hazardous areas in various environments. Monitoring technologies and methods for identifying various types of underlying surfaces, including the layer-by-layer method of monitoring, are considered. Descriptions are given of specially developed methods for automatically determining the state parameters of given objects and phenomena according to multispectral aerospace sensing data. It is proposed to use digital maps of geospatial layers of information as analog models of the parameters of objects and natural areas controlled from space. The initial data for building models are aerospace information of various spatial resolutions, as well as route survey materials. A geoportal technology for presenting the results of recognition of potentially hazardous areas has been created. The developed service can be used to solve various industry problems of monitoring hazardous phenomena and background parameters of natural environments, comparable with the spatial and temporal resolution of aerospace sensing data.*

*Keywords: information and analytical service, monitoring, potentially hazardous area, aerospace sensing, digital map, geoportal technology.*

### References

- [1] Pyankov O. V. *Informacionno-analiticheskaya sistema: naznachenie, rol', svoystva* [Information-analytical system: purpose, role, features] // Information Security of Regions, 2014, no. 1 (14), pp. 21–26. (In Russian)
- [2] Schlegel K. Magic Quadrant for Business Intelligence and Analytics Platforms. Available at: <http://www.gartner.com> (accessed 02.10.2022).
- [3] Sokolov S. S., Storchak T. V., Tikhomirov Ya. N. *Razrabotka informacionno-analiticheskoy sistemy ekologicheskogo monitoringa dlya slezheniya za tekushchim sostoyaniem okruzhayushchej sredy na territorii neftyanyh mestorozhdenij* [Development of an information and analytical system of environmental monitoring to monitor the current state of the environment in the oilfields] // Bulletin of Science and Practice, 2017, no. 4 (17), pp. 170–183. (In Russian)
- [4] Telegina M. V. *Vizualizaciya dannyh sistemy proizvodstvennogo ekologicheskogo monitoringa* [Data visualization in the structure of system for industrial ecological monitoring] // Journal of Applied Informatics, 2009, no. 2 (20), pp. 107–114.
- [5] Putivtseva N. P., Nalivko K. V. *Avtomatizirovannaya sistema ekologicheskogo monitoringa* [Automated environmental monitoring system] // Modern problems of science and education, 2013, no. 4 (18), pp. 22–23. (In Russian)

- [6] Yuronen Yu. P., Ivanov V. V., Borisevich A. N. *Razrabotka sistemy operativnogo ekologicheskogo monitoringa Krasnoyarskogo kraja* [Development of the operational ecological monitoring system of the Krasnoyarsk territory] // Interexpo GEO-Siberia, 2015, vol. 4, no. 2, pp. 98–102. (In Russian)
- [7] Bondur V. G. *Sovremennye podkhody k obrabotke bolshikh potokov giperspektralnoj i mnogospektralnoj aehrokozmičeskoj informacii* [Modern approaches to processing large flows of hyperspectral and multispectral aerospace information] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, no. 1, pp. 4–17. (In Russian)
- [8] Grigorev A. N., Zajtsev V. V., Ryzhikov D. M., Chichkova E. F. *Sposob opredeleniya parametrov sostoyaniya pochvenno-rastitel'nogo pokrova po dannym mnogospektral'nogo aehrokozmičeskogo zondirovaniya* [Method of determining parameters of state of vegetative ground cover by multispectral aerospace probing data]. Patent RU 2657363, 2018, bulletin no. 17.
- [9] Chichkova E. F., Minakov E. P. *Monitoring Finskogo zaliva na osnove sputnikovoj informacii* [Monitoring of the Gulf of Finland on the basis of the satellite data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, vol. 7, no. 3, pp. 208–212. (In Russian)
- [10] Chichkova E. F., Gryadunov D. A., Zajtsev V. V., Kaplin V. G., Kochin D. A. *Ocenka fitosanitapnogo sostojanija polej samarskogo poligona po dannym jeshelonirovannogo monitoringa* [Assessment of the phytosanitary condition of the fields of the samara test site according to tiered monitoring data] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, no. 5, pp. 74–86. (In Russian)
- [11] Rogachev S. A., Matyash V. A. *Veb-kartografiya. Predstavlenie raznorodnoj prostranstvennoj informacii* [Web mapping. representation of nonuniform spatial information] // SPIIRAS Proceedings, 2013, no. 6 (29), pp. 132–143. (In Russian)

## Сведения об авторах

*Кочин Дмитрий Александрович* – научный сотрудник Центра космических услуг «КосмоИнформ-Центр» ГУАП. Окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП) в 2015 году и аспирантуру ГУАП в 2019 году. Область научных интересов: геоинформационные системы, нейронные сети, обработка цифровых данных, обработка изображений, автоматизация процессов анализа и обработки данных.

*Рогачев Сергей Александрович* – старший преподаватель кафедры «Компьютерных технологий и программной инженерии» ГУАП. Окончил ГУАП в 2012 году и аспирантуру ГУАП в 2016 году. Область научных интересов: геоинформационные системы, анализ данных, исследования Земли из космоса, машинное обучение, искусственные нейронные сети.

*Чичкова Елена Федоровна* – кандидат географических наук, директор Центра космических услуг «КосмоИнформ-Центр» ГУАП. Окончила географический факультет Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова по специальности «Метеорология и климатология» в 1987 году и аспирантуру в 1993 году. Область научных интересов: спутниковая метеорология, обработка цифровых данных, дистанционное зондирование, распознавание образов, геофизика, охрана окружающей среды.

## ОТКРЫТЫЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕРРИТОРИЙ И ЦИФРОВЫЕ СЕРВИСЫ ДОСТУПА К НИМ

И. П. Карачевцева, С. С. Дубов, М. В. Андреев, А. С. Гаров,  
А. Э. Зубарев, И. Е. Надеждина, Н. А. Козлова✉, Н. А. Слодарж

Московский государственный университет геодезии и картографии,  
г. Москва, Российская Федерация

Рассмотрена концепция «Открытые данные» с точки зрения ее применения для доступа пользователей к пространственным данным. Показано, что из-за особенностей пространственных данных к ним могут быть не применимы некоторые принципы концепции «Открытые данные» и методические рекомендации для их публикации. Создаваемый в Московском государственном университете геодезии и картографии информационный ресурс «Навигатор открытых пространственных данных» для подготовки специалистов в области исследования территорий призван упростить доступ к геоданным. Особенности применения открытых пространственных данных показаны на примере Луны, поскольку планетные данные давно имеют статус свободно распространяемых. Представлены цифровые сервисы доступа к планетным данным для обучения специалистов в области космических исследований. Обсуждены форматы хранения планетных геоданных. Накопленные в Московском государственном университете геодезии и картографии открытые лунные данные и созданные интерактивные сервисы обеспечивают организацию свободного доступа к онлайн-модели «Цифровая Луна», которую можно рассматривать как точку сбора необходимой инфраструктуры, информационных массивов и цифровых инструментов для обработки геоданных в области исследования территорий. С внедрением технологий искусственного интеллекта и машинного обучения потенциал сервисов «Цифровая Луна» может быть расширен, а накопленные планетные геоданные обеспечат возможность создания дополнительных междисциплинарных связей.

**Ключевые слова:** исследование территорий, открытые пространственные данные, открытые планетные данные, Цифровая Луна, интерактивный онлайн-сервис.

### Введение

Развитие концепции «Открытые данные» (ОД) началось несколько десятков лет назад и в настоящий момент также развивается и в России, поскольку различные государственные программы («Цифровая экономика», «Электронная Россия», «Открытое Правительство» и т. п.) обусловили внимание к открытым данным, которые должны быть представлены в общий доступ через интернет-порталы государственных органов для обработки в различных информационных системах. Основные принципы концепции ОД сводятся к следующим положениям [1]:

- полнота – информация должна быть предоставлена в полном объеме;

✉ mexlab@miigaik.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2023

- первичность – данные публикуются «сырыми», «как есть», т. е. без фильтрации и обработки, которая может скрыть истинные значения;
- своевременность – моментальное открытие данных общественности, они должны быть актуальными, а не годовой и более давности;
- доступность – публикуемые данные доступны всем желающим без ограничений для ознакомления, сохранения и дальнейшего использования в виде обработки, визуализации и др.;
- пригодность к машинной обработке – обязательное использование универсальных форматов, специально предназначенных для представления и машинной обработки любых данных, таких как *xml*, *csv*, *rdf* и *json*, и недопустимость применения документо- и проблемно-ориентированных форматов, таких как *doc*, *pdf* и т. п.;
- лицензионная чистота – процесс получения данных должен быть юридически чист;



- анонимность доступа – данные доступны для всех пользователей, без каких-либо требований к регистрации и аутентификации;

- отказ от проприетарных форматов – обязательное использование только открытых форматов представления информации.

Целью раскрытия ОД (включая пространственные данные, имеющие координатную компоненту) и их публикации в машиночитаемых форматах является облегчение к ним доступа заинтересованных лиц, которые могут анализировать и перерабатывать ОД, использовать их в различных отраслях, научных исследованиях, образовательных программах и т. п.

ОД являются важной основой для социальных и общественно-значимых направлений, в том числе для образования. В настоящей статье обсуждаются такие специфические ОД, как пространственные данные, в особенности, планетные геоданные, сложность которых требует разработки специальных подходов для их использования в учебных процессах.

## 1. Использование открытых данных при подготовке специалистов в области исследования территорий

В Российской Федерации основным источником пространственных данных для развития территорий является федеральная государственная информационная система территориального планирования [2] – ФГИС ТП. Эта система содержит в свободном доступе сведения о текущем состоянии территорий РФ и планы по их дальнейшему развитию. Представленная в ней информация подготовлена в соответствии с требованиями к описанию и отображению в документах объектов территориального планирования [3]. Однако слабая связь с земельными и имущественными информационными системами и доступность для пользователей при загрузке только некоторых форматов (таких как *doc* или *pdf*) затрудняют машинную обработку значительной части геоданных, размещенных в ФГИС ТП. Федеральный портал пространственных данных [4] – ФППД – предоставляет пользователям возможность получения открытой информации в различных ГИС-форматах, используемых для представления геоданных, в том числе в рекомендуемом формате *json*, однако, сделать это можно только по запросу после авторизации. Регистрация пользователя необходима и в ФГИС ТП, хотя требования аутентификации противостоят концепции ОД в части свободного анонимного доступа к данным. Во многом это объясняется необходимостью информационной защиты, однако, следует искать баланс между открытостью, определяющей темпы развития государства, и огра-

ждением от злоумышленников. Все это создает серьезные трудности для построения эффективных цифровых сервисов обработки ОД, тем самым влияя на качество управления территориями.

Для решения задач территориального планирования РФ, включая повышение качества образования в области управления геоданными, в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) создается специализированный информационный ресурс «Навигатор открытых пространственных данных» (Навигатор), обеспечивающий развитие кадрового потенциала, инфраструктуры и цифровых сервисов.

При разработке Навигатора будет не только аккумулирован накопленный ранее опыт поиска, обработки и анализа ОД, но и учтены особенности геоданных, включая используемые программные платформы, механизмы обработки и анализа пространственной информации. Основная цель – облегчить доступ к открытым геоданным путем обеспечения пользователей необходимой инфраструктурой, информационными массивами и инструментами, необходимыми для их обработки. Новый информационный ресурс МИИГАиК направлен на решение следующих образовательных задач:

- вовлечение обучающихся в работу с реальными данными в рамках лабораторных работ, курсовых и дипломных проектов;
- приращение рынка труда специалистами, обладающими опытом работы с открытыми пространственными данными;
- формирование ресурсной базы для развития технологий искусственного интеллекта в области управления геоданными.

При разработке Навигатора выявлен ряд особенностей пространственной информации, которые вступают в противоречие с некоторыми положениями концепции ОД и методических рекомендаций [5]. Как известно, пространственный объект определяют взаимосвязанные элементы – координаты и атрибуты, где первый компонент определяет местоположение геообъекта в установленной системе координат, второй – представляет его качественные и количественные параметры. Если атрибутивная информация может быть довольно просто представлена в машиночитаемых форматах, то описание пространственной компоненты имеет свои особенности, связанные с необходимостью поддержки координат в различных системах отсчета. Таким образом, сложная структура геоданных вызывает необходимость учета их свойств и, в том числе, выбирать подходящие способы их публикации в качестве ОД. Например, в науках о Земле основным источником пространственной информации являются данные дистанционного зондирования и результаты их обработки (цифровые модели рельефа и ортомозаики), имеющие

растровое представление. Однако открытый формат *GeoTIFF*, который фактически стал стандартом для представления растровых пространственных данных и поддерживает описание систем координат, отсутствует в методических рекомендациях [5].

В процессе разработки Навигатора среди всего многообразия подмножества открытых пространственных данных выделена информация по телам Солнечной системы, поскольку она является открытой уже не один десяток лет, а политика открытости в области земных геоданных является достижением лишь новейшего времени. Например, открытый доступ к космической съемке Земли высокого разрешения ограничен либо высокой стоимостью, либо соображениями секретности, тогда как, например, космические изображения Луны высокого разрешения (с размером пикселя до 50 см) распространяются свободно и без ограничений. Поэтому создание общедоступных цифровых сервисов, связанных с планетной информацией, широко развивается в странах, ведущих космические исследования.

## 2. Открытые планетные данные

Рациональность открытого подхода в организации доступа к планетным геоданным обусловлена их следующими особенностями: трудность получения, большой объем, сложность обработки, а также высокая научная ценность. Поэтому для отработки технологических подходов организации свободного доступа к открытым пространственным данным при создании Навигатора исследованы методы распространения планетной информации. Это связано также и с тем, что пространственные планетные данные не столь разнообразны, как земные данные, что позволяет их изучать на небольшой выборке различных типов данных.

Пространственные планетные данные, такие как космические изображения поверхности небесных тел и продукты их обработки, включая цифровые модели рельефа (ЦМР) и ортомозаики, являются свободно доступными (за некоторыми исключениями, касающимися новых данных, что связано с приоритетом научных команд, обеспечивающих их получение), однако, далеко не каждый потенциальный потребитель может свободно использовать планетную информацию, особенно такую, как первичные «сырые» изображения, как того требуют принципы ОД. Это связано со сложностью внутренней структуры и обработки планетных данных, что, в свою очередь, определяется такими факторами, как:

- удаленность объектов от Земли, наличие радиации и космического излучения;
- система координат определяется более, чем 6-ю параметрами: положение в пространстве

Солнечной системы, форма тела, ориентация, вращение;

- привязка времени, связанная с небесным телом, а не с Землей;
- разновременные условия съемки;
- использование в обработке данных, полученных разнородными съемочными системами различных космических аппаратов (КА).

Каждая космическая миссия и приборы уникальны, также имеют свои особенности формат и структура планетных данных. Требуется потратить значительное время на поиск и обработку информации для ее дальнейшего использования в научных исследованиях, и, тем более, для образовательных целей. Таким образом, полнота использования такой сложной и ценной информации как планетные данные является важной задачей, для решения которой требуются современные подходы, как для хранения и обработки, так и для доступа к результатам космических исследований Солнечной системы на новом технологическом уровне.

Одним из примеров внедрения новых технологий для организации доступа к планетным данным является европейский проект VESPA (Virtual European Solar and Planetary Access) – так называемая Виртуальная обсерватория для исследований Солнечной системы [6]. Пользователи системы получают свободный открытый доступ через единый интерфейс – портал запросов VESPA [7], который обеспечивает поиск данных и работу служб передачи информации с помощью протокола EPN-TAP. Этот протокол, специально разработанный для описания характеристик планетных данных, включает в себя набор различных параметров, а также связанных с ними условий сбора и наблюдений, обеспечивая доступ к широкому спектру планетной информации, включая космические, наземные, экспериментальные и имитационные модели в различных научных областях: от визуализации поверхности планет до спектроскопии, структуры атмосферы, электромагнитных полей и измерений частиц [8]. Протокол EPN-TAP поддерживает передачу геоданных не только в рекомендуемых для ОД форматах (например, *GeoJSON*), но и в растровом формате, а также в формате *pdf*, который является с 2008 года открытым стандартом ISO 32000, что переводит его из статуса проприетарных к рекомендованным для использования, особенно для хранения и публикации таких документов, как географические карты.

Современные программные решения в области обработки планетных данных картографо-геодезическими методами и организации к ним свободного доступа разрабатываются также в МИИГАиК в рамках Комплексной лаборатории исследования внеземных территорий.

### 3. Исследование внеземных территорий и «Цифровая Луна»

В Комплексной лаборатории исследования внеземных территорий обработаны и накоплены пространственные данные о поверхности более десятка небесных тел, таких как Луна, Меркурий, Марс и его спутник Фобос, спутники Сатурна (Энцелад, Гиперион и др.) и Галилеевы спутники Юпитера [9; 10]. Среди обработанных данных, помимо базовой координатной информации (опорные сети, ЦМР и ортомозаики), имеются каталоги кратеров (Луна, Меркурий) и каталоги борозд (Фобос). Все эти данные, как в растровом, так и векторном форматах имеют пространственную привязку в соответствующих каждому небесному телу международных системах координат и свободно доступны через геопортал планетных данных МИИГАиК (Геопортал), первый прототип которого был создан в 2013 году [11].

