



ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

2021 Том 22 № 2
DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Научный журнал
Издается с 2000 г.

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-61174 от 30.03.2015 г.
Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Заместитель главного редактора

Резник Сергей Васильевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-13 «Ракетно-космические композитные конструкции» факультета «Специальное машиностроение», Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Ответственный секретарь

Агасиева Светлана Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Члены редакционной коллегии

Агравал Бридж – профессор, Военно-морская школа, Монтерей, США

Алифанов Олег Михайлович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Варатараджу Ренугант – профессор, Университет Путра Малайзия, Серданг, Малайзия

Василе Массимилиано Л. – профессор, Университет Стратклайда, Глазго, Великобритания

Вивiani Антонио – профессор, Университет Кампани «Луиджи Ванвители», Неаполь, Италия

Гасбарри Паоло – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Герман Анна – профессор, Университет Бейра Интериор, Ковильян, Португалия

Гитас Иоаннис Зоис – профессор, Университет Аристотеля в Салониках, Салоники, Греция

Грациани Филиппо – почетный профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Гурфил Пини – профессор, Израильский технологический институт, Хайфа, Израиль

Джа Мориба – доцент, Техасский университет в Остине, Остин, США

Джента Джанкарло – профессор, Туринский политехнический институт, Турин, Италия

Кавагути Дзюньитиро – профессор, Японское агентство аэрокосмических исследований, Токио, Япония

Калугин Владимир Тимофеевич – доктор технических наук, профессор, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Капустин Владимир Михайлович – доктор технических наук, профессор, Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Кузнецов Николай Борисович – профессор, Геологический институт РАН, Москва, Россия

Линарес Ричард – профессор, Массачусетский технологический институт, Кембридж, США

Матюшин Максим Михайлович – доктор технических наук, Центр управления полетами АО «ЦНИИмаш» ГК «Роскосмос», Королев, Россия

Медведев Андрей Всеволодович – доктор физико-математических наук, член-корреспондент СО РАН, Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

Мисра Арун – профессор, Университет Макгилла, Монреаль, Канада

Мортари Даниэле – профессор, Техасский университет A&M, Колледж-Стейшн, США

Мохаммед Сейду О. – профессор, Национальное агентство по космическим исследованиям и развитию, Абуджа, Нигерия

Палмерини Джованни – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Петухов Вячеслав Георгиевич – доктор технических наук, член-корреспондент РАН, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Попков Юрий Соломонович – академик РАН, доктор технических наук, профессор, Институт системного анализа

ФИЦ «Информатика и управление» РАН, Москва, Россия

Попов Гарри Алексеевич – академик РАН, доктор технических наук, профессор, директор Научно-исследовательского института прикладной механики и электродинамики, Москва, Россия

Прадо Антонио – профессор, Национальный институт космических исследований, Сан-Жозе-дус-Кампус, Бразилия

Редько Иван Яковлевич – доктор технических наук, профессор, АО «Энергетический институт имени Г.М. Кржижановского», Москва, Россия

Спенсер В. Дэвид – профессор, Университет штата Пенсильвания, Юниверсити-Парк, США

Фурфаро Роберто – профессор, Университет Аризоны, Тусон, США

Челани Фабио – профессор, Римский университет «Ла Сапиенца», Рим, Италия

Челетти Алессандра – профессор, Римский университет «Тор Вергата», Рим, Италия

Черн Рок Ченг-Шинг – профессор, Университет Райерсона, Торонто, Канада

Ясака Тэцуо – почетный профессор, Университет Кюсю, Фукуока, Япония

**ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДРУЖБЫ НАРОДОВ.
СЕРИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Периодичность 4 выпуска в год.

Сайт журнала: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (открытый доступ).

Языки: русский, английский.