По мере накопления массива планетной информации возникла задача не только хранения и организации удобного доступа, но и необходимость развития цифровых сервисов, обеспечивающих дальнейшее использование пространственных данных для изучения внеземных территорий на современном технологическом уровне. С этой целью была предложена концепция распределенной коммуникационной среды на основе новой программной архитектуры [12]. Предлагаемый методологический подход основан на возможности комплексного использования разнородных данных в рамках единой унифицированной информационной среды.

Это имеет большое значение для доступности данных на качественно новом уровне, где экспертный анализ и автоматизированные подходы к обработке данных дополняют друг друга. Основная идея заключается в создании для исследовательских/учебных групп гибкой рабочей среды, которую можно масштабировать в соответствии с требуемым объемом данных и вычислительной мощностью при сохранении минимальных затрат на инфраструктуру. Использование принципа «единого окна» сочетает в себе доступ к данным через функциональность Геопортала и возможности обработки и коммуникации между исследователями.

Основываясь на этом инновационном подходе, станет возможным организовывать как научные исследования, так и образовательные процессы при исследовании внеземных территорий на новом технологическом уровне, который предоставляет больше возможностей для немедленного и непосредственного повторного использования материалов исследования, включая данные, алгоритмы, методологию и компоненты. Новая программная среда ориентирована на удаленные

научные/учебные группы и обеспечивает доступ к пространственно-распределенной информации, для обработки которой реализуется интерфейс в виде развитых цифровых сервисов.

Луна – приоритетный объект Федеральной космической программы России. Различные свойства пространственной планетной информации, усложняющие обработку и доступ к ней, относятся и к лунным данным, несмотря на относительную близость этого небесного тела к Земле, включая и условия съемки, и высокую ценность данных. Интенсивность научных исследований Луны на современном этапе привела к тому, что объем получаемых данных значительно вырос и продолжает быстро расти. Так, например, число снимков, полученных к настоящему времени с 2009 года КА LRO (Лунный орбитальный зонд, США) с помощью бортовой узкоугольной камеры (LROC NAC), составляет более 1,3 миллиона изображений [13], что соответствует более чем 700 ТБ, причем ежемесячно поступают терабайты новых данных. Такой массив информации просто не может быть полностью обработан только исследовательской командой, поэтому снимки КА LRO свободно доступны для международного научного сообщества.

Однако в большинстве случаев команды КА публикуют только необработанные (сырые некалиброванные) данные с бортовых приборов, поэтому их невозможно использовать в качестве ОД по причине сложной структуры пространственных данных, в особенности, планетных. То есть в качестве реально общедоступной для применения разными группами пользователей открытых пространственных данных можно использовать лишь калиброванную, предварительно подготовленную, информацию.

Обработка и анализ таких данных требуют специализированных подходов, включая обработку, различные методы категоризации и интеграции данных, а также совместный анализ разнородной информации, полученной из разных источников. Для решения этих проблем мы предложили идею «Цифровой Луны» [14] – интеграцию всей имеющейся пространственной лунной информации, а также новых данных, которые будут получены в будущем, на основе представленной выше концепции единой универсальной среды [12], которая включает решения для хранения, архивирования, совместной обработки, доступа, распространения, визуализации и анализа планетных данных.

Созданная ранее версия Геопортала в настоящий момент обновляется с использованием развиваемой программной архитектуры и представляет собой инновационную цифровую среду, которая будет поддерживать онлайн-обработку, анализ и трехмерную визуализацию пространственных данных. Для ее реализации мы предла-

гаем различные программные решения, которые обеспечат:

- обмен научными знаниями на основе сохранения сценариев обработки;
- формирование коллективного рабочего пространства, которое позволит осуществлять совместную обработку пространственных данных удаленными научными/учебными группами;
- организацию образовательных процессов с проведением онлайн-лекций и мастер-классов на новом технологическом уровне управления геоданными.

146

Предлагаемые методы обрабатываются сейчас с использованием лунных данных, которые накапливаются в развитие концепта «Цифровая Луна» с помощью Геопортала планетных данных и формируемых на его основе интерактивных онлайн-сервисов для исследования внеземных территорий.

#### 4. Интерактивные сервисы для доступа и обработки планетных данных

Новая программная платформа Геопортала позволяет создавать унифицированную распределенную коммуникационную среду для обработки пространственных данных, которая объединяет веб-, настольные и мобильные приложения, а также может поддерживать возможности общедоступного облака и модель добровольных вычислений. В частности, предложенная программная архитектура Геопортала позволяет создавать цифровые сервисы, которые можно использовать как для исследований, так и для образовательных задач по различной тематике для обработки, анализа и трехмерной визуализации пространственных планетных данных. Среди них приведем в качестве примера приложение «OrbitCalc» – интерак-

тивный сервис для вычисления орбит КА и планирования съемки поверхности. Предварительное планирование будущей съемки планет является частью подготовки миссий и призвано обеспечить выполнение фотограмметрических требований для последующего корректного создания высокоточных цифровых моделей местности для топографического картографирования. В рамках исследования Луны, которое имеет ключевое значение для российской лунной программы, планируется орбитальная миссия Луна-26 (Луна-Ресурс-1 ОА) для топографического картографирования поверхности. Стерефотографирование в рамках миссии Луна-Ресурс-1 ОА будет выполняться с помощью лунной стереотопографической камеры (ЛСТК), которая разработана в Институте космических исследований Российской академии наук [15].

В текущей версии веб-приложения «OrbitCalc» реализован расчет орбит КА и параметров их визуализации вокруг Луны, а также Меркурия (рис. 1). Вычислительный модуль написан на C++ и скомпилирован в виде библиотеки DLL, доступ к которой осуществляется серверным приложением Геопортала [16]. Для проверки разработанного алгоритма использованы реальные параметры орбит КА двух миссий НАСА: к Луне (КА LRO) и к Меркурию (КА MESSENGER). Онлайн-сервис «OrbitCalc» для расчета параметров орбиты КА основан на использовании программных библиотек SPICE [17].

При загрузке веб-приложения, после того как пользователь выбирает небесное тело в меню интерфейса с помощью команды SelectBody (список доступных тел указан в файле конфигурации), приложение отправляет всем зарегистрированным сервисам широковещательный запрос для получения информации о растровых/векторных слоях, имеющихся для выбранного небесного тела, а также доступных серверных инструментах.

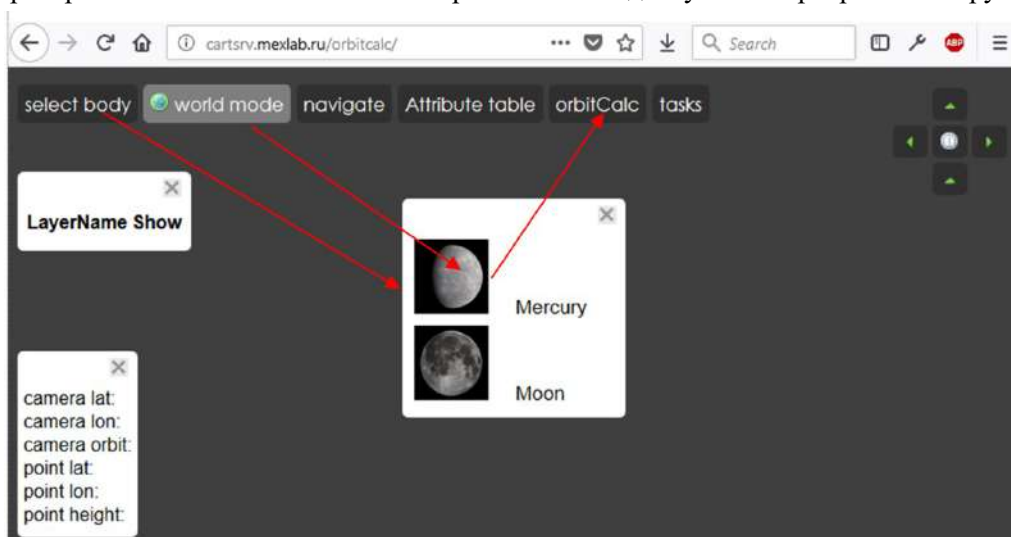


Рис. 1. Пользовательский интерфейс «OrbitCalc»: выбор небесного тела и метода визуализации (2D- или 3D-режим)

Пользователь может указать входные данные для расчетов: начальный момент, период и разрешение, параметры выбранной камеры, начальные орбиты и скорость КА, а также его массу для учета гравитационных возмущений и влияния солнечного давления (рис. 2).

Для учета гравитационных возмущений и влияния солнечного давления разработан алгоритм интегрирования орбит с использованием метода Адамса-Башфорта 5-го порядка [18]. В качестве входного параметра алгоритма указывается небесное тело, для которого известны параметры гравитационного поля (Солнце и Меркурий, Венера, Марс, Юпитер, Сатурн). Алгоритм был протестиро-

ван с использованием навигационной информации КА LRO, поскольку гравитация Луны теперь хорошо известна из миссии НАСА GRAIL [19].

Для проверки алгоритма использована модель гравитационного поля Луны с точностью до 100 порядков [20], а также модель гравитационного поля Земли с точностью до 20 порядков [21]. Из сравнения параметров орбиты КА LRO, рассчитанных в «OrbitCalc», с эталонными данными (параметрами реальной орбиты КА LRO) получена точность около 50 м с интервалом в 24 часа, что позволяет прогнозировать движение КА в соответствии с требованиями будущей российской орбитальной миссии Луна-Ресурс-1 ОА [15].

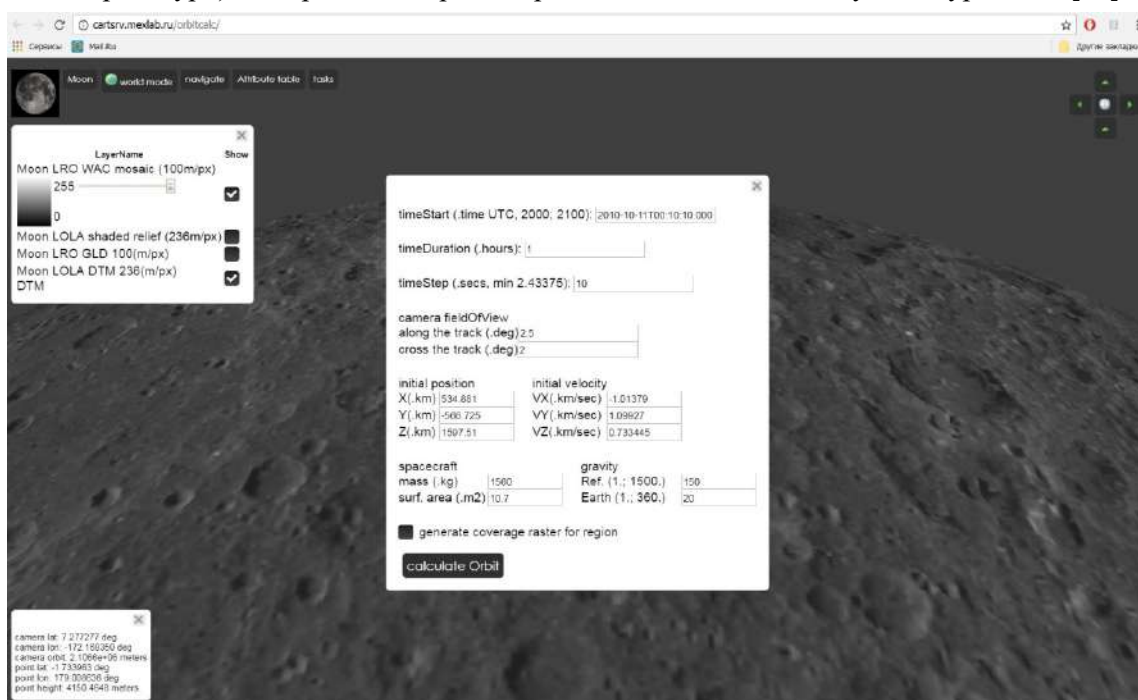


Рис. 2. Входные параметры для расчета орбит КА «Orbit Calc» (для КА LRO на орбите Луны параметры выбираются по умолчанию)

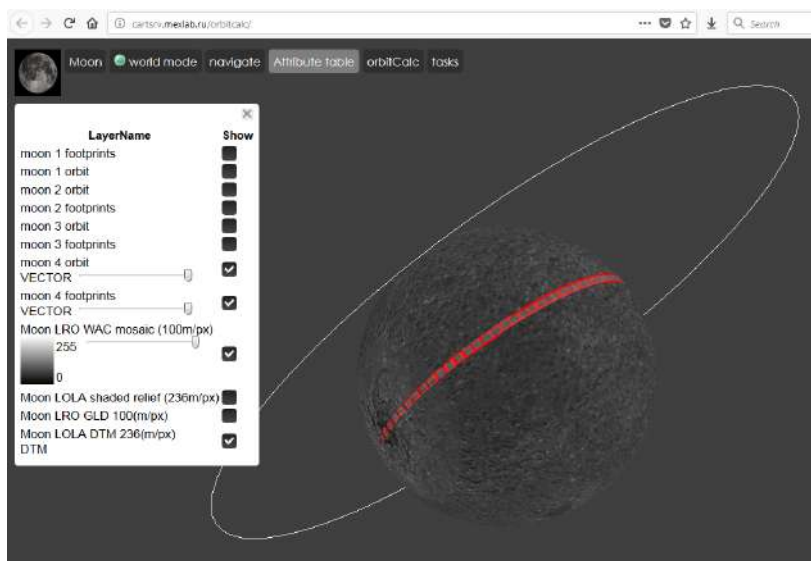


Рис. 3. Пример модельной орбиты и границ съемки КА LRO, рассчитанных с помощью цифрового сервиса «OrbitCalc»



Приложение «OrbitCalc» поддерживает вычисление и визуализацию трехмерных координат орбит КА не только для текущих или уже завершенных миссий за выбранное время в прошлом (рис. 3), но и для прогнозирования орбит в будущем с целью моделирования съемки, например, для планируемой российской миссии Луна-Ресурс-1 ОА. Так, с помощью «OrbitCalc» на основе параметров камеры можно производить расчеты покрытий поверхности небесного тела

отпечатками будущих изображений, которые могут быть получены выбранной камерой (рис. 4), а также оценку перекрытия между изображениями, что необходимо при стереосъемке, в соответствии с требованиями фотограмметрии для последующего формирования ЦМР. Пользователь может установить зону покрытия в географической системе координат и дискретность выходной информации, например, шаг регулярной сетки в градусах.

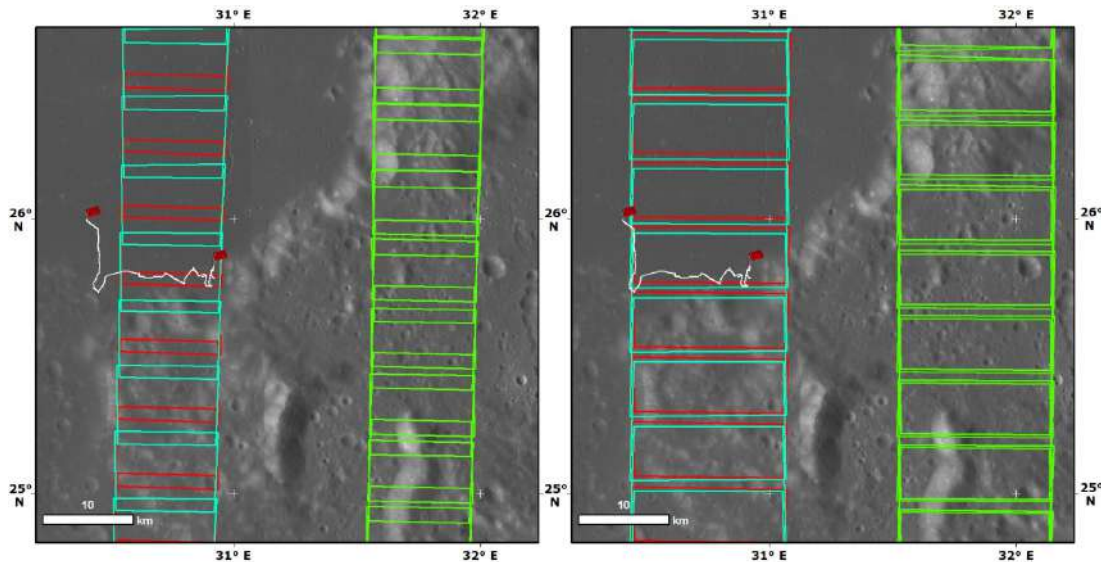


Рис. 4. Пример границ модельных изображений камеры ЛСТК [10] с двух соседних орбит высотой 50 км (слева) и 70 км (справа): границы, смоделированные для передней камеры ЛСТК, выделены красным цветом, для обратной камеры – голубым

По окончании расчетов цифровой сервис «OrbitCalc» информирует пользователя о наличии результатов в виде новых слоев, например, границ будущих снимков, которые могут быть визуализированы в режиме наложения с другими слоями, имеющимися для выбранного тела на район исследований. Так, на рис. 4 показаны границы снимков, смоделированные с помощью «OrbitCalc», на район посадки советской миссии Луна-21, включая территорию передвижения Лунохода-2 (маршрут которого показан линией белого цвета).

При визуализации результатов расчетов на разных масштабных уровнях – от планетарного (рис. 2, 3) до детального (рис. 4) – в качестве дополнительного слоя показана глобальная мозаика Луны, полученная по результатам обработки снимков широкоугольной камеры (WAC), установленной на борту КА LRO [22].

## Заключение

Для повышения качества образования в области управления геоданными, включая задачи территориального планирования РФ, в МИИГАиК

создается специализированный информационный ресурс «Навигатор открытых пространственных данных» для доступа к ОД, имеющим координатную компоненту.

В связи с накопленным мировым опытом организации свободного доступа к планетной информации, особенности публикации открытых пространственных данных исследованы на примере подготовки геоданных для исследования внеземных территорий. Сложность пространственных данных показала необходимость использования калиброванных (специально предобработанных) данных на основе различных форматов, отсутствующих в списке рекомендованных к использованию при публикации ОД.

Для онлайн-доступа к геоданным используются интерактивные сервисы, функциональность которых активно расширяется, что показывают представленные цифровые инструменты Геопортала. Совершенствование программной архитектуры Геопортала для решения различных тематических задач обеспечивает следующий этап эволюции ГИС-систем, примером чего можно рассматривать формирование онлайн-модели «Цифровая Луна».



С внедрением технологий искусственного интеллекта и машинного обучения разрабатываемая в МИИГАиК модель «Цифровая Луна» может быть трансформирована в «Цифровой двойник Луны» – концепт, предложенный Роскосмосом в качестве обучающего проекта, для реализации которого необходимы открытые планетные данные.

Новый информационный ресурс «Навигатор открытых пространственных данных», создаваемый в МИИГАиК для обучения в области исследования территорий, облегчит

доступ к геоданным, как в науках о Земле, так и при изучении небесных тел, за счет упрощенного стандартизированного описания, принятого в концепции «Открытые данные», а интеграция и адаптация программных платформ и цифровых сервисов, отработанных на примере Луны и планет, позволит применять и обрабатывать геоданные широкому кругу пользователей, как для научных исследований и образовательных программ разного уровня, так и для популяризации космических исследований.

## Список литературы

- [1] Гордеев М. О., Гришмановский П. В. Роль открытых данных // Вестник кибернетики. 2017. № 3. С. 26–30.
- [2] Федеральная государственная информационная система территориального планирования [Электронный ресурс]. URL: <https://fgistp.economy.gov.ru/> (дата обращения: 03.04.2023).
- [3] Приказ об утверждении Требований к описанию и отображению в документах территориального планирования объектов федерального значения, объектов регионального значения и объектов местного значения [Электронный ресурс]. URL: <https://www.economy.gov.ru/material/file/7f78d53c0a4bbd9676ff1e149e4118b7/10.pdf> (дата обращения: 03.04.2023).
- [4] Федеральный портал пространственных данных [Электронный ресурс]. URL: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main> (дата обращения: 03.04.2023).
- [5] Методические рекомендации по публикации открытых данных. Версия 3.0 [Электронный ресурс]. URL: <https://data.gov.ru/metodicheskie-rekomendacii-po-publikacii-otkrytyh-dannyh-versiya30> (дата обращения: 03.04.2023).
- [6] VESPA/Europlanet-2024 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.europlanet-vespa.eu/> (дата обращения: 03.04.2023).
- [7] VESPA/Data Services [Электронный ресурс]. URL: <https://vespa.obspm.fr/planetary/data/> (дата обращения: 03.04.2023).
- [8] Erard S., Cecconi B., Le Sidaner P., Rossi A. P., Capria M. T., Schmitt B., Géno V., André N., Vandaele A. C., Scherf M., Hueso R., Määttänen A., Thuillot W, Carr B., Achilleos N, Marmo C., Santolik O., Benson K., Fernique P. VESPA: a community-driven Virtual Observatory in Planetary Science // Planetary and Space Science. 2018. vol. 150. pp. 65–85. doi: 10.1016/j.pss.2017.05.013.
- [9] Зубарев А. Э., Надеждина И. Е., Брусникин Е. С., Карачевцева И. П., Оберст Ю. Методика обработки космических изображений с неоднородными характеристиками для оценки фундаментальных параметров небесных тел на примере Ганимеда // Астрономический вестник. 2016. Т. 50. № 5. С. 372–380. doi: 10.7868/S0320930X1605008X.
- [10] Надеждина И. Е., Зубарев А. Э. Создание опорной координатной сети как основы для изучения физических параметров Фобоса // Астрономический вестник. 2014. Т. 48. № 4. С. 290–299. doi:10.7868/S0320930X14040082.
- [11] Карачевцева И. П., Матвеев Е. Н., Коханов А. А., Козлова Н. А., Гаров А. С. Разработка системы хранения планетных данных и организация доступа к ним на основе ГИС-технологий (Геопортал) // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 89–97.
- [12] Garov A. S., Karachevtseva I. P., Matveev E. V., Zubarev A. E., Florinsky I. V. Development of heterogenic distributed environment for spatial data processing using cloud technologies // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2016. vol. XLI-B4. pp. 385–390, XXIII ISPRS Congress. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B4-385-2016.
- [13] Robinson M. S., Brylow S. M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S. J., Thomas P. C., Denevi B. W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M. A., Caplinger M. A., Ghaemi F. T., Schaffner J. A., Malin M. C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T. N., Eliason E. M., McEwen A. S., Turtle E., Jolliff B. L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview // Space Science Reviews. 2010. vol. 150. pp. 81–124. doi: 10.1007/s11214-010-9634-2.
- [14] Karachevtseva I. P., Garov A. S., Zubarev A. E., Matveev E. V., Kokhanov A. A., Zharkova A. Yu. Planetary Remote Sensing and Mapping. London : CRC Press, 2019. 350 p. doi: 10.1201/9780429505997.
- [15] Polyansky I., Zhukov B., Zubarev A., Nadejdina I., Brusnikin E., Oberst J., Duxbury T. Stereo topographic mapping concept for the upcoming Luna-Resurs-1 orbiter mission // Planetary and Space Science. 2018. vol. 162. pp. 216–232. doi: 10.1016/j.pss.2017.09.013.

- [16] Брусникин Е. С., Патратий В. Д., Зубарев А. Э. Использование эфемерид и библиотек SPICE для расчетов и трехмерной визуализации положения космических аппаратов на орбитах небесных тел в веб-приложении // Труды XIII Конференции молодых ученых «Фундаментальные и прикладные космические исследования». Москва. 2016.
- [17] Utility and Application Programs [Электронный ресурс]. URL: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/utilities.html> (дата обращения: 03.04.2023).
- [18] Montenbruck O., Gill E. Satellite orbits: models, methods and applications. Springer, 2000. 382 p.
- [19] Zuber M. T., Smith D. E., Watkins M. M., Asmar S. W., Konopliv A. S., Lemoine F. G., Melosh H. J., Neumann G. A., Phillips R. J., Solomon S. C., Wieczorek M. A., Williams J. G., Goossens S. J., Kruizinga G., Mazarico E., Park R. S., Yuan D.-N. Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission // Science. 2013. vol. 339. issue 6120. pp. 668–671. doi: 10.1126/science.1231507.
- [20] Lunar gravitational field, NASA Level 2 data and SPICE geometry and navigation kernels created by the GRAIL SDS [Электронный ресурс]. URL: [http://pds-geosciences.wustl.edu/grail/grail-l-lgrs-5-rdr-v1/grail\\_1001/shadr/](http://pds-geosciences.wustl.edu/grail/grail-l-lgrs-5-rdr-v1/grail_1001/shadr/) (дата обращения: 03.04.2023).
- [21] Глобальная модель гравитационного поля Земли ГАО2012 [Электронный ресурс]. URL: <https://cgkipd.ru/opendata/gao2012/?ysclid=liipsvbh35587301909> (дата обращения: 03.04.2023).
- [22] Scholten F., Oberst J., Matz K.-D., Roatsch T., Wählisch M., Speyerer E. J., Robinson M. S. GLD100: The near-global lunar 100 m raster DTM from LROC WAC stereo image data // Journal Geophysical Research. 2012. vol. 117. doi: 10.1029/2011JE003926.

## OPEN SPATIAL DATA FOR THE EXPLORATION OF TERRITORIES AND DIGITAL SERVICES FOR ACCESSING THEM

**I. P. Karachevtseva, S. S. Dubov, M. V. Andreev, A. S. Garov,  
A. E. Zubarev, I. E. Nadezhkina, N. A. Kozlova, N. A. Slodarch**

*Moscow State University of Geodesy and Cartography,  
Moscow, Russian Federation*

*«Open Data» concept is presented considering its application for wide public access to spatial data. It is shown that some principles of the «Open Data» may not be applicable to spatial data due to their peculiarities. The information source «Navigator of Open Spatial Data» is being created at Moscow State University of Geodesy and Cartography to simplify access to geodata for training specialists in this field. Some aspects of the use of open spatial data are shown on the example of the Lunar data, since planetary data has the status of freely distributed. Digital services for access to planetary data are presented. Formats used for storage of spatial planetary data are discussed. Created interactive services and open lunar data accumulated at Moscow State University of Geodesy and Cartography provide free online access to the «Digital Moon» system, which can be considered as a collection of Lunar data, digital tools and infrastructure for processing of spatial data in the field of territory exploration. With growing artificial intelligence and machine learning technologies, the potential of the created «Digital Moon» system can be expanded, and the accumulated planetary spatial data will gain additional interdisciplinary connections.*

*Keywords: exploration of territories, open spatial data, open planetary data, Digital Moon, interactive online services.*

### References

- [1] Gordeev M. O., Grishmanovskij P. V. *Rol' otkrytyh dannyh* [The role of open data] // Proceedings in Cybernetics, 2017, no. 3, pp. 26–30. (In Russian)

- [2] *Federal'naya gosudarstvennaya informacionnaya sistema territorial'nogo planirovaniya* [Federal State Information System of Territorial Planning]. Available at: <https://fgistp.economy.gov.ru/> (accessed 03.04.2023). (In Russian)
- [3] *Prikaz ob utverzhdenii Trebovanij k opisaniyu i otobrazheniyu v dokumentah territorial'nogo planirovaniya ob"ektov federal'nogo znacheniya, ob"ektov regional'nogo znacheniya i ob"ektov mestnogo znacheniya* [Order on Approval of the Requirements for the Description and Display in the Documents of Territorial Planning of Objects of Federal Importance, Objects of Regional Importance and Objects of Local Importance]. Available at: <https://www.economy.gov.ru/material/file/7f78d53c0a4bbd9676ff1e149e4118b7/10.pdf> (accessed 03.04.2023). (In Russian)
- [4] *Federal'nyj portal prostranstvennyh dannyh* [Federal portal of spatial data]. Available at: <https://portal.fppd.cgkipd.ru/main> (accessed 03.04.2023). (In Russian)
- [5] *Metodicheskie rekomendacii po publikacii otkrytyh dannyh. Versiya 3.0* [Guidelines for the publication of open data. Version 3.0]. Available at: <https://data.gov.ru/metodicheskie-rekomendacii-po-publikacii-otkrytyh-dannyh-versiya30> (accessed 03.04.2023). (In Russian)
- [6] VESPA/Europlanet-2024. Available at: <http://www.europlanet-vespa.eu/> (accessed 03.04.2023).
- [7] VESPA/Data Services. Available at: <https://vespa.obspm.fr/planetary/data/> (accessed 03.04.2023).
- [8] Erard S., Cecconi B., Le Sidaner P., Rossi A. P., Capria M. T., Schmitt B., Géno V., André N., Vandaele A. C., Scherf M., Hueso R., Määttänen A., Thuillot W, Carr B., Achilleos N, Marmo C., Santolik O., Benson K., Fernique P. VESPA: a community-driven Virtual Observatory in Planetary Science // *Planetary and Space Science*, 2018, vol. 150, pp. 65–85. doi: 10.1016/j.pss.2017.05.013.
- [9] Zubarev A. E., Nadezhdina I. E., Brusnikin E. S., Karachevtseva I. P., Oberst J. A technique for processing of planetary images with heterogeneous characteristics for estimating geodetic parameters of celestial bodies with the example of Ganymede // *Solar System Research*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 352–360, doi: 10.1134/S0038094616050087.
- [10] Nadezhdina I. E., Zubarev A. E. Formation of a reference coordinate network as a basis for studying the physical parameters of Phobos // *Solar System Research*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 269–278. doi: 10.1134/S003809461404008X.
- [11] Karachevtseva I. P., Matveev E. N., Kohanov A. A., Kozlova N. A., Garov A. S. *Razrabotka sistemy hraneniya planetnyh dannyh i organizaciya dostupa k nim na osnove GIS-tehnologij (Geoportal)* [Development of planetary data storage system and organization of access to them based on GIS technologies (Geoportal)] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, vol. 10, no. 4, pp. 89–97. (In Russian)
- [12] Garov A. S., Karachevtseva I. P., Matveev E. V., Zubarev A. E., Florinsky I. V. Development of heterogenic distributed environment for spatial data processing using cloud technologies // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, 2016, vol. XLI–B4, pp. 385–390, XXIII ISPRS Congress. doi:10.5194/isprs-archives-XLI-B4-385-2016.
- [13] Robinson M. S., Brylow S. M., Tschimmel M., Humm D., Lawrence S. J., Thomas P. C., Denevi B. W., Bowman-Cisneros E., Zerr J., Ravine M. A., Caplinger M. A., Ghaemi F. T., Schaffner J. A., Malin M. C., Mahanti P., Bartels A., Anderson J., Tran T. N., Eliason E. M., McEwen A. S., Turtle E., Jolliff B. L., Hiesinger H. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview // *Space Science Reviews*, 2010, vol. 150, pp. 81–124. doi: 10.1007/s11214-010-9634-2.
- [14] Karachevtseva I. P., Garov A. S., Zubarev A. E., Matveev E. V., Kokhanov A. A., Zharkova A. Yu. *Planetary Remote Sensing and Mapping*. London, CRC Press, 2019, 350 p. doi: 10.1201/9780429505997.
- [15] Polyansky I., Zhukov B., Zubarev A., Nadejdina I., Brusnikin E., Oberst J., Duxbury T. Stereo topographic mapping concept for the upcoming Luna-Resurs-1 orbiter mission // *Planetary and Space Science*, 2018, vol. 162, pp. 216–232. doi: 10.1016/j.pss.2017.09.013.
- [16] Brusnikin E. S., Patratij V. D., Zubarev A. E. *Ispol'zovanie efemerid i bibliotek SPICE dlya raschetov i trekhmernoj vizualizacii polozheniya kosmicheskikh apparatov na orbitah nebesnyh tel v veb-prilozhenii* [Using ephemeris and SPICE libraries for calculations and 3D visualization of the position of spacecraft in the orbits of celestial bodies in a web application] // *Proceedings of the XIII Conference of Young Scientists «Fundamental and Applied Space Research»*, Moscow, 2016. (In Russian)
- [17] Utility and Application Programs. Available at: <https://naif.jpl.nasa.gov/naif/utilities.html> (accessed 03.04.2023).
- [18] Montenbruck O., Gill E. *Satellite orbits: models, methods and applications*. Springer, 2000, 382 p.
- [19] Zuber M. T., Smith D. E., Watkins M. M., Asmar S. W., Konopliv A. S., Lemoine F. G., Melosh H. J., Neumann G. A., Phillips R. J., Solomon S. C., Wieczorek M. A., Williams J. G., Goossens S. J., Kruizinga G., Mazarico E., Park R. S., Yuan D.-N. Gravity Field of the Moon from the Gravity Recovery and Interior Laboratory (GRAIL) Mission // *Science*, 2013, vol. 339, issue 6120, pp. 668–671. doi: 10.1126/science.1231507.
- [20] Lunar gravitational field, NASA Level 2 data and SPICE geometry and navigation kernels created by the GRAIL SDS. Available at: [http://pds-geosciences.wustl.edu/grail/grail-1-lgrs-5-rdr-v1/grail\\_1001/shadr/](http://pds-geosciences.wustl.edu/grail/grail-1-lgrs-5-rdr-v1/grail_1001/shadr/) (accessed 03.04.2023).
- [21] *Global'naya model' gravitacionnogo polya Zemli GAO2012* [Global model of the Earth's gravitational field GAO2012]. Available at: <https://cgkipd.ru/opendata/gao2012/?ysclid=liipsvbh35587301909> (accessed 03.04.2023). (In Russian)
- [22] Scholten F., Oberst J., Matz K.-D., Roatsch T., Wählisch M., Speyerer E. J., Robinson M. S. GLD100: The near-global lunar 100 m raster DTM from LROC WAC stereo image data // *Journal Geophysical Research*, 2012, vol. 117. doi: 10.1029/2011JE003926.

## Сведения об авторах

*Андреев Максим Вячеславович* – преподаватель Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК), специалист-разработчик Лаборатории открытых данных МИИГАиК. Окончил МИИГАиК в 2009 году. Область научных интересов: компьютерные науки, разработка программного обеспечения, ГИС, дистанционное зондирование Земли.

*Гаров Андрей Сергеевич* – ведущий программист Комплексной лаборатории исследования вземных территорий МИИГАиК. Окончил Московский физико-технический университет (национальный исследовательский университет) в 1993 году. Область научных интересов: компьютерные науки, разработка программного обеспечения, информационные системы, геопорталы.

ORCID: 0000-0003-2409-3603

*Дубов Сергей Сергеевич* – кандидат технических наук, директор Центра отраслевых мониторинговых систем и информационной безопасности МИИГАиК. Окончил МИИГАиК в 2000 году. Область научных интересов: геоинформатика, информационная безопасность, открытые данные.