Журнал индексируют: РИНЦ, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

Цель и тематика

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» – периодическое международное рецензируемое научное издание в области информатики, вычислительной техники и управления, авиационной и ракетно-космической техники, наук о земле. Журнал является международным по составу редакционной коллегии, авторам и тематике публикаций. В журнале публикуются результаты оригинальных научных исследований российских и зарубежных ученых.

Цели журнала:

- содействие развитию российских и зарубежных инженерных школ;
- продвижение и внедрение в практику современных перспективных разработок в указанных областях;
- научный обмен и сотрудничество между учеными.

Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам. Включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий ВАК при Минобрнауки России.

Выпуски журнала в полнотекстовом виде, правила оформления статей и дополнительная информация размещены на сайте <http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Редактор *И.Л. Панкратова*
Компьютерная верстка *М.В. Роговой*

Адрес редакции:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Адрес редакционной коллегии журнала «Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования»:

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Подписано в печать 25.06.2021. Выход в свет 30.06.2021. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times».

Усл. печ. л. 13,72. Тираж 500 экз. Заказ № 186. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

«Российский университет дружбы народов»

Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Отпечатано в типографии ИПК РУДН

Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3

Тел.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES

2021 Volume 22 Number 2

DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2

<http://journals.rudn.ru/engineering-researches>

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia

Editor-in-Chief

Yury N. Razumny – Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Associate Editor-in-Chief

Sergey V. Reznik – Professor, Head of the Department SM-13 “Composite Materials for Aerospace” of the Special Machinery Faculty, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Assistant to the Editor-in-Chief

Svetlana V. Agasieva – Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering of the Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Editorial Board

Brij Agrawal – Professor, Naval Postgraduate School, Monterey, USA

Oleg M. Alifanov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Fabio Celani – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Alessandra Celletti – Professor, Tor Vergata University of Rome, Rome, Italia

Rock Jeng-Shing Chern – Professor, Ryerson University, Toronto, Canada

Roberto Furfaro – Professor, University of Arizona, Tucson, USA

Paolo Gasbarri – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Giancarlo Genta – Professor, Polytechnic University of Turin, Turin, Italia

Ioannis Zois Gitas – Professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

Filippo Graziani – Full Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Anna Guerman – Professor, University of Beira Interior, Covilhã, Portugal

Pini Gurfil – Full Professor, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel

Moriba Jah – Associate Professor, University of Texas at Austin, Austin, USA

Vladimir T. Kalugin – Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Vladimir M. Kapustin – Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow, Russia

Junichiro Kawaguchi – Professor, Japan Aerospace Exploration Agency, Tokyo, Japan

Nikolay B. Kuznetsov – Professor, Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Richard Linares – Professor, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA

Maxim M. Matyushin – Dr. (Technical Sciences), JSC “Central Research Institute for Machine Building” (JSC “TsNIMash”), Korolev, Russia

Andrey V. Medvedev – Dr. (Physical and Mathematical Sciences), corresponding member of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia

Arun Misra – Professor, McGill University, Montreal, Canada

Seidu O. Mohammed – Professor, National Space Research and Development Agency, Abuja, Nigeria

Daniele Mortari – Professor, Texas A&M University, College Station, USA

Giovanni Palmerini – Professor, Sapienza University of Rome, Rome, Italia

Vyacheslav G. Petukhov – Dr. (Technical Sciences), corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Yury S. Popkov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Professor, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Harri A. Popov – member of the Russian Academy of Sciences, Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute, Moscow, Russia

Antonio Prado – Professor, National Institute for Space Research, Sao Jose dos Campos, Brazil

Ivan Y. Redko – Professor, JSC “Khrzhizhanovsky Energy Institute”, Moscow, Russia

David B. Spencer – Professor, Pennsylvania State University, University Park, USA

Renuganth Varatharajoo – Professor, University Putra Malaysia, Seri Kembangan, Malaysia

Massimiliano L. Vatile – Professor, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

Antonio Viviani – Professor, University of Campania Luigi Vanvitelli, Naples, Italy

Tetsuo Yasaka – Professor Emeritus, Kyushu University, Fukuoka, Japan

RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCHES
Published by the Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University)

ISSN 2312-8143 (Print); ISSN 2312-8151 (Online)

Published 4 times a year.