*Зубарев Анатолий Эдуардович* – старший научный сотрудник Комплексной лаборатории исследования вземных территорий МИИГАиК. Окончил МИИГАиК в 2008 году. Область научных интересов: высшая геодезия, фотограмметрия, обработка данных дистанционного зондирования, планетные данные.

ORCID: 0000-0002-7280-8426

*Карачевцева Ирина Петровна* – кандидат технических наук, заведующий Комплексной лабораторией исследования вземных территорий МИИГАиК. Окончила МИИГАиК в 1982 году. Область научных интересов: геоинформатика, базы планетных данных, планетная картография.

ORCID: 0000-0002-0013-4186

*Козлова Наталья Александровна* – младший научный сотрудник Комплексной лаборатории исследования вземных территорий МИИГАиК. Окончила МИИГАиК в 2012 году. Область научных интересов: геодезия, фотограмметрия, обработка данных дистанционного зондирования, планетные данные.

ORCID: 0000-0002-5737-0059

*Надеждина Ирина Евгеньевна* – научный сотрудник Комплексной лаборатории исследования вземных территорий МИИГАиК. Окончила МИИГАиК в 2005 году. Область научных интересов: высшая геодезия, обработка данных дистанционного зондирования, исследования малых тел Солнечной системы.

ORCID: 0000-0002-1615-9142

*Слодарж Николай Алексеевич* – техник Лаборатории открытых данных МИИГАиК. Окончил Уральский федеральный университет в 2021 году. Область научных интересов: геоинформатика, фотограмметрия, дистанционное зондирование.

## ОБ ОПЫТЕ ИНТЕГРАЦИИ НАУЧНЫХ И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УЧРЕЖДЕНИЙ В ПРОЕКТАХ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКОЛОЗЕМНОЕ КОСМИЧЕСКОЕ ПРОСТРАНСТВО

П. Б. Далабаев<sup>1</sup>, Б. М. Петрухин<sup>1</sup>, И. В. Усовик<sup>1</sup> ✉, А. В. Богатый<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»,  
г. Королев, Московская область, Российская Федерация

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского  
авиационного института (национального исследовательского университета),  
г. Москва, Российская Федерация

*Представлена история развития проблемы и исследований космического мусора. Выполнен анализ текущего состояния техногенного засорения околоземного космического пространства, показаны предпосылки к дальнейшему росту техногенного засорения околоземного космического пространства. Продемонстрированы конкретные примеры решения задач ограничения образования космического мусора и защиты космических аппаратов. Для одной из наиболее засоренной области геостационарной орбиты, в которой отсутствуют естественные факторы ухода объектов, рассмотрен сформированный научно-технический задел для реализации проекта активного увода объектов космического мусора с использованием сервисного космического аппарата с системой инъекции ионного пучка. Указаны роль и вклад участников разработки в создании научно-технического задела. Показаны преимущества предлагаемого метода дистанционного воздействия на космические объекты и технические аспекты реализации проекта. Предложено использовать организационную форму перспективных проектов по снижению антропогенного воздействия на околоземное космическое пространство в виде Консорциума в составе научного, образовательного и индустриального партнеров. В рамках такой формы взаимодействия обеспечивается решение комплекса задач как по созданию новой перспективной ракетно-космической техники, так и по образованию кадров для ракетно-космической отрасли.*

*Ключевые слова: антропогенное засорение, геостационарная орбита, ионный пучок, космический объект.*

### Введение

Проблема засорения околоземного космического пространства (ОКП), впервые проявившаяся более 40 лет назад, является глобальной мировой угрозой для устойчивого осуществления космической деятельности.

Исторически можно выделить следующие основные этапы исследования проблемы антропогенного засорения ОКП [1–4]:

- 1980-е годы – осознание данной проблемы, которое связывают со столкновением космического мусора с иллюминатором космического корабля «Спейс шаттл», вызвавшего необходимость его замены для следующего полета;

- 1990-е годы – формирование групп, занимающихся всесторонним исследованием проблемы космического мусора (КМ), включая Межагентский координационный комитет по космическому мусору (МККМ), группы в рамках The International Academy of Astronautics (IAA) и Committee on Space Research (COSPAR);

- 2000-е годы – разработка и утверждение руководящих принципов по ограничению образования КМ МККМ и Научно-технического подкомитета Комитета по использованию космического пространства в мирных целях ООН;

- 2010-е годы – утверждение стандарта ISO 24113 верхнего уровня по вопросам ограничения образования КМ, развитие системы международных стандартов по вопросам КМ;

- 2020-е годы – утверждение Руководящих принципов обеспечения долгосрочной устойчиво-

✉ UsovikIV@tsniimash.ru

сти космической деятельности в рамках Научно-технического подкомитета Комитета по использованию космического пространства в мирных целях ООН и начало их имплементации в космической деятельности.

2020 год также связан с началом развертывания больших орбитальных группировок, что приводит к существенному росту каталогизированных объектов в околоземном космическом пространстве и появлению новых факторов негативного влияния засорения ОКП на устойчивость космической деятельности.

## 1. Решение проблемы ограничения техногенного засорения ОКП

На международном уровне этому вопросу уделяется большое внимание. Ряд правовых норм, в первую очередь, ответственность за ущерб, нанесенный космическими объектами, закреплены в договорах и соглашениях Комитета по использованию космического пространства в мирных целях

ООН. Всесторонним исследованием проблемы занимается Межагентский координационный комитет по космическому мусору. Однако, несмотря на международные усилия, проблема техногенного засорения космического пространства в двадцатые годы 21-го столетия усугубляется, в первую очередь, за счет развертывания многоспутниковых систем в низкоорбитальной области. Динамика роста количества каталогизированных космических объектов в ОКП представлена на рис. 1.

Развертывание больших орбитальных группировок приводит к существенному росту как каталогизированных, так и малоразмерных ненаблюдаемых объектов КМ. Сегодня только каталогизированных космических объектов свыше 25000. Причем, действующие космические аппараты (КА) составляют лишь пятую часть наблюдаемых объектов. На орбитах находится примерно такое же количество крупногабаритных объектов КМ, а именно – элементы средств выведения и недействующие КА, что выводит на первый план вопрос их увода из активно используемых областей ОКП.



Рис. 1. Динамика роста количества каталогизированных космических объектов в околоземном космическом пространстве [15]

Интенсивность мировой космической деятельности растет. Увеличивается количество стран-участниц. Степенной рост количества космических объектов приводит к увеличению вероятности взаимных столкновений. Вследствие высоких (более 10 км/с) относительных скоростей столкновения объектов КМ с КА имеют существенные риски нарушения их работоспособности и, даже, есть этому практически подтвержденные факты.

В то же время до 87 % пусковой деятельности, как одного из видов космической деятельности, приходится на долю ведущих космических держав – Российскую Федерацию, КНР и США. Исходя из того, что международные регламенты отводят ключевую роль в ответственности за ущерб, нанесенный космическими объектами, именно запускающим государствам, на степень антропогенного засорения ОКП, в первую очередь,



вливают меры по ограничению образования КМ, принимаемые вышеназванными государствами.

В целом, международные усилия по антропогенному воздействию на ОКП сводятся к вопросам регулярной доработки правовых норм и международных стандартов. Гармонизация национальных нормативных документов ведется национальными космическими агентствами. В рамках деятельности Комитета по использованию космического пространства в мирных целях ООН и МККМ на постоянной основе проводится анализ проблемных вопросов, с которыми сталкиваются национальные космические агентства. По результатам анализа формируются предложения по доработке международных стандартов и других документов, определяющих правовые нормы по проблеме техногенного засорения ОКП [4–7].

Российская Федерация поддерживает международные усилия по решению проблемы КМ. Под руководством Государственной корпорации по космической деятельности «Роскосмос» осуществляется и поддерживается реализация проектов и мероприятий по всему спектру общепринятых форм и способов решения указанной проблемы.

Основными методами и способами решения проблемы антропогенного засорения космического пространства являются [4]:

- предупреждение об опасных ситуациях: наблюдение и каталогизация космических объектов, совершенствование и повышение точности моделей космического мусора;
- защита функционирующих КА: активная защита (маневры уклонения от столкновения) и пассивная защита (экраны и конструкция КА);

- ограничение засорения околоземного космического пространства: предъявление нормативных требований к создаваемой технике по ограничению техногенного засорения, увод и утилизация космического мусора.

В свою очередь, к основным мерам предупреждения об опасных ситуациях в ОКП относятся наблюдение и каталогизация космических объектов, совершенствование и повышение точности моделей КМ.

Каталогизацию космических объектов в Российской Федерации осуществляет автоматизированная система предупреждения об опасных ситуациях в ОКП. В рамках этой системы интегрируются данные наблюдений от оптических пунктов и телескопов, включая средства Российской академии наук. В перспективе до 2035 года эта система будет наращиваться как технически, так и функционально, в первую очередь за счет создания космического сегмента средств наблюдения и наземных радиолокационных средств.

Фракции ненаблюдаемых малоразмерных объектов космического мусора оказывают все большее влияние на космическую технику. Рост их количества имеет темпы большие, чем у каталогизированных объектов. В связи с чем на постоянной основе ведутся работы по математическому моделированию космического мусора. Говоря о совершенствовании и повышении точности моделей КМ, следует отметить ГОСТ Р 25645.167-2022 [8], в котором используется усовершенствованная модель КМ (пример расчетов с использованием этой модели приведен на рис. 2), а также запланированное к 2025 году совершенствование

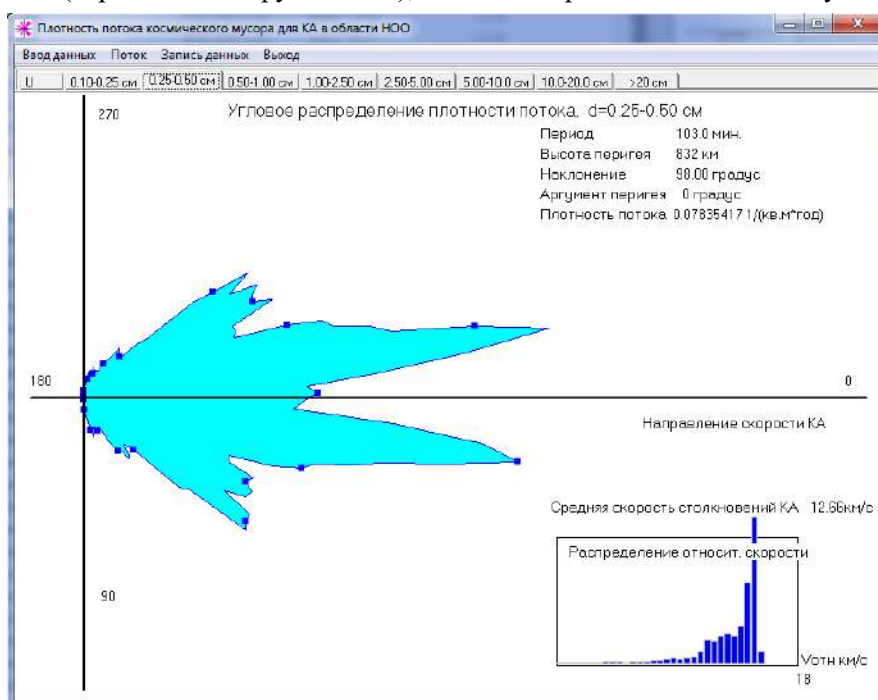


Рис. 2. Пример расчетов с использованием усовершенствованной модели КМ

методик расчета потоков метеороидов и космического мусора относительно КА на заданной орбите, базирующихся на модели околоземного космического пространства «Space debris prediction and analysis» (SDPA).

Защита функционирующих КА может быть активной и пассивной [9–15].

Основным способом активной защиты функционирующих КА от КМ является возможность маневра уклонения. В среднесрочной перспективе доля низкоорбитальных КА, обладающих возможностью маневрирования, возрастет с 29 % до 85 %.

Способы пассивной защиты – экраны, материалы, особые конструктивные решения – разрабатываются и внедряются в сочетании с совершенствованием методических средств прогнозирования и оценки последствий возможных нештатных ситуаций на борту КА. В качестве примеров пассивной защиты можно привести следующие:

- аппаратно-программный комплекс «Риск-Удар» на основе Комплексной методики оценки защиты модулей Российского сегмента Международной космической станции и рисков возникновения нештатных ситуаций, обусловленных воздействием метеороидов и космического мусора;
- адаптация комплекса «Риск-Удар» к применению для КА на низких околоземных орбитах;
- новые защитные экраны различной конструкции и из различных материалов.

Говоря об ограничении техногенного засорения ОКП, следует отметить выпущенный в 2018 году ГОСТ Р 52925-2018 [16]. В Российской Федерации меры или методы ограничения техно-

генного засорения ОКП реализуются через систему требований к разработчикам космической техники, предъявляемых на уровне Государственных стандартов и контроле их соблюдения в форме экспертиз проектной и рабочей конструкторской документации.

## 2. Опыт интеграции научных и образовательных учреждений при создании системы активного удаления космического мусора

Говоря об активном удалении и «утилизации» КМ (классификация способов активного удаления представлена на рис. 3), следует отметить, что для одной из наиболее проблемных областей ОКП – геостационарной орбиты – сформирован научно-технический задел для реализации проекта активного увода объектов КМ с использованием сервисного КА с системой инъекции ионного пучка. Этот способ эффективен тем, что не требует наличия у уводимого объекта каких-либо конструктивных элементов, придающих ему свойства «операбельности» и может быть применен практически к любому объекту, представляющему опасность для активных КА. Научно-технический задел для реализации проекта активного увода объектов КМ в виде лабораторного образца системы инъекции ионного пучка создан подразделением Московского авиационного института – Научно-исследовательским институтом прикладной механики и электродинамики. Работы по созданию задела ведутся на протяжении 8 лет с участием целого ряда подразделений института.



Рис. 3. Классификация способов активного удаления и утилизации КМ

Практически параллельно в АО «РЕШЕТНЁВ» разработан проектный облик сервисного космического аппарата на основе унифицированной платформы «Экспресс-1000НМ» и определен перечень доработок, необходимых для развертывания на базе этой платформы системы ионного пучка.

Вышеназванные работы выполнялись при научно-методическом обеспечении со стороны

АО «ЦНИИмаш». Сформирована система требований, определена фоноцелевая обстановка, обеспечена гармонизация разрабатываемого научно-технического задела с отечественной и международной нормативной базой.

Принципиальная схема действия ионного пучка представлена на рис. 4.

Необходимые операции по доработке платформы «Экспресс-1000НМ» по составным ча-

стям (СЧ) (подсистемам) сервисного КА представлены в табл. 1.

На рис. 5 и 6 представлены внешний вид сервисного КА в стартовой и рабочей конфигурации.

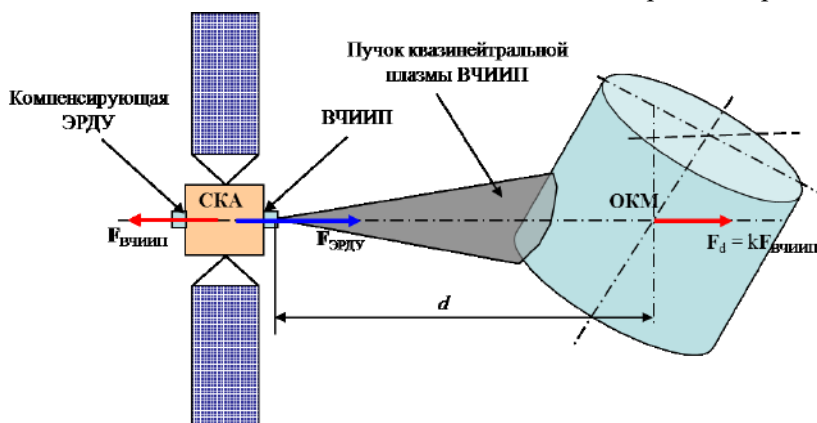


Рис. 4. Принципиальная схема действия ионного пучка

Таблица 1

Необходимые операции по доработке платформы «Экспресс-1000НМ» по СЧ КА

Наименование СЧ КА	Требуемая модернизация платформы «Экспресс-1000НМ»
Бортовой комплекс управления	Реализация дополнительных режимов управления
Подсистема электропитания	Дополнительная защита от внешнего воздействия ионного пучка
Подсистема ориентации и стабилизации (СОС)	Размещение оптических датчиков СОС на панели $Y_S$ . Определение применяемого комплекта ЭМИО в зависимости от величины внешних возмущающих моментов
Подсистема коррекции	Определение используемого двигателя (СПД-100/СПД-70). Размещение двигателей на механизме ориентации вектора тяги системы преобразования и управления для обеспечения одновременной работы двух двигателей. Установка 2–4 дополнительных двигательных блоков, предназначенных для обеспечения торможения сервисного КА при нештатном сближении с космическим мусором
Подсистема терморегулирования	Не требуется
Механическое устройство батареи солнечной	Не требуется

Следует отметить, что АО «ЦНИИмаш» на систематической основе проводит работы по научно-методическому обеспечению проектов в области техногенного засорения ОКП:

- участие в отраслевой научно-технической политике обеспечения долгосрочной устойчивости космической деятельности: формирование системы требований к ракетно-космической технике по вопросам техногенного засорения ОКП, разработка и поддержание в актуальном состоянии нормативно-технической базы, гармонизация отечественных стандартов со стандартами Международной организации по стандартизации (ИСО) и др.;

- прогнозирование изменений техногенного засорения ОКП, включая прогноз эволюции попу-

ляции КМ на различных орбитах, оценку влияния многоспутниковых орбитальных группировок на рост объектов КМ;

- систематизация методов и способов решения проблем КМ.

Таким образом, на практике отработан механизм взаимодействия научно-образовательного учреждения, отраслевого института и научно-производственной организации. К основным внедренным механизмам реализации перспективных проектов по снижению антропогенного воздействия на ОКП относятся:

- 1) Системные, поисковые и прикладные исследования в рамках работ 2016–2025 годов: выполнен анализ конкурентной среды на потенциальном рынке оказания услуг по удалению объек-

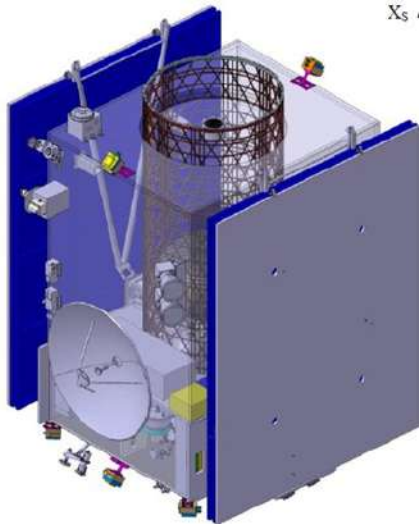


Рис. 5. Сервисный КА в стартовой конфигурации

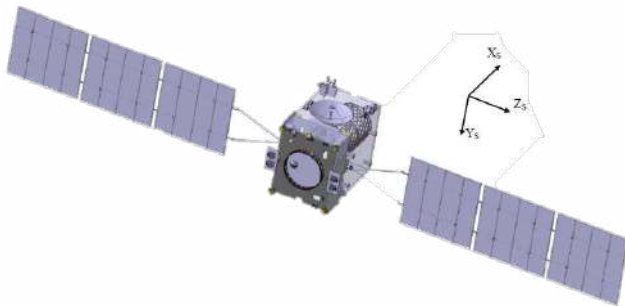


Рис. 6. Сервисный КА в рабочей конфигурации

тов КМ из защищаемой области геостационарной орбиты.

2) Определение базовых технических характеристик базовой платформы и системы инжекции для сервисного КА.

3) Изготовление лабораторного образца системы инжекции ионного пуска (СИИП).

4) Разработка алгоритма управления, оптимизированного по минимуму расхода рабочего тела – основного невозобновляемого ресурса сервисного КА.

5) Обоснование доработки платформы для создания сервисного КА.

6) Формирование проектного облика КА.

В настоящее время по каждому из этих направлений работ имеется продолжение, которое может быть реализовано в форме, например, проектного офиса «Услуги по уводу крупногабаритных объектов космического мусора на орбиты захоронения». Причем, состав задач и распределение функций между участниками такого проектного офиса уже известны и, в целом, определены, исходя из внедренных в рамках настоящего научно-технического задела, механизмов взаимодействия научно-образовательного учреждения, отраслевого института и научно-производственной организации.

## Заключение

Эффективное решение проблемного вопроса по снижению антропогенного воздействия на ОКП может быть реализовано посредством формирования проектного офиса «Услуги по уводу крупногабаритных объектов космического мусора на орбиты захоронения» со следующими функциями:

- научно-техническое сопровождение проекта создания и эксплуатации КА с СИИП;
- анализ проблемных вопросов реализации активного увода КМ из области геостационарной орбиты с использованием КА, оборудованного СИИП;
- создание системы инжекции ионного пучка;
- проведение исследовательских испытаний лабораторного образца на предмет выполняемости технических требований;
- разработка специализированных подсистем платформы;
- изготовление КА на базе модернизированной платформы.

В перспективе в качестве организационной формы реализации проектов по снижению антропогенного воздействия на ОКП может рассматриваться консорциум. В составе консорциумов активную роль могут сыграть ВУЗы, осуществляющие подготовку кадров по соответствующим специальностям. Консорциум, как организационная форма перспективных проектов по снижению антропогенного воздействия на околоземное космическое пространство, будет включать и, по сложившейся практике, уже включает следующих представителей:

- научный партнер – научно-методическое сопровождение проекта;
- образовательный партнер – проведение фундаментальных исследований и подготовка кадров для обеспечения проекта;
- индустриальный партнер – проектирование, изготовление и отработка КА и других элементов космической системы.

Рассмотренный механизм реализации проекта применим и к другим рассмотренным выше способам и методам решения проблемы антропогенного засорения ОКП.

Среди основных перспективных направлений деятельности ВУЗов по предотвращению образования КМ можно выделить:

- исследование новых методов и способов решения проблемы образования КМ;
- разработка физико-математических моделей и натуральных образцов средств пассивации КА и ступеней ракет-носителей, а также моделей и образцов по иным способам снижения образования КМ;
- моделирование и исследование процессов эволюции в ОКП ненаблюдаемых фрагментов КМ.



## Список литературы

- [1] Назаренко А. И. Задачи стохастической космодинамики. Математические методы и алгоритмы решения. М. : Ленанд, 2018. 352 с.
- [2] Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. М. : ИКИ РАН, 2013. 216 с.
- [3] Райкунов Г. Г. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 1. Методы наблюдения и модели космического мусора. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. 248 с.
- [4] Райкунов Г. Г. Космический мусор. В 2 кн. Кн. 2. Предупреждение образования космического мусора. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. 188 с.
- [5] Compendium of space debris mitigation standards adopted by States and international organizations [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/space-debris/compendium.html> (дата обращения: 01.03.2023).
- [6] ISO 24113–2019. Space systems – Space debris mitigation requirements. 2019.
- [7] Рекомендация МСЭ–R S.1003-2 «Защита геостационарной орбиты как окружающей среды». 2011.
- [8] ГОСТ Р 25645-2022. Космическая среда (естественная и искусственная). Модель пространственно-временного распределения плотности потоков техногенного вещества в околоземном космическом пространстве.
- [9] Дмитриук С. В. Космический мусор: прикладные аспекты угрозы // Воздушно-космическая сфера. 2019. № 2 (99). С. 56–59.
- [10] Kitamura Sh. Large Space Debris Reorbiter Using Ion Beam Irradiation // Abstracts of 61 International Astronautical Congress. Czech Republic, Prague. 2010.
- [11] Bombardelli C., Pelaez J. Sistema de modificación de la posición y actitud de cuerpos en órbita por medio de satélites guía. Patent ES 2365394B2, 2010.
- [12] Петухов В. Г. Оптимизация траекторий космических аппаратов с электроракетными двигательными установками методом продолжения. М. : МАИ, 2013. 224 с.
- [13] Логинов С. С., Усовик И. В., Яковлев М. В., Обухов В. А., Попов Г. А., Свотина В. В., Вилков Ю. В., Кирилов В. А., Попов В. В. Бесконтактный увод объектов космического мусора из защищаемой области геостационарной орбиты // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 5 (98). С. 28–36.
- [14] Obukhov V., Pokryshkin A., Popov G., Svotina V. Stability of a moving control of a service SC and a space debris object at impact on it by an ion beam // Advances in the Astronautical Sciences DyCoSS'2017. Russia, Moscow. vol. 161. pp. 665–675. (In Russian)
- [15] Захарова А. П., Степанов Д. В., Степанов И. Б., Усовик И. В. Анализ трафика запусков, разрушений космических объектов и сходов с орбиты в период 2010–2021 гг. как основных составляющих эволюции космического мусора // Космонавтика и ракетостроение. 2022. № 2 (125). С. 99–111.
- [16] ГОСТ Р 52925-2018. Изделия космической техники. Общие требования к космическим средствам по ограничению техногенного засорения околоземного космического пространства. М. : Стандартинформ, 2018.

## ON THE EXPERIENCE OF INTEGRATING SCIENTIFIC AND EDUCATIONAL INSTITUTIONS IN PROJECTS TO LIMIT ANTHROPOGENIC IMPACT ON NEAR-EARTH SPACE

**P. B. Dalabaev<sup>1</sup>, B. M. Petrukhin<sup>1</sup>, I. V. Usovik<sup>1</sup>, A. V. Bogaty<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> JSC «Central Research Institute for Machine Building»,  
Korolyov, Moscow region, Russian Federation

<sup>2</sup> Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics of Moscow Aviation Institute  
(National Research University),  
Moscow, Russian Federation

*The history of space debris research problem development is presented. The analysis of current state of space debris in near-Earth space is carried out, prerequisites for further growth space debris in near-Earth space are shown. Concrete examples of solving problems of space debris mitigation and protecting spacecraft are demonstrated. For one of the most clogged areas of geo-*

stationary orbit, in which there are no natural factors of objects leaving, formed scientific and technical groundwork for implementation of space debris active removal of objects project with using a service spacecraft with an ion beam injection system is considered. The role and contribution of development participants in creation of scientific and technical groundwork are indicated. The advantages of proposed method of remote impact on space objects and technical aspects of the project implementation are shown. It is proposed to use organizational form of promising projects to reduce anthropogenic impact on near-Earth space in the form of a Consortium consisting of scientific, educational and industrial partners. Within framework of this form of interaction, solution of a set of tasks is provided both for creation of new promising rocket and space technology and for the education of personnel for rocket and space industry.

**Keywords:** space debris, geostationary orbit, ion beam, space object.

## References

- [1] Nazarenko A. I. *Zadachi stohasticheskoy kosmodinamiki. Matematicheskie metody i algoritmy resheniya* [Problems of stochastic cosmodynamics. Mathematical methods and solution algorithms]. Moscow, Lenand, 2018, 352 p. (In Russian)
- [2] Nazarenko A. I. *Modelirovanie kosmicheskogo musora* [Modeling of space debris]. Moscow, IKI RAN, 2013, 216 p. (In Russian)
- [3] Raikunov G. G. *Kosmicheskij musor. Kniga 1. Metody nablyudeniya i modeli kosmicheskogo musora* [Space debris. Book. 1. Methods of observation and models of space debris]. Moscow, FIZMATLIT, 2014, 248 p. (In Russian)
- [4] Raikunov G. G. *Kosmicheskij musor. Kniga 2. Preduprezhdenie obrazovaniya kosmicheskogo musora* [Space debris. Book. 2. Space debris prevention]. Moscow, FIZMATLIT, 2014, 188 p. (In Russian)
- [5] Compendium of space debris mitigation standards adopted by States and international organizations. Available at: <https://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/topics/space-debris/compendium.html> (accessed 01.03.2023).
- [6] ISO 24113–2019. Space systems – Space debris mitigation requirements, 2019.
- [7] Recommendation ITU–R S.1003-2. *Zashchita geostacionarnoj orbity kak okruzhayushchej sredy* [Protection of the geostationary orbit as an environment], 2011. (In Russian)
- [8] *GOST R 25645-2022. Kosmicheskaya sreda (estestvennaya i iskusstvennaya). Model' prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya plotnosti potokov tekhnogennogo veshchestva v okolozemnom kosmicheskom prostranstve* [State Standard R 25645-2022. Space environment (natural and artificial). Model of spatio-temporal distribution of technogenic matter flux density in near-Earth outer space]. (In Russian)
- [9] Dmitryuk S. V. *Kosmicheskij musor: prikladnye aspekty ugrozy* [Space debris: applied aspects of the threat] // *Aerospace Sphere Journal*, 2019, no. 2 (99), pp. 56–59. (In Russian)
- [10] Kitamura Sh. Large Space Debris Reorbiter Using Ion Beam Irradiation // Abstracts of 61st International Astronautical Congress, Czech Republic, Prague, 2010.
- [11] Bombardelli C., Pelaez J. Sistema de modificación de la posición y actitud de cuerpos en órbita por medio de satélites guía. Patent ES 2365394B2, 2010.
- [12] Petukhov V. G. *Optimizaciya traektorij kosmicheskikh apparatov s elektroraketnymi dvigatel'nymi ustanovkami metodom prodolzheniya* [Optimization of the trajectories of spacecraft with electric rocket propulsion systems by the continuation method]. Moscow, MAI, 2013, 224 p. (In Russian)
- [13] Loginov S. S., Usovik I. V., Yakovlev M. V., Obukhov V. A., Popov G. A., Svotina V. V., Vilkov Yu. V., Kirilov V. A., Popov V. V. *Beskontaktnyj uvod ob"ektov kosmicheskogo musora iz zashchishchaemoj oblasti geostacionarnoj orbity* [Non-contact removal of space debris objects from the protected area of the geostationary orbit] // *Cosmonautics and Rocket Engineering*, 2017, no. 5 (98), pp. 28–36. (In Russian)
- [14] Obukhov V., Pokryshkin A., Popov G., Svotina V. Stability of a moving control of a service SC and a space debris object at impact on it by an ion beam // *Advances in the Astronautical Sciences DyCoSS'2017*, Russia, Moscow, vol. 161, pp. 665–675.
- [15] Zakharova A. P., Stepanov D. V., Stepanov I. B., Usovik I. V. *Analiz trafika zapuskov, razrushenij kosmicheskikh ob"ektov i skhodov s orbity v period 2010–2021 gg. kak osnovnykh sostavlyayushchih evolyucii kosmicheskogo musora* [Analysis of the traffic of launches, destruction of space objects and deorbits in the period 2010–2021 as the main components of the evolution of space debris] // *Cosmonautics and rocket science*, 2022, no. 2 (125), pp. 99–111. (In Russian)
- [16] *GOST R 52925-2018. Izdeliya kosmicheskoy tekhniki. Obshchie trebovaniya k kosmicheskim sredstvam po ogranicheniyu tekhnogennogo zasoreniya okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva* [State Standard R 52925-2018. Space technology products. General requirements for space facilities to limit man-made contamination of near-Earth space]. Moscow, Standartinform, 2018. (In Russian)



## Сведения об авторах

*Богатый Александр Владимирович* – кандидат технических наук, заместитель генерального директора НИИ ПМЭ МАИ. Окончил Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) в 2007 году. Область научных интересов: электроракетные двигатели, система увода космического мусора, импульсные плазменные двигатели.

ORCID: 0000-0003-3998-3190

*Далабаев Пётр Бекенович* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела АО «ЦНИИмаш». Окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского в 1979 году. Область научных интересов: системный анализ, управление космическими аппаратами, космический мусор.

*Петрухин Борис Михайлович* – кандидат технических наук, заместитель начальника Центра системных исследований космической деятельности АО «ЦНИИмаш». Окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского в 1986 году. Область научных интересов: системный анализ, программно-целевое планирование, проектное управление, управление рисками.

*Усовик Игорь Вячеславович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник АО «ЦНИИмаш». Окончил Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) в 2013 году. Область научных интересов: системный анализ, управление, динамика полета, космический мусор.

ORCID: 0000-0002-2429-052X

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС «ИНТЕГРАЛ» ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ГРУППИРОВОК И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Н. А. Завьялова✉, С. С. Негодяев, А. А. Кузнецов, И. Н. Завьялов,  
И. И. Фукин, В. Ю. Семака, П. А. Гришин

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),  
г. Долгопрудный, Московская область, Российская Федерация

Целью работы являлось создание программного комплекса для моделирования решения целевых задач многоспутниковыми группировками. Комплекс состоит из модулей динамики центра масс космического аппарата, расчета дистанционного зондирования Земли, спутниковой связи (включая маршрутизацию передачи сообщений по межспутниковой связи), мониторинга космического пространства и других. Основной особенностью реализации была математическая и вычислительная оптимизация расчетов, что позволило проводить их на обычном компьютере без привлечения дополнительных вычислительных мощностей. В ходе работы были предложены поправки к методу Эверхарта для коррекции шага интегрирования траектории. Параллельная реализация также помогла существенно ускорить вычисления. Для иллюстрации работы приведены примеры решения двух различных задач: расчета оптимальной орбиты для задачи мониторинга космического пространства и решения задачи определения минимального числа космических аппаратов, необходимого для зондирования границы Российской Федерации раз в полчаса. Особенностью комплекса является работа с группировкой как с целостным объектом на уровне постановки задач и последующая аналитика ее решения, которая представляется в виде информации по целевым задачам, подгруппам группировки, космическим аппаратам и всей группировке.

**Ключевые слова:** многоспутниковая группировка, космический аппарат, математическое моделирование, наукоемкий комплекс программ, дистанционное зондирование, космическая связь, мониторинг космического пространства.

## Введение

В настоящий момент в мире неуклонно растет количество космических аппаратов (КА) и космических объектов в околоземном пространстве. Российский каталог содержит несколько десятков таких объектов, а каталог активных космических аппаратов Североамериканского командования воздушно-космической обороны (North American Aerospace Defense Command – NORAD) [1] насчитывала 5844 объекта на 01.06.2022.

Многоспутниковая группировка является сложным для проектирования и эксплуатации техническим объектом. Поэтому на этапах проектирования, разработки, эксплуатации и утилизации таких объектов необходимы специализированные наукоемкие программные комплексы. Предполагается, что такие комплексы включают

в себя линейки математических моделей, базы данных компонент, алгоритмы бортового программного обеспечения и блок методов анализа для оценки полученных результатов.