Journal homepage: <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> (Open Access).

Languages: Russian, English.

Indexed by Russian Index of Science Citation, DOAJ, Ulrich's Periodicals Directory, Cyberleninka, Google Scholar, WorldCat, East View, Dimensions, EBSCOhost.

Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Researches – is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of computer science, computer engineering and control, aviation and space technology, earth sciences. The journal is international in terms of the composition of the editorial board, authors and topics of publications. The journal publishes the results of original scientific research by Russian and foreign scientists.

The aims of the journal:

- assistance in the development of Russian and foreign engineering schools;
- promotion and implementation into practice of modern advanced technologies in these areas;
- scientific exchange and collaboration between scientists.

The journal is addressed to researchers, engineers, graduate students. Included in the List of the Leading Scientific Journals and Editions of the Highest Certification Committee of the Ministry of Education and Science of Russian Federation in which the basic results of PhD and Doctoral theses are to be published.

The journal website operates on the Portal of RUDN University scientific journals <http://journals.rudn.ru/engineering-researches> and contains full information about the journal, editorial policy and ethics, requirements for the preparation and publication of the articles, as well as full-text issues of the journal since 2008 (Open Access).

Copy Editor *I.L. Pankratova*
Layout Designer *M.V. Rogova*

Address of the editorial board:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-16; e-mail: publishing@rudn.ru

Address of the editorial board of RUDN Journal of Engineering Researches:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-07-92; e-mail: engj@rudn.ru

Printing run 500 copies. Open price.

Peoples' Friendship University of Russia
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 952-04-41; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Дивеев А.И., Мендес Флорес Н.Х. Синтез системы пространственной стабилизации мобильного робота на основе обучения методом символьной регрессии	129
Розин П.Е., Смольянинов Ю.А. Оценка влияния текущих метеопрогнозов в задаче планирования космической съемки.....	139
Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей	148
Михеенко И.С., Смелик А.А., Егоров С.А., Черняк В.В. Анализ влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя при точении композиционного материала на основе терморасширенного графита.....	162
Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В., Тришин А.А. Методика создания программно-математического обеспечения для отработки проведения динамических операций космических аппаратов.....	172
Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Теоретическое обоснование новых особенностей работы подшипников качения в условиях комбинированного нагружения.....	184
Смирнов С.В., Макаров А.Р., Заев И.А., Худайбергенова Г.Т. Исследование эффективности использования цикла Миллера в двигателях внутреннего сгорания	196
Unitsky A.E., Bochkaryov D.I., Artyushevsky S.V. Development of the structure, survey and design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle (Разработка конструкции, изыскания и проектирование экваториальной эстакады общепланетарного транспортного средства)	205
Иванов К.А., Камардина Н.В., Данилов И.К., Коноплев В.Н. Метод биоконтроля усталости водителя транспортного средства.....	217
Рассказов А.А., Горбатов Е.С., Котельников А.Е. Особенности формирования лимногенных полезных ископаемых.....	225
Панасенко Ю.М., Марков В.Е., Карелина Е.В. Построение карты геохимических аномалий по предсказанному значению золота на Лидинском рудном поле острова Уруп	234