## 1. Краткое описание программного комплекса «Интеграл»

Такой подход используется в демонстраторе программного комплекса «Интеграл». Комплекс выполнен в виде клиент-серверного приложения, где архитектура вычислительного сервера реализована на языке Python 3, а клиент реализован в виде веб-интерфейса. Расчетные модули реализованы на языке C++ для сокращения времени расчетов. Серверная архитектура модульная и позволяет заменять отдельные вычислительные модули при условии соответствия программных интерфейсов. На сервере также располагаются базы данных выполненных проектов, компонент КА, траекторий, целевых задач и показателей эффек-

✉ Zavialova.na@mipt.ru

тивности. Также возможна интеграция готовых решений (предполагается, что в этом случае они обладают лицензией MIT [2]). Программный комплекс представлен на рис. 1.



Рис. 1. Схема программного комплекса «Интеграл»

Наборы реализованных модулей условно можно разделить на 6 категорий по назначению:

1. Орбитальная динамика, включает численные методы интегрирования траекторий (Эверхаргт [3], Дорманд-Принс [4], Кутта-Фелберг [5], Рунге-Кутта 4-го порядка [6]), модели среды (атмосфера, эфемериды тел Солнечной системы, давление солнечного излучения, геопотенциал и его изменение и влияние тени), а также полуаналитическую модель SGP4 [7; 8].

2. Мониторинг космического пространства, поддерживающий учет программы наблюдений, а также оптический и радиолокационный диапазон, в котором работают наблюдатели.

3. Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в радиолокационном и оптическом диапазонах с учетом программ наблюдений (или автоматическим их выбором), а также определением показателей качества системы.

4. Космическую связь с расчетом сеансов связи, параметров каналов связи с учетом межспутниковой передачи данных и маршрутизации сообщений на сетях, устойчивых к разрывам [9].

5. Конструктор космического аппарата – модуль, позволяющий, используя информацию о компонентах из базы данных и перечень требований к КА, подобрать конфигурации КА, наиболее подходящие, например, по массе.

6. Имитационный эксперимент – модуль, помогающий имитировать выполнение полетных заданий, моделировать работу подсистем, проверять корректность работы бортовых алгоритмов и, соответственно, выдавать технические требования к КА.

Основной особенностью программного комплекса является оптимизация алгоритмов и невы-

сокие требования к вычислительным мощностям. В качестве иллюстрации приведем несколько примеров скорости работы вычислительных модулей.

Для модуля баллистики была предложена модификация выбора шага интегрирования в методе Эверхарта на основе собственного метода оценки погрешности, которая основывалась, в свою очередь, на фундаментальных свойствах квадратур Гаусса. Также был предложен метод параллельных вычислений траекторий КА, разделивший данные для каждого аппарата от общих данных: влияния третьих тел, гравитационного поля Земли, вращения Земли и др. Для процессов, связанных с гравитационным полем, была разработана собственная быстрая модель [10; 11].

В табл. 1 приведены времена расчетов для низких околоземных орбит (НОО), геостационарных орбит (ГСО) и высокоэллиптических орбит (типа Молния) для разной продолжительности полета и 2-х моделей гравитационного поля – на 16 и 64 гармоники. Для каждого типа орбит сначала идет столбец для одного КА, далее указывается число КА и число потоков, обчислываемых параллельно. Из результатов видно, что расчет полета на 1 месяц для менее чем 100 КА занимает до 10 секунд.

В табл. 2 решалась задача мониторинга техногенных объектов в околоземном космическом пространстве оптическими средствами наблюдения, расположенными на орбите и на земной поверхности за 1 сутки измерений. Для этого рассчитывались траектории всех объектов, условия их освещенности, видимые звездные величины и регистрация их наземными и космическими средствами наблюдения.

Таблица 1

Характерные времена расчета для моделирования околоземного полета группы КА

Гармоники	Время полета	НОО			ГСО			Молния		
		1 КА	8(8)	100(14)	1 КА	8(8)	100(14)	1 КА	8(8)	100(14)
16	1 сут.	0,73	0,17	0,41	0,05	0,02	0,07	0,35	0,17	0,24
	<b>30 сут.</b>	<b>21,13</b>	<b>3,52</b>	<b>10,12</b>	<b>1,36</b>	<b>0,5</b>	<b>0,94</b>	<b>10,5</b>	<b>4,22</b>	<b>6,78</b>
	365 сут.	254	49,98	111,03	16,49	4,3	11,68	128,24	44,45	80,75
64	1 сут.	0,86	0,24	1,95	0,05	0,03	0,24	0,41	0,16	1,18
	30 сут.	25,47	7,24	57,72	1,51	0,62	5,15	11,8	4,75	34,19
	365 сут.	297,18	76	596,54	18,28	7,55	58,66	142,11	55,05	422,06

Таблица 2

Характерные времена расчета для задачи мониторинга околоземного космического пространства за одни сутки

Количество целей	Количество КА	Количество наземных телескопов	Время, затрачиваемое на расчет, с
5845	1	0	17,6219
11690	1	0	37,4804
5845	0	1	8,43131
11690	0	1	16,7891
5845	0	10	17,7821
11690	0	10	35,5984
5845	10	0	141,07
11690	10	0	312,584
5845	10	10	150,542
11690	10	10	338,736

В табл. 3 приведены характерные времена для расчетов решения задачи ДЗЗ одним КА в оптическом диапазоне для разных по площади

регионов. Из таблицы видно, что, например, зондирование территории Российской Федерации занимает в течение одного месяца не более 2 секунд.

Таблица 3

Характерные времена расчета (в секундах) для задачи ДЗЗ одним КА за одни сутки

Область	1 день	7 дней	30 дней	360 дней
Украина	0,003	0,021838	0,090423	1,07609
Россия	0,47214	0,361954	1,56123	18,3851
Земной шар	0,55659	4,14132	17,7667	189,935

Далее рассмотрим примеры решения конкретных задач.

## 2. Пример решения задачи мониторинга космического пространства

Задача мониторинга околоземного космического пространства заключается в определении оптимальной орбиты для космического аппара-

та – наблюдателя за космическими объектами техногенного происхождения в околоземном космическом пространстве на высотах до 40 000 км.

Для расчетов формировалась группировка космических объектов. За основу была взята выборка из активных КА базы данных NORAD, состоящая из 5844 объекта (на 1 июля 2022 года). Моделировались одни сутки полета (как показали дальнейшие расчеты, при увеличении продолжительности моделирования результат не меняется).

Объекты представлялись диффузно-рассеивающими сферами, отражающими солнечное излучение по закону Ламберта.

Определялся один показатель эффективности – средняя потенциальная обзорность, который вычислялся следующим образом. Для каждой цели с номером  $j$  определялись интервалы, когда цель находится в поле зрения наблюдателя, эти интервалы суммировались и делились на общее время моделирования:

$$\Omega_j = \frac{\sum_i \tau_{ij}}{T},$$

где  $\sum_i \tau_{ij}$  – сумма всех отрезков времени, когда объект попадал в потенциальную область видимости наблюдателя;  $T$  – время моделирования (в нашем случае 1 сутки). Потенциальная обзорность фактически соответствует доли времени, которое объект наблюдается на указанном интервале времени.

Потенциальная обзорность рассчитывалась с учетом неограниченного поля зрения наблюдателя, но с учетом отражения целью света и необходимости отстройки от Солнца, Луны и Земли.

Средняя потенциальная обзорность рассчитывалась как усредненное значение по всем целям. Для  $N$  целей это:

$$\Omega = \frac{\sum_i \Omega_i}{N}.$$

Далее в расчетах варьировались следующие параметры:

высота	400–2000 км, шаг 25 км
наклонение	0°–180° с шагом 3°
долгота восходящего узла (ДВУ)	0°–360° с шагом 3°

Всего было проведено 479 765 расчетов, результатом каждого расчета было одно число – потенциальная обзорность.

Для наглядности строились тепловые карты для каждой высоты квазикруговой орбиты аппарата-наблюдателя в координатах наклонение–долгота восходящего узла. На рис. 2 представлена такая тепловая карта для высоты 400 км.

400

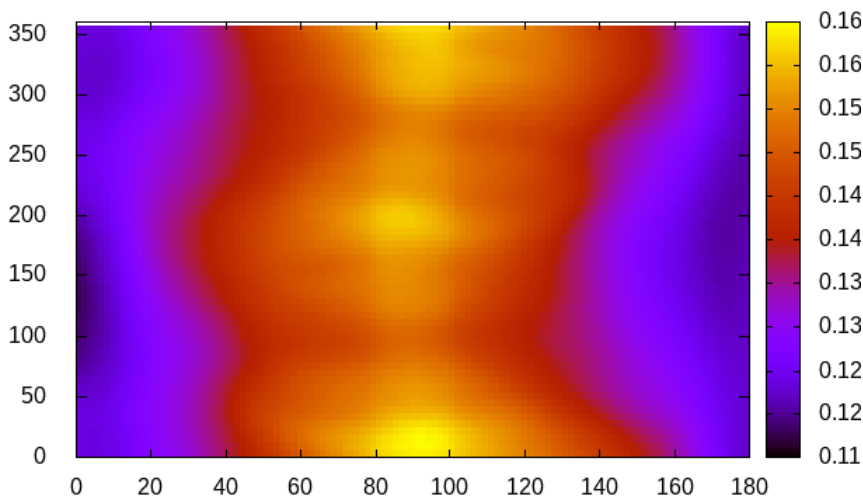


Рис. 2. Средняя обзорность орбит целей

Для каждой высоты выбиралось наилучшее значение средней обзорности и далее по этим наилучшим значениям сравнивались вы-

соты орбит. В табл. 4 приведены наилучшие показатели в зависимости от высоты, наклонения и ДВУ.

Таблица 4

Лучшие значения средней обзорности для разных высот и соответствующие наклонение и долгота восходящего узла

Высота	Наклонение	ДВУ	Средняя обзорность
1050	84,00	180,00	0,21208
1100	84,00	180,00	0,21205
1075	84,00	180,00	0,21181
1125	81,00	180,00	0,21170
1025	84,00	180,00	0,21154

Окончание табл. 4

1000	84,00	180,00	0,21129
975	84,00	183,00	0,21100
1150	81,00	180,00	0,21097
950	96,00	3,00	0,21077
925	96,00	9,00	0,21039
1175	81,00	180,00	0,21008

В результате расчетов было установлено, что наилучшие обзорности лежат в середине рассматриваемого интервала моделирования и находятся на высотах 925–1175 км. При уменьшении или увеличении высоты обзорность уменьшается.

Позже этот результат был подтвержден сравнением с другим показателем качества – ко-

личеством ненаблюдаемых объектов, полученным с помощью многовариантных расчетов при тех же начальных данных. Так, например, на рис. 3 приведены профили, полученные наложением всех возможных результатов для двух показателей эффективности – средняя обзорность и количество ненаблюдаемых целей для рассматриваемого диапазона высот.

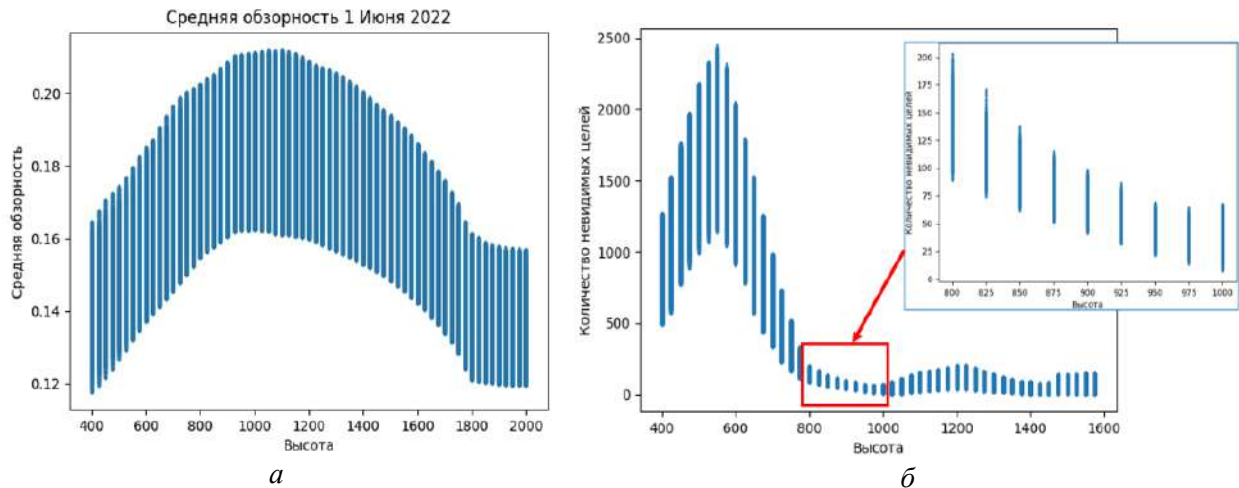


Рис. 3. (а) – средняя потенциальная обзорность для наклонений и ДВУ в зависимости от высот, (б) – число ненаблюдаемых КА для всех наклонений и ДВУ в зависимости от высот

### 3. Пример решения задачи дистанционного зондирования Земли в оптическом диапазоне

Рассмотрим другую задачу: определить минимальное число КА и баллистические построения для зондирования границы РФ группировкой перспективных КА. Считается, что такой КА может производить съемку при наличии относительной угловой скорости снимаемой поверхности до 2°/сек.

Параметры перспективного КА ДЗЗ в зачетных условиях наблюдения:

- высота орбиты – 400 км, орбита – круговая;
- полоса захвата – 10 км;
- предельный угол крена – 20°;
- предельный угол тангажа – 10°;
- максимальная угловая скорость – 2°/сек;
- линейное разрешение – 0,7 м (в надири);
- масса полезной нагрузки – 120 кг.

Было проведено 112 расчетов для различных баллистических построений КА, находящихся на квазикруговых солнечно-синхронных орбитах. В расчетах определялся основной показатель эффективности – средняя периодичность наблюдения по всем точкам – и средняя периодичность наблюдения каждой точки, которая определялась следующим образом. Для каждой точки границы с номером  $j$  определялись интервалы времени, когда эта точка наблюдается, и пропуски между интервалами наблюдения:

$$\omega_j = \max_i \Delta t_{ij},$$

где  $\Delta t_{ij}$  – интервалы не наблюдения точки с номером  $j$ .

Далее по всем точкам считается средняя обзорность. Для  $N$  точек она выглядит так:

$$\omega = \frac{\sum_j \omega_j}{N}.$$



Так же, помимо вычислений орбитальной динамики и полос захвата, решались задачи управления КА и перераспределения задач зондирования между КА.

По результатам, представленным на рис. 4, можно определить то количество КА, которое нужно для просмотра границы с нужной средней периодичностью. И так же определить какое количество КА нужно, чтобы достичь требуемой периодичности наблюдений.

Также можно установить периодичность наблюдения точек границы РФ. Для группировки, состоящей из 153 КА (17 плоскостей по 9 аппаратов), она представлена на рис. 5. Как и везде в подобных задачах периодичность на севере области немного

лучше, чем на юге. Однако, есть некоторые южные точки, для которых значение периодичности значительно хуже, чем в среднем по зондируемому региону. Такая ситуация систематически наблюдается в расчетах, поэтому для выполнения целевых показателей работы группировки было выбрано некоторое пороговое количество точек. Если показатель для них достигался, то считалось, что он выполнен в целом по региону. Указанное пороговое значение может задаваться пользователем произвольно, но в расчетах ниже оно было равно 99 %.

Кроме периодичности можно посчитать за какое время регион оказывается полностью покрыт наблюдением. Результаты для группировки из 153 КА представлены на рис. 6.

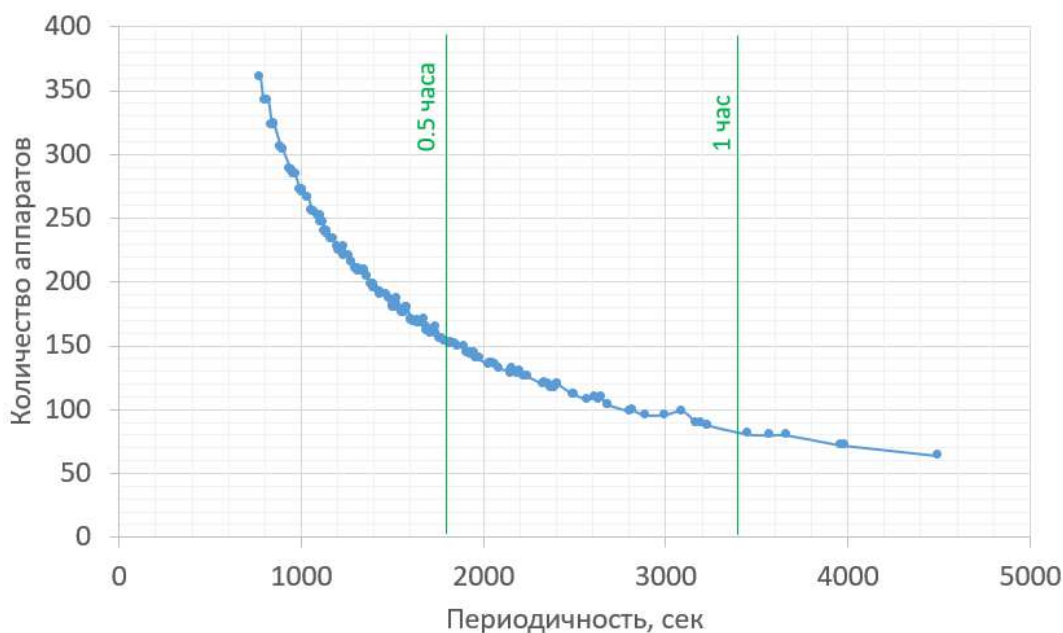


Рис. 4. Минимальное количество КА ДЗЗ, требуемое для достижения нужной периодичности зондирования границы РФ



Рис. 5. Периодичность наблюдения точек границы РФ группировкой из 153 космических аппаратов

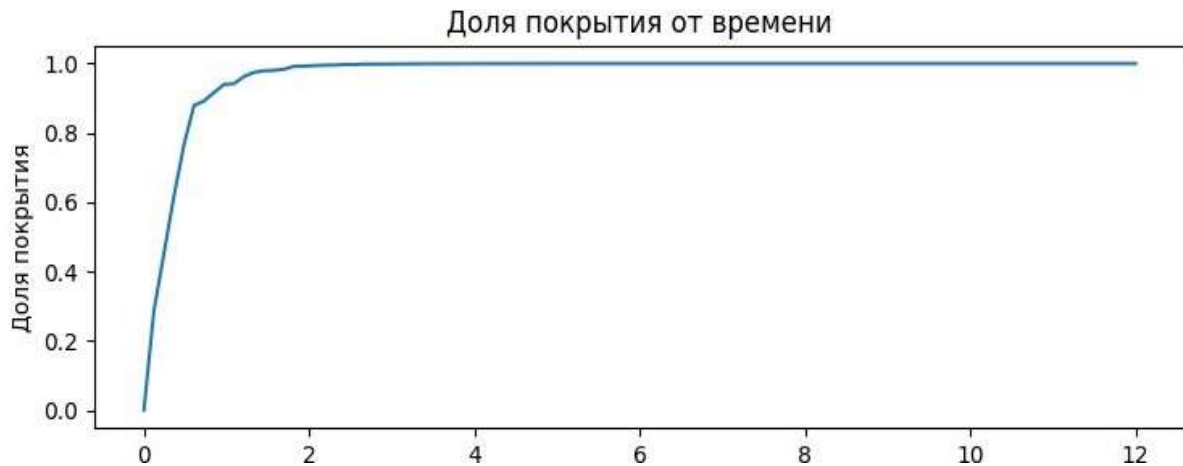


Рис. 6. Покрытие региона в зависимости от времени группировкой из 153 КА

## Заключение

В заключение стоит отметить, что программный комплекс «Интеграл» предназначен для моделирования космических аппаратов и группировок космических аппаратов и позволяет решать следующие задачи (выходящие за рамки настоящей статьи): динамика центра масс КА, ДЗЗ из космоса, космическая связь, мониторинг космического пространства, конструктор КА, имитационный эксперимент.

Основное вычислительное ядро комплекса оптимизировано и позволяет быстро проводить расчеты, например:

- динамика 100 КА на 30 суток (на 14 ядрах) – за 10 секунд;
- съемка 5845 объектов 10-ю оптическими телескопами – за 17,7 секунд;
- оптическая съемка территории РФ в течение месяца – за 1,56 секунды.

## Благодарности

Работа поддержана Фондом перспективных исследований в рамках проекта «Создание демонстратора комплекса программного обеспечения для проектирования многоспутниковых космических систем», шифр «Интеграл-Д».

## Список литературы

- [1] Каталог NORAD [Электронный ресурс]. URL: <http://celestrak.org/NORAD/elements/> (дата обращения: 06.03.2023).
- [2] Various Licenses and Comments about Them [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gnu.org/licenses/license-list.en.html> (дата обращения: 06.03.2023).
- [3] Авдюшев В. А. Интегратор Гаусса–Эверхарта // Вычислительные технологии. 2010. Т. 15. № 4. С. 31–46.
- [4] Aristoff J. M., Horwood J. T., Poore A. B. Orbit and uncertainty propagation: a comparison of Gauss–Legendre-, Dormand–Prince-, and Chebyshev–Picard-based approaches // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. 2014. vol. 118. pp. 13–28. doi: 10.1007/s10569-013-9522-7.
- [5] Фельберг Э. Классические формулы Рунге-Кутты низкого порядка с контролем размера шага и их применение к некоторым задачам теплопередачи. Технический отчет НАСА. 1969, 315 с.
- [6] Аристова Е. Н., Завьялова Н. А., Лобанов А. И. Практические занятия по вычислительной математике. Ч. 1. М.: МФТИ. 2014.
- [7] Lane M. The development of an artificial satellite theory using a power-law atmospheric density representation // 2nd Aerospace Sciences Meeting. 1965. P. 35.
- [8] Cranford K. An improved analytical drag theory for the artificial satellite problem // Astrodynamics Conference. 1969. P. 925. doi: 10.2514/6.1969-925.
- [9] Jain S., Fall K., Patra R. Routing in a delay tolerant network // Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. 2004. pp. 145–158.
- [10] Kuznetsov A. A., Fukin I. I., Bazov S. M., Zavialova N. A. Using an Interpolation Model of the Gravitational Potential for High-Precision Ballistic Calculations // Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering. 2022. pp. 239–247. doi: 10.1007/978-981-16-8154-7\_19.
- [11] Zavialova N. A., Pliashkov E. V., Kuznetsov A. A., Semaka V. Y., Panov V. A., Zavialov I. N., Fukin I. I., Negodiaev S. S. Methods for accurate ballistics calculations for multi-satellite constellations // Advances in the Astronautical Sciences. 2020. pp. 91–98.

## SOFTWARE PACKAGE «INTEGRAL» FOR MODELING SPACE CONSTELLATIONS AND SPACE VEHICLES

N. A. Zavialova, S. S. Negodyaev, A. A. Kuznetsov, I. N. Zavialov,

I. I. Fukin, V. Yu. Semaka, P. A. Grishin

*Moscow Institute of Physics and Technology,  
Dolgoprudny, Moscow Region, Russian Federation*

*The aim of the work was to create a software package for modeling the solution of target problems by multi-satellite constellations. The software consists of modules for the dynamics of the center of mass of the satellites, remote sensing of the Earth, satellite communications (including routing of messages over inter-satellite communications), space monitoring and others. The main feature of the implementation was the mathematical and computational optimization of calculations, which made it possible to carry them out on a conventional computer without involving additional computational power. In the course of the work, corrections to the Everhart method were proposed to improve the trajectory integration step. Parallel implementation also helped to significantly speed up the calculations. To illustrate the work, examples of solving two different problems are given: calculating the optimal orbit for the task of monitoring outer space and solving the problem of determining the minimum number of satellites needed to scan the border of the Russian Federation once every half an hour. A feature of the soft is the work with the constellation as an integral object at the level of setting tasks and the subsequent analytics of its solution, which is presented in the form of information on target tasks, subgroups of the constellation, spacecraft and the entire constellation.*

*Keywords: multi-satellite constellations, spacecraft, mathematical modeling, science-intensive software package, remote sensing, space communication, space monitoring.*

### References

- [1] Catalog NORAD. Available at: <http://celestrak.org/NORAD/elements/> (accessed 06.03.2023).
- [2] Various Licenses and Comments about Them. Available at: <https://www.gnu.org/licenses/license-list.en.html> (accessed 06.03.2023).
- [3] Avdyushev V. A. Gauss–Everhart Integrator // *Computational technologies*, 2010, vol. 15, no. 4, pp. 31–46.
- [4] Aristoff J. M., Horwood J. T., Poore A. B. Orbit and uncertainty propagation: a comparison of Gauss–Legendre-, Dormand–Prince-, and Chebyshev–Picard-based approaches // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*, 2014, vol. 118, pp. 13–28. doi: 10.1007/s10569-013-9522-7.
- [5] Felberg E. Classical low-order Runge-Kutta formulas with step size control and their application to some heat transfer problems. NASA technical report, 1969, 315 p.
- [6] Aristova E. N., Zavyalova N. A., Lobanov A. I. *Prakticheskie zanyatiya po vychislitel'noj matematike* [Practical exercises in computational mathematics]. Moscow, MIPT, 2014. (In Russian)
- [7] Lane M. The development of an artificial satellite theory using a power-law atmospheric density representation // 2nd Aerospace Sciences Meeting, 1965, P. 35.
- [8] Cranford K. An improved analytical drag theory for the artificial satellite problem // *Astrodynamics Conference*, 1969, P. 925. doi: 10.2514/6.1969-925.
- [9] Jain S., Fall K., Patra R. Routing in a delay tolerant network // *Proceedings of the 2004 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, 2004, pp. 145–158.
- [10] Kuznetsov A. A., Fukin I. I., Bazov S. M., Zavialova N. A. Using an Interpolation Model of the Gravitational Potential for High-Precision Ballistic Calculations // *Proceedings of the International Conference on Aerospace System Science and Engineering*, 2022, pp. 239–247. doi: 10.1007/978-981-16-8154-7\_19.
- [11] Zavialova N. A., Pliashkov E. V., Kuznetsov A. A., Semaka V. Y., Panov V. A., Zavialov I. N., Fukin I. I., Negodyaev S. S. Methods for accurate ballistics calculations for multi-satellite constellations // *Advances in the Astronautical Sciences*, 2020, pp. 91–98.

### Сведения об авторах

*Гришин Павел Алексеевич* – аспирант, инженер лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил

Московский физико-технический институт в 2022 году. Область научных интересов: системная архитектура информационных систем.

*Завьялов Иван Николаевич* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил Московский физико-технический институт в 2007 году. Область научных интересов: механика сплошной среды и аэрокосмические технологии.

*Завьялова Наталья Александровна* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончила Московский физико-технический институт в 2008 году. Область научных интересов: математическое моделирование механики сложных систем и механики сплошной среды, создание наукоемких программных комплексов.

170

*Кузнецов Александр Алексеевич* – аспирант, инженер-программист лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Область научных интересов: вычислительные методы небесной механики, прогнозирование движения тел в околоземном пространстве.

*Негодяев Сергей Серафимович* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной механики Московского физико-технического института, директор Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил Московский физико-технический институт в 1984 году. Область научных интересов: разработки в области создания малых космических аппаратов.

*Семака Вадим Юрьевич* – ведущий программист лаборатории исследований радиолокационных алгоритмов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Окончил Московский физико-технический институт в 2018 году. Область научных интересов: создание имитационных моделей.

*Фукин Илья Игоревич* – магистрант, инженер лаборатории моделирования механических систем и процессов Физтех-школы аэрокосмических технологий Московского физико-технического института. Область научных интересов: вычислительные методы небесной механики, прогнозирование движения тел в околоземном пространстве.

## ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК В СИСТЕМЕ ВНЕШНЕГО АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ-МАНИПУЛЯТОРАМИ

**М. В. Кубриков**

*Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева,  
г. Красноярск, Российская Федерация*

*В статье рассматривается реализация цифрового двойника в системе адаптивного управления роботами-манипуляторами. Использование цифровых двойников для планирования, контроля и поддержания жизненного цикла производственного оборудования формирует устойчивое внедрение роботизированных комплексов в технологические процессы высокотехнологичных предприятий. В статье предлагается новый подход, позволяющий решать задачи прямой и обратной кинематики для роботов-манипуляторов. Подход заключается в представлении кинематической схемы робота-манипулятора, обладающего шестью вращательными сочленениями, в виде векторной модели. В качестве реализации данного подхода разработан облегченный математический аппарат, позволяющий существенно снизить вычислительную нагрузку. Все основные расчеты производятся на стороннем сервере, не задействуя вычислительную мощность роботов-манипуляторов. Это позволяет интегрировать математический аппарат в цифровой двойник и сторонние программные пакеты. За счет малой вычислительной нагрузки использование предложенного подхода в системах управления позволяет снизить задержки при работе в режиме реального времени с возможностью увеличения количества роботов-манипуляторов и осуществления контроля с более высокой дискретизацией. Использование цифрового двойника в коллаборации системы роботов позволяет проектировать более универсальные рабочие места и сборочные линии, оптимизировать их загруженность.*

*Ключевые слова: цифровой двойник, производственная линия, сборка, роботизация, автоматизация, производственный процесс.*

### Введение

В высокотехнологичном производстве все большее распространение находят роботы-манипуляторы, способные выполнять широкий спектр операций в зависимости от их компоновки, размеров и исполнительного звена, закрепленного на выходном фланце. Также возрастает доля автоматизированных производств, на которых несколько роботов одновременно выполняют работу в рамках одной технологической ячейки. В результате возникает необходимость не просто запрограммировать каждого робота по отдельности, но и учесть их совместные перемещения в режиме реального времени. Для этого могут быть использованы системы внешнего управления технологической ячейкой, способные моделировать одновременные движения нескольких роботов,

прогнозировать потенциальные опасности столкновений и корректировать траектории каждого из роботов в случае необходимости.

### 1. Обзор существующих решений

Проблемой создания подобных систем является разработка математической модели при решении задачи обратной кинематики робота-манипулятора. Рассмотрим исследования разных авторов при решении данной задачи.

Зачастую задачу обратной кинематики решают как задачу оптимизации [1–3], где параметрами являются значения углов осей манипуляторов, минимизируя при этом значение отклонения положения исполнительного устройства от желаемой точки.

В [1] представлено решение задачи обратной кинематики манипулятора, работающего как в среде без препятствий, так и в загроможденном рабочем пространстве. В этой работе рассматри-

✉ kubrikov@sibsau.ru

© Ассоциация «ТП «НИСС», 2023



вается использование метода оптимизации роя двунаправленных частиц для получения решения задачи обратной кинематики манипулятора. Алгоритм двунаправленного поиска помогает найти решение быстрее, чем обычный однонаправленный поиск. Отмечается, что необходимо дальнейшее исследование для изучения эффективности двунаправленного поиска с помощью метода развязки манипулятора с использованием других метаэвристических методов, таких как генетический алгоритм, алгоритм муравьиной колонии, методы Ньютона-Рэпсона и т. д. Кроме того, метод требует доработки, чтобы получить глобальное оптимальное решение.

В [3] предлагается метод расчета обратной кинематики, основанный на улучшенном алгоритме оптимизации роя частиц (PSO) применимый к обычным роботам. Вводится метод нелинейной динамической инерционной корректировки веса, основанный на концепции подобию, что делает процесс поиска более надежным, а также решается проблема локального оптимального решения. В то же время вводятся несколько популяций для одновременного выполнения поиска оптимального решения, предлагается оператор иммиграции для увеличения разнообразия популяции частиц в итерации. Результаты испытаний показывают, что предложенный метод имеет более высокую стабильность для общих задач обратного решения кинематики робота и может значительно повысить как точность, так и скорость по сравнению с исходным алгоритмом PSO.

В [5] рассматривается аналитический метод решения, основанный на параметризации углов шарниров и описании кинематических взаимосвязей на основе метода Денавита-Хартенберга. В результате аналитического определения параметров локальных систем координат шарниров выполняется аналитическое определение углов поворота шарниров робота. Полученные аналитические решения включают преобразования от полярных систем координат к декартовым координатам, что делает их громоздкими и не удобными для практического применения, при этом не исключает использования численного решения методом Ньютона-Рафсона.

В [6] предложен численный метод решения задачи обратной кинематики для робота с несферическим кистевым шарниром. Основные кинематические уравнения получены в соответствии с методом Денавита-Хартенберга с последующим их решением численным методом Ньютона-Рафсона. Приведенные авторами параметры производительности и точности алгоритма свидетельствуют о его неэффективности.

В [7] предложен метод получения кинематических уравнений для робота с шестью степенями свободы. При использовании метода

Денавита-Хартенберга предложено разбить кинематическую схему робота на несколько подцепей с последующим их объединением на основе новых условий и соответствующих уравнений. Было проанализировано несколько методов разрезания манипулятора на подцепи с тремя степенями свободы с последующим их объединением. Предлагаемый в статье одномерный поиск не является оптимальным решением, т. к. при слишком большом шаге необходимое решение обратной кинематики будет упущено. При малом шаге время поиска будет увеличено.

В [8] предложен подход к численному решению задачи обратной кинематики, основанный на решении прямой задачи кинематики робота методом Денавита-Хартенберга и алгоритмах искусственного интеллекта (Soft computing), позволяющих избегать сингулярности. Предложенные методы с исследовательской точки зрения представляют интерес, однако практическое применение ограничено вследствие низкой производительности и точности решений.

В [9] авторы предлагают модифицированный алгоритм искусственной пчелиной колонии (ABC) для решения задачи обратной кинематики для манипулятора с пятью степенями свободы. Экспериментальные результаты показывают, что их алгоритм имеет среднеквадратичную ошибку на 60 % меньшую, чем стандартный ABC.

Однако, с одной стороны, такой подход позволяет получать адекватные решения за небольшое количество итераций, а также позволяет ввести ограничения на некоторые углы и положения. С другой стороны, многие алгоритмы оптимизации, особенно стохастические, не гарантируют достижения заданной точности за конечное число итераций. К тому же, многие алгоритмы требуют дискретного шага, что вносит дополнительные трудности: при малом шаге может слишком сильно расти вычислительная нагрузка, при большом шаге невозможно достичь высокой точности решения.

В рассмотренных работах авторы используют представление Денавита-Хартенберга, предполагающее последовательное перемножение матриц преобразования для перехода от базовой системы координат к системе координат исполнительного механизма, закрепленного на фланце робота. Такие аналитические решения приводят к появлению громоздких систем уравнений, не удобных для практического применения, а их численное решение становится малоэффективным.