CONTENTS

Diveev A.I., Mendez Florez N.J. Synthesis of a mobile robot spatial stabilization system based on machine learning control by symbolic regression	129
Rozin P.E., Smolyaninov Yu.A. Assessment of the impact of current weather forecasts in the task of space survey planning	139
Starkov A.V., Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zhukovskaya K.I., Morozov A.A., Trishin A.A. Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 2. Interrelated mathematical models systems formation	148
Mikheenko I.S., Smelik A.A., Yegorov S.A., Chernyak V.V. Analysis of the influence of cutting conditions on the roughness of the surface layer when machining a composite material based on thermally expanded graphite.....	162
Malyshev V.V., Starkov A.V., Fedorov A.V., Trishin A.A. Methodology for creating software and mathematical support for modeling the spacecraft dynamic operations	172
Kirilovskiy V.V., Belousov Yu.V. Theoretical substantiation of new features of rolling bearings operation under combined loading conditions	184
Smirnov S.V., Makarov A.R., Zaev I.A., Khudaibergenova G.T. Research of the efficiency of using the Miller cycle of an internal combustion engine.....	196
Unitsky A.E., Bochkaryov D.I., Artyushevsky S.V. Development of the structure, survey and design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle.....	205
Ivanov K.A., Kamardina N.V., Danilov I.K., Konoplev V.N. Method of biocontrol of vehicle driver fatigue	217
Rasskazov A.A., Gorbatov E.S., Kotelnikov A.E. Features of formation of lacustrine mineral resources.....	225
Panasenko Yu.M., Markov V.E., Karelina E.V. Construction a map geochemical anomalies for the predicted value of gold in the Lidin ore field Urup Island.....	234



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-129-138

УДК 62-50:519.7

Научная статья / Research article

Синтез системы пространственной стабилизации мобильного робота на основе обучения методом символьной регрессии

А.И. Дивеев^а✉, Н.Х. Мендес Флорес^б

^аФедеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,
Российская Федерация, 119333, Москва, ул. Вавилова, д. 44/2

^бРоссийский университет дружбы народов,
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

✉ E-mail: aidiveev@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 25 января 2021 г.

Доработана: 11 марта 2021 г.

Принята к публикации: 24 апреля 2021 г.

Аннотация. Рассматривается задача синтеза системы пространственной стабилизации робота. Приведен исторический обзор методов и подходов решения задачи синтеза управления. Показано, что задача синтеза системы управления является важнейшей задачей в области управления, для которой не существует универсальных численных методов ее решения. В качестве одного из путей решения данной проблемы предложено использовать методы машинного обучения на основе применения современных методов символьной регрессии. Для автоматического решения задачи предлагается использовать обучение системы управления методами символьной регрессии. Это позволяет построить универсальные алгоритмы решения задач синтеза управления. Рассмотрено несколько наиболее перспективных для применения в задачах управления методов символьной регрессии. Приведена формальная постановка задачи синтеза управления для ее численного решения. Приведены примеры решения задач синтеза системы пространственной стабилизации мобильного робота методом сетевого оператора и вариационного декартова генетического программирования. В задаче требовалось найти одну нелинейную функцию обратной связи, чтобы переместить робот из тридцати начальных условий в одну терминальную точку. Представлены результаты моделирования, полученные методами символьной регрессии систем управления.

Ключевые слова: синтез управления, машинное обучение управления, символьная регрессия

Для цитирования

Дивеев А.И., Мендес Флорес Н.Х. Синтез системы пространственной стабилизации мобильного робота на основе обучения методом символьной регрессии // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 129–138. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-129-138

© Дивеев А.И., Мендес Флорес Н.Х., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Synthesis of a mobile robot spatial stabilization system based on machine learning control by symbolic regression

Askhat I. Diveev^a✉, Neder Jair Mendez Florez^b

^aFederal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences,
44/2 Vavilova St, Moscow, 119333, Russian Federation

^bPeoples’ Friendship University of Russia (RUDN University),
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

✉ E-mail: aidiveev@mail.ru

Article history

Received: January 25, 2021

Revised: March 11, 2021

Accepted: April 24, 2021

Abstract. The spatial stabilization system synthesis problem of the robot is considered. The historical overview of methods and approaches for solving the problem of control synthesis is given. It is shown that the control synthesis problem is the most important task in the field of control, for which there are no universal numerical methods for solving it. As one of the ways to solve this problem, it is proposed to use the method of machine learning based on the application of modern symbolic regression methods. This allows you to build universal algorithms for solving control synthesis problems. Several most promising symbolic regression methods are considered for application in control tasks. The formal statement of the control synthesis problem for its numerical solution is given. Examples of solving problems of synthesis of system of spatial stabilization of mobile robot by method of network operator and variation Cartesian genetic programming are given. The problem required finding one nonlinear feedback function to move the robot from thirty initial conditions to one terminal point. Mathematical records of the obtained control functions are given. Results of simulation of control systems obtained by symbolic regression methods are given.

Keywords: synthesis of control, machine learning control, symbolic regression

For citation

Diveev AI, Mendez Florez NJ. Synthesis of a mobile robot spatial stabilization system based on machine learning control by symbolic regression. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):129–138. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-129-138

Введение

Синтез системы управления — важнейшая задача в области теории управления. Ее математическая постановка не имеет сегодня никаких общих аналитических или численных методов решения. В результате решения этой задачи получаем математическое выражение для функции управления. Реализация этой функции на бортовом процессоре объекта управления представляет собой блок управления в обратной связи, который по сигналам с датчиков, определяющих состояние объекта управления, вырабатывает управляющие воздействия на объект управления с целью решения поставленной перед объектом задачи. Все

остальные задачи управления, а именно: оптимального управления, идентификации, фильтрации, навигации и т.п. — являются в общем случае подзадачами задачи синтеза управления.

На заре создания теории управления в шестидесятые годы прошлого столетия при исследовании математической постановки задачи оптимального управления Р. Беллманом была сформулирована задача синтеза управления и выведено уравнение Беллмана [1]. Уравнение представляет собой уравнение в частных производных. Решением этого уравнения является функция Беллмана, одним из аргументов, которой является вектор управления. Нахождение управления, обеспечивающего максимум функции

Беллмана, является решением задачи синтеза. Заметим, что уравнения в частных производных намного сложнее обыкновенных дифференциальных уравнений и в общем случае практически никогда не имеют общего решения. Беллманом была предложена численная процедура нахождения решения в виде метода динамического программирования [2; 3]. В результате применения этой процедуры для огромного количества численных значений векторов состояний получаем огромное количество векторов управлений, при этом не получаем никакой аналитической зависимости управления от состояния.

Другие попытки решать уравнение Беллмана заключаются в том, чтобы найти особые случаи и для них получить аналитическую формулу для функции Беллмана. К таким случаям относятся линейные системы управления с квадратичным функционалом качества. Предложено в этом случае искать управление в виде линейной зависимости от вектора координат пространства состояний. Далее было доказано, что такое представление является оптимальным решением. Метод получил название АКОР (аналитическое конструирование оптимальных регуляторов) [4]. Метод работает только для узкого класса задач.

В то же время было решено полностью несколько задач синтеза управления на основе принципа максимума Понтрягина [5]. Это удалось сделать, так как были выбраны несложные модели объектов управления, в основном второго порядка, и были найдены общие решения для дифференциальных уравнений объекта управления и сопряженных переменных. При этом решалась задача быстродействия. Далее на основе построенных решений из разных начальных условий были определены точки переключения управления. Этот подход не является универсальным, но при применении этого подхода В.Г. Болтянским [6] была сформулирована задача общего синтеза управления, которая является актуальной математической задачей до настоящего времени.

Наиболее известным аналитическим методом решения задачи синтеза управления является метод Backstepping integrator, который не имеет в русском языке эквивалентного перевода, иногда его называют «обратный шаг интегратора», что не совсем соответствует английскому названию и поэтому оно не утвердилось среди российских специалистов в области

управления. Метод был разработан в 1992 г. Петаром Кокотовичем [7]. Суть этого метода заключается в том, чтобы на основе анализа правых частей дифференциальных уравнений включить в функцию управления некоторые нелинейности, чтобы компенсировать их и получить для замкнутой системы управления знакопостоянную функцию Ляпунова, например с четными степенями компонент вектора состояний, причем с одним и тем же знаком. Метод реализуется вручную исследователем, зависит от модели объекта управления и особенно хорошо работает для каскадных систем, в которых одни координаты вектора состояния являются управлением для других координат, например, некоторые воздушные летательные аппараты угловым положением управляют пространственным перемещением. Применение этого метода эффективно для систем невысокого порядка.

В русскоязычной литературе популярен метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), разработанный на рубеже веков Колесниковым А.А. старшим [8], профессором Таганрогского радиотехнического института. Метод состоит в том, что вводятся агрегированные переменные, которые описывают цель управления, например, терминальное состояние. Эти переменные вводятся в функционал и далее, при составлении уравнения Беллмана, по ним берется производная по времени. При аналитическом вычислении производных в агрегированные переменные попадают правые части модели объекта управления. Таким образом, агрегированные переменные начинают зависеть от вектора управления. Далее получаем систему нелинейных уравнений, количество которых практически всегда равно размерности вектора состояний. В эти уравнения входит вектор управления. Разрешив эти уравнения относительно вектора управления, получаем функцию управления как функцию координат пространства состояний. Существует несколько научных работ, показывающих, что метод АКАР эффективнее бэкстеппинга (backstepping). Заметим, что, во-первых, вектор управления, как правило, имеет размерность меньше, чем вектор состояния, поэтому у системы нелинейных уравнений много решений относительно управления. Во-вторых, нет строгого доказательства оптимальности полученных решений. В основном это работает только для терминальных задач. В-третьих, как и бэкстеппинг,

это ручной метод, который не поддается машинной автоматизации.

Сегодня задачу синтеза управления решают специалисты вручную. Они по модели определяют каналы управления, т.е. определяют, какие компоненты вектора управления влияют на компоненты вектора состояния. Далее в эти каналы вставляются регуляторы, чаще всего ПИД-регулятор или какой-либо другой регулятор, даже возможно нелинейный. Затем с помощью вычислительной машины находят параметры этих регуляторов. Этот метод называется техническим. С помощью этого метода построены сложные системы управления ракетами, самолетами и другими сложными объектами. В настоящий период этот метод применяется и для роботов, но это направление абсолютно бесперспективно.

Ранее системы автоматического управления использовались только в ракетах и автопилотах самолетов и подводных лодок. Сейчас появились роботы, причем количество этих роботов с учетом аддитивных технологий с каждым годом нарастает катастрофически, и применение технических методов создания систем автоматического управления для них является основным препятствием развития и внедрения. Написать вручную программу системы управления для роботов становится крайне сложной задачей. Например, сколько операторов будет содержать программа управления роботом, который имитирует действия мухи? Муха управляет сложным движением крыльев, которое позволяет ей висеть неподвижно в воздухе, она может двигаться по вертикальной поверхности и даже с отрицательным наклоном. Далее муха видит опасности и совершает сложные движения чтобы не быть пойманной. При этом как обычное животное она ищет корм и возможность размножения. При несложной, самой оптимистической оценке система управления таким объектом должна содержать более миллиона операторов программирования. Наверное, написание такой программы возможно крупным коллективом программистов. Но здесь, и при создании еще более сложных систем управления очевидна необходимость автоматизации процесса синтеза системы управления.

В конце XX в. в Стэнфордском университете ученик Джона Холланда, автора генетического алгоритма, профессор Джон Коза разработал метод генетического программирования [9]. Этот метод был предназначен для

решения задачи автоматического написания программ. Суть этого метода заключалась в том, что программа записывалась в универсальной форме в виде последовательности префиксных операторов. Любое действие программы описывалось в виде оператора и следующих за ним операндов, среди которых могли быть другие операторы. В результате вся программа схематически изображалась в виде дерева. Для поиска нужного дерева Дж. Коза применил генетический алгоритм. Для этого он изменил основную операцию генетического алгоритма, операцию скрещивания. В генетическом программировании скрещивание происходит в виде обмена поддеревьев, что совсем не соответствует скрещиванию генов живых организмов.

Очевидно, что если машина может писать программу, то она может и искать математическое выражение для формулы. С начала 2000-х гг. эта технология развивается для решения задачи синтеза управления [10; 11]. Метод генетического программирования обладает определенными недостатками, среди которых, например, разные коды деревьев имеют разную длину, при этом эти длины меняются после операции скрещивания. Сегодня существует более десяти подобных методов [12], которые называются методами символьной регрессии и в отличие от метода генетического программирования не имеют этих вычислительных недостатков. Суть работы всех методов состоит в том, что определенным методом кодируются возможные решения, в случае задачи синтеза это математические выражения для функции управления. Затем разрабатывается операция скрещивания для кодов и применяется генетический алгоритм с этой операцией скрещивания для поиска оптимального математического выражения на пространстве кодов. В 2017 г. появилась монография [13], в которой авторы, по их мнению, впервые, естественно без ссылок на российских ученых, которые применяют эти методы более десяти лет, предложили использовать метод генетического программирования для синтеза управления, назвав его методом машинного обучения управления. Кстати, в монографии не приведено ни одного примера решения задачи синтеза методом генетического программирования, но авторы были так вдохновлены открытием, что тут же выложили в открытом доступе курс по машинному обучению управления из сорока одной лекции для неподготовленных слушателей.

В настоящей работе показано применение методов символьной регрессии, в частности метода сетевого оператора и метода вариационного декартова генетического программирования для решения задачи синтеза системы стабилизации мобильным роботом.

1. Общая задача синтеза управления

В задаче по математической модели объекта управления, заданным ограничениям на управление, заданному множеству начальных условий, заданным терминальным условиям, заданному критерию качества в виде интегрального функционала, необходимо найти функцию управления, аргументами которой являются компоненты вектора состояния объекта управления. Если функцию подставить в правые части дифференциальных уравнений, то любое частное решение полученной системы уравнений из начального условия из заданной области начальных условий достигнет заданного терминального состояния с оптимальным значением критерия качества.

Приведем математическую формулировку общей задачи синтеза управления.

Задана математическая модель объекта управления

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где \mathbf{X} — вектор состояния объекта управления;

$\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$; \mathbf{u} — вектор управления, $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m$; U —

компактное множество, $m \leq n$.

Задана область начальных значений

$$X_0 \subseteq \mathbb{R}^n. \quad (2)$$

Заданы терминальные условия

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f, \quad (3)$$

где t_f — время достижения терминальных условий, не задано, но ограничено.

Задан критерий качества

$$J = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{u} \in U} \quad (4)$$

Необходимо найти управление в форме

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \in U. \quad (5)$$

Если подставить найденную функцию управления (5) в математическую модель объекта (1), то полученная система дифференциальных уравнений

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x})) \quad (6)$$

будет иметь частное решение $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$ из любого начального состояния из области (2) $\mathbf{x}^0 \in X_0$, которое достигнет терминального условия (3)

$$\mathbf{x}(t_f, \mathbf{x}^0) = \mathbf{x}^f, \quad (7)$$

с оптимальным значением критерия качества (4)

$$J(\mathbf{h}(\mathbf{x})) = \int_0^{t_f} f_0(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0), \mathbf{h}(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0))) dt = \min_{\mathbf{h}(\mathbf{x}) \in U} \quad (8)$$

Для решения задачи используем численные методы символьной регрессии [12]. Методы кодируют математическое выражение в форме специального кода и осуществляют поиск специальным генетическим алгоритмом на пространстве кодов.

Очевидно, что при машинном поиске решения проверить всю непрерывную область начальных условий (2) невозможно, поэтому заменяем ее на конечное множество точек начальных условий.

$$X_0 = \{\mathbf{x}^{0,1}, \dots, \mathbf{x}^{0,K}\} \subseteq \mathbb{R}^n. \quad (9)$$

При численном решении точность попадания в терминальные условия (3) является дополнительным критерием качества, поэтому включим его в критерий качества (4) с весовым коэффициентом. В результате критерий качества для численного решения методом символьной регрессии имеет следующий вид:

$$J_1 = \sum_{i=1}^K \left(\int_0^{t_{f,i}} f_0(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i}), \mathbf{h}(\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^{0,i}))) dt + p_1 \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j(t, \mathbf{x}^{0,i}) - x_j^f)^2} \right) \rightarrow \min_{\mathbf{h}(\mathbf{x}) \in U} \quad (10)$$

где p_1 — весовой коэффициент,

$$t_{f,i} = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \sqrt{\sum_{j=1}^n (x_j(t, \mathbf{x}^{0,i}) - x_j^f)^2} \leq \varepsilon \\ t^+ & - \text{ иначе} \end{cases}, \quad (11)$$

ε и t^+ — заданные положительные, величины.

2. Методы символьной регрессии

Численные методы символьной регрессии позволяют решать задачи синтеза управления. Поиск решения осуществляется на пространстве кодов специальным генетическим алгоритмом. Приведем краткие описание наиболее эффективных методов символьной регрессии для решения задачи синтеза управления, метода сетевого оператора и метода вариационного декартова генетического программирования. Более подробно с этими и другими методами символьной регрессии можно ознакомиться в монографии [12].

2.1. Метод сетевого оператора

Метод сетевого оператора кодирует математическое выражение в виде ориентированного графа [14]. Метод использует только функции с одним и двумя аргументами, причем функции с двумя аргументами должны быть ассоциативны, коммутативны и иметь единичный элемент. В ориентированном графе функции с одним аргументом связаны с дугами графа, функции с двумя аргументами связаны с узлами графа, аргументы математического выражения связаны с узлами источниками графа.

Рассмотрим пример кодирования. Пусть задано математическое выражение

$$y = q_1 \sin(\cos(q_2 x_1) + \exp(-q_2 x_2)), \quad (12)$$

где q_1, q_2 — постоянные параметры математического выражения, которые также ищутся вместе со структурой формулы, x_1, x_2 — переменные.

Для кодирования математического выражения зададим следующие множества:

– множество аргументов математического выражения

$$F_0 = \{x_1, x_2, q_1, q_2\}, \quad (13)$$

– множество функций с одним аргументом

$$F_1 = \{f_{1,1}(z) = z, f_{1,2}(z) = -z, f_{1,3}(z) =$$

$$= \sin(z), f_{1,4}(z) = \cos(z), f_{1,5}(z) = \exp(z)\}, \quad (14)$$

– множество функций с двумя аргументами

$$F_2 = \{f_{2,1}(z_1, z_2) = z_1 +$$

$$+ z_2, f_{2,2}(z_1, z_2) = z_1 z_2\}. \quad (15)$$

В индексах обозначения функций первым индексом указывается число аргументов, вторым индексом — номер функции.

Ориентированный граф сетевого оператора для данного математического выражения приведен на рис. 1.

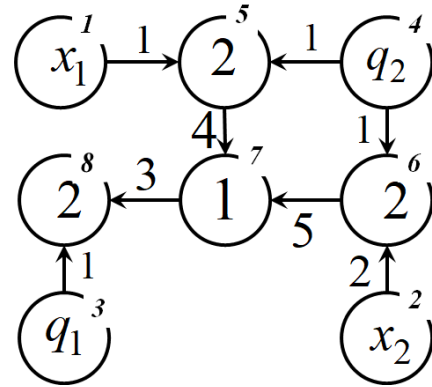