## 2. Новый подход в решении обратной кинематики

Предлагается новый подход, позволяющий решать задачи прямой и обратной кинематики для роботов-манипуляторов. Подход заключается

в представлении кинематической схемы робота-манипулятора, обладающего шестью вращательными сочленениями, в виде векторной модели. В виду геометрических особенностей робота, первые 4 вектора совершают свои перемещения и повороты в одной плоскости. Таким образом, на основе векторного уравнения формировалась система нелинейных алгебраических уравнений, решаемая численным методом Ньютона, на каждой итерации которого решалась система линейных алгебраических уравнений методом Зейделя.

В рамках создания системы управления для решения прямой и обратной задачи кинематики предлагается измененный подход, в соответствии с которым на первом этапе составляется кинематическая схема робота с выявлением всех звеньев и сочленений (рис. 1).

Далее по кинематической схеме составляется система векторов в пространстве. Векторы имеют возможность поворачиваться в соответствии с кинематикой робота, при этом их длины фиксированы (рис. 2). Вектора  $p_{wrist}$  и  $p_{flange}$  явля-

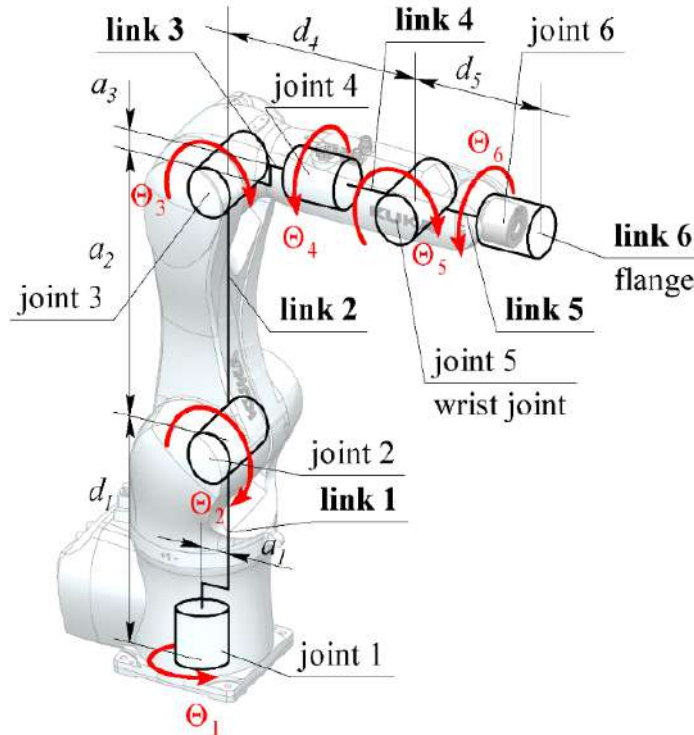


Рис. 1. Кинематическая схема робота KUKA KR6 R900

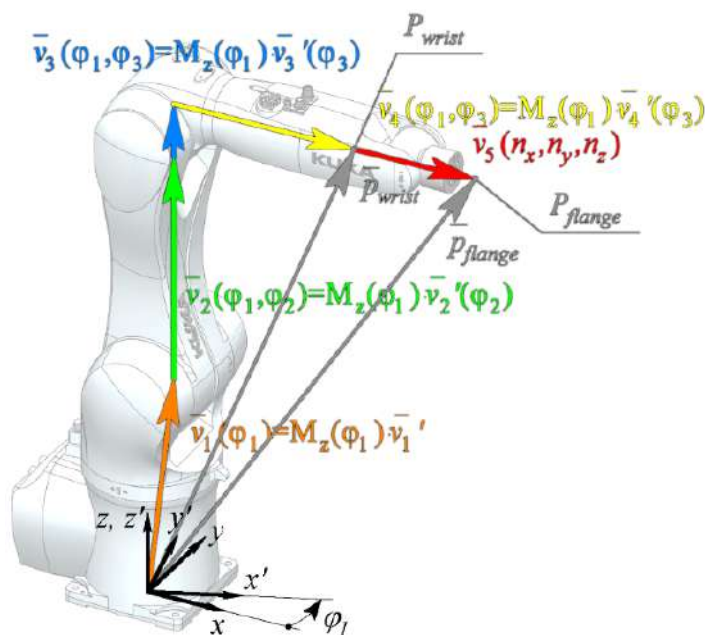


Рис. 2. Векторная модель робота в начальном положении

ются результирующими и определяют перемещение точки кистевого сустава и присоединительно-го фланца робота соответственно.

При решении задачи обратной кинематики для определения положения промежуточных звеньев робота сначала вычисляются координаты центра кистевого сустава, затем определяется значение угла поворота плоскости и решается система нелинейных алгебраических уравнений относительно углов наклона. И на заключительном этапе определяются углы поворота.

Для численного решения системы нелинейных алгебраических уравнений применяется метод Ньютона (метод касательных) [10], в котором на каждой итерации цикла производится замена нелинейной функции линейной и находится корень путем решения системы линейных алгебраических уравнений методом Зейделя [11].

Если для гарантированной сходимости метода Зейделя линейную систему можно привести к нормальной форме, то сходимость метода Ньютона зависит от начальных приближений.

Данный подход реализован в виде программы для имитационного моделирования работы роботов-манипуляторов, позволяющей визуализировать процесс перемещения и последовательность положений всех звеньев робота. Алгоритм был проверен на заданной в виде архимедовой спирали траектории, аппроксимированной прямыми отрезками. Результатом работы программы является набор точек, заданных в формате AXIS. В сравнении с распространенным методом Денавита-Хартенберга предложенный метод обладает на порядок меньшим количеством математических операций (52 против 790), что особенно актуально при создании адаптивных систем управления, работающих в режиме реального времени.

Таким образом, за счет малой вычислительной нагрузки использование предложенного подхода в системах управления позволяет снизить задержки при работе в режиме реального времени, учитывать большее количество роботов-манипуляторов, осуществлять контроль с более высокой точностью. Высокая точность позволит не только достигать исполнительным устройством точку назначения с меньшим отклонением, но и осуществ-

лять контроль положения всех сочленений манипуляторов при их работе.

При программировании совместной работы нескольких роботов необходимо иметь возможность смещения и переориентации базовой точки, а также контроля положения промежуточных звеньев в процессе движения для минимизации риска столкновения роботов.

### 3. Реализация программного обеспечения и цифровой ДВОЙНИК

На основе предложенного подхода удалось реализовать цифровой двойник реального времени, где построение траектории возложено на вычислительные мощности стороннего сервера. В отличие от классического метода управления по «жестко» заданной траектории удалось получить быстро адаптирующуюся систему с возможностью масштабирования на несколько роботов-манипуляторов. Это позволяет реализовать механизм коллаборативного управления в режиме реального времени роботом-манипулятором, использовать техническое зрение, сенсоры и датчики для адаптивного изменения траектории движения робота-манипулятора, будь то обход препятствия или уклонение от столкновения с другим движущимся роботом или даже компенсация смещения изделия при ручном позиционировании на рабочем столе.

На основе полученной математической модели и с учетом выбранных методов численного решения систем уравнения было разработано программное обеспечение с возможностью визуализации процесса движения робота.

### Заключение

Предложенный метод решения задачи обратной кинематики для роботов-манипуляторов обладает простотой реализацией и гарантированной сходимостью при нахождении решений, а в сравнении с распространенным методом Денавита-Хартенберга на порядок меньшим количеством математических операций, что особенно актуально при создании систем управления в режиме реального времени.

### Список литературы

- [1] Rayankula V., Pathak P., Junco S. Inverse kinematics of mobile manipulator using bidirectional particle swarm optimization by manipulator decoupling // Mechanism and Machine Theory. 2019. vol. 131. pp. 385–405. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.09.022.
- [2] Zhang T., Cheng Yo., Wu H., Yan Sh., Handroos H., Zheng L., Ji H., Pan P. Dynamic accuracy ant colony optimization of inverse kinematic (DAACOIK) analysis of multi-purpose deployer (MPD) for CFETR remote handling // Fusion Engineering and Design. 2020. vol. 156. P. 111522. doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111522.
- [3] Yiyang L., Xi J., Hongfei B., Zhining W., Liangliang S. A General Robot Inverse Kinematics Solution Method Based

- on Improved PSO Algorithm // IEEE Access. 2021. vol. 9. pp. 32341–32350. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059714.
- [4] World's Top 10 Industrial Robot Manufacturers [Электронный ресурс]. URL: <https://www.marketresearchreports.com/blog/2019/05/08/world%E2%80%99s-top-10-industrial-robot-manufacturers> (дата обращения: 01.03.2023).
- [5] Tong Yu., Liu J., Liu Yu., Yuan Yu. Analytical inverse kinematic computation for 7-DOF redundant sliding manipulators // Mechanism and Machine Theory. 2021. vol. 155. P. 104006. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104006.
- [6] Li J., Yu H., Shen N., Zhong Zh., Lu Yi., Fan J. A novel inverse kinematics method for 6-DOF robots with non-spherical wrist // Mechanism and Machine Theory. 2021. vol. 157. P. 104180. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104180.
- [7] Xiao F., Li G., Jiang D., Xie Yu., Yun J., Liu Yi., Huang L., Fang Z. An effective and unified method to derive the inverse kinematics formulas of general six-DOF manipulator with simple geometry // Mechanism and Machine Theory. 2021. vol. 159. P. 104265. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104265.
- [8] Lopez-Franco C., Hernandez-Barragan J., Alanis A. Y., Arana-Daniel N. A soft computing approach for inverse kinematics of robot manipulators // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2018. vol. 74. pp. 104–120.
- [9] El-Sherbiny A., Elhosseini M. A., Haikal A. Y. A new ABC variant for solving inverse kinematics problem in 5 DOF robot arm // Applied Soft Computing Journal. 2018. vol. 73. pp. 24–38.
- [10] Ryaben'kii V. S., Tsynkov S. V. A Theoretical Introduction to Numerical Analysis. New York : CRC Press, 2006. P. 243.
- [11] Sauer T. Numerical Analysis (2nd ed.). Pearson Education Inc., 2005. P. 109.
- [12] Pikalov I., Spirin E., Saramud M., Kubrikov M. Vector model for solving the inverse kinematics problem in the system of external adaptive control of robotic manipulators // Mechanism and Machine Theory. 2022. vol. 174. P. 104912. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104912.

## DIGITAL TWIN IN THE SYSTEM OF EXTERNAL ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS

**M. V. Kubrikov**

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology,  
Krasnoyarsk, Russian Federation*

*The article discusses the implementation of a digital twin in the system of adaptive control of robotic manipulators. The use of digital twins to plan, control and maintain the life cycle of production equipment forms the sustainable introduction of robotic systems into the technological processes of high-tech enterprises. The use of a digital twin in the collaboration of a robot system allows you to design more versatile workplaces and assembly lines, and optimize their workload. A new approach is proposed that allows solving problems of direct and inverse kinematics for robotic manipulators. The approach is to represent the kinematic diagram of a robotic arm with six rotational joints as a vector model. Due to the low computational load, the use of the proposed approach in control systems makes it possible to reduce delays when working in real time, with the ability to increase the number of robotic arms and control with higher accuracy.*

*Keywords: digital twin, production line, assembly, robotics, automation, production process.*

### References

- [1] Rayankula V., Pathak P., Junco S. Inverse kinematics of mobile manipulator using bidirectional particle swarm optimization by manipulator decoupling // Mechanism and Machine Theory, 2019, vol. 131, pp. 385–405. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2018.09.022.
- [2] Zhang T., Cheng Yo., Wu H., Yan Sh., Handroos H., Zheng L., Ji H., Pan P. Dynamic accuracy ant colony optimization of inverse kinematic (DAACOIK) analysis of multi-purpose deployer (MPD) for CFETR remote handling // Fusion Engineering and Design, 2020, vol. 156, P. 111522. doi: 10.1016/j.fusengdes.2020.111522.
- [3] Yiyang L., Xi J., Hongfei B., Zhining W., Liangliang S. A General Robot Inverse Kinematics Solution Method Based on Improved PSO Algorithm // IEEE Access, 2021, vol. 9, pp. 32341–32350. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3059714.

- [4] World's Top 10 Industrial Robot Manufacturers. Available at: <https://www.marketresearchreports.com/blog/2019/05/08/world%E2%80%99s-top-10-industrial-robot-manufacturers> (accessed 01.03.2023).
- [5] Tong Yu., Liu J., Liu Yu., Yuan Yu. Analytical inverse kinematic computation for 7-DOF redundant sliding manipulators // Mechanism and Machine Theory, 2021, vol. 155, P. 104006. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104006.
- [6] Li J., Yu H., Shen N., Zhong Zh., Lu Yi., Fan J. A novel inverse kinematics method for 6-DOF robots with non-spherical wrist // Mechanism and Machine Theory, 2021, vol. 157, P. 104180. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2020.104180.
- [7] Xiao F., Li G., Jiang D., Xie Yu., Yun J., Liu Yi., Huang L., Fang Z. An effective and unified method to derive the inverse kinematics formulas of general six-DOF manipulator with simple geometry // Mechanism and Machine Theory, 2021, vol. 159, P. 104265. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2021.104265.
- [8] Lopez-Franco C., Hernandez-Barragan J., Alanis A. Y., Arana-Daniel N. A soft computing approach for inverse kinematics of robot manipulators // Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018, vol. 74, pp. 104–120.
- [9] El-Sherbiny A., Elhosseini M. A., Haikal A. Y. A new ABC variant for solving inverse kinematics problem in 5 DOF robot arm // Applied Soft Computing Journal, 2018, vol. 73, pp. 24–38.
- [10] Ryaben'kii V. S., Tsynkov S. V. A Theoretical Introduction to Numerical Analysis. New York : CRC Press, 2006, P. 243.
- [11] Sauer T. Numerical Analysis (2nd ed.). Pearson Education Inc., 2005, P. 109.
- [12] Pikalov I., Spirin E., Saramud M., Kubrikov M. Vector model for solving the inverse kinematics problem in the system of external adaptive control of robotic manipulators // Mechanism and Machine Theory, 2022, vol. 174, P. 104912. doi: 10.1016/j.mechmachtheory.2022.104912.

## Сведения об авторах

*Кубриков Максим Викторович* – кандидат технических наук, доцент, директор института космической техники Сибирского государственного университета науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. Окончил Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева в 2007 году. Область научных интересов: космическая техника, робототехника, оптимизация производственных процессов, цифровой двойник.

ORCID: 0000-0003-0282-0291



## **Требования к оформлению статей для опубликования в журнале «Космические аппараты и технологии»**

*Редакция принимает в журнал статьи, соответствующие следующим темам:*

- ◀ ракетно-космическая техника
- ◀ новые материалы и технологии в космической технике
- ◀ космическое приборостроение
- ◀ космические услуги
- ◀ инновации космической отрасли

*Статья должна быть подготовлена в формате «Документ Word 97–2003» и направлена на электронную почту редакции [spacecrafts.technologies@yandex.ru](mailto:spacecrafts.technologies@yandex.ru).*

Вместе со статьей необходимо предоставить акт экспертного заключения с печатью и заключение комиссии экспортного контроля (КЭК) о возможности опубликования или, в случае отсутствия КЭК в организации, письмо за подписью руководителя организации с печатью, что данные сведения не подлежат экспортному контролю.

После принятия материалов авторам будет выслан лицензионный договор и акт на право использования редакцией научной статьи при размещении в журнале и электронных базах данных.

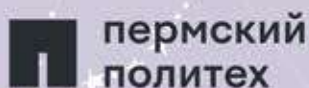
Подписанный лицензионный договор и акт, а также оригиналы акта экспертного заключения и заключения КЭК должны быть высланы почтой на адрес редакции: 662972, а/я 57, Красноярский край, г. Железногорск. Ассоциация «ТП «НИСС».

При подготовке статьи авторы должны следовать этическим принципам, принятым в научном сообществе и редакцией журнала.

Авторы должны руководствоваться приведенными ниже правилами. Статьи, оформленные без соблюдения этих правил, могут быть возвращены авторам на доработку.

*Требования к составу и расположению элементов оформления научной статьи:*

- ◀ Индекс УДК располагают отдельной строкой слева.
- ◀ На следующей строке размещается заголовок, который центрируют и набирают строчными буквами (как в предложении, начиная с прописной). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, начертание – полужирное. Перенос слов в заголовке недопустим.
- ◀ Под заголовком по центру указываются фамилия и инициалы автора(ов). Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Под ФИО автора(ов) по центру указываются: полное название учреждения (место работы), в котором выполнена работа (в именительном падеже), затем город (населенный пункт), область (край), страна. Шрифт Times New Roman, 14 кегль, по центру, полуторный интервал.
- ◀ Аннотация к статье. Объем аннотации: 150–180 слов.
- ◀ Ключевые слова (4–7 слов или словосочетаний).
- ◀ Пристатейный список литературы, оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.05-2008. Рекомендуется использование не менее 15 (минимум 10) источников не старше 15 лет.
- ◀ Следом необходимо привести заголовок, ФИО автора(ов), организацию, аннотацию, ключевые слова и список литературы на английском языке.
- ◀ В конце документа необходимо привести сведения о каждом авторе (должность и место работы, научные степень и звание, что и когда окончил, область научных интересов, идентификатор ORCID).



РОСКОСМОС



СибГУ им. М.Ф. Решетнева

# СОЗВЕЗДИЕ РОСКОСМОСА



САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
SAMARA UNIVERSITY



Национальный исследовательский  
Томский государственный  
университет



Национальный исследовательский  
Центр информационной безопасности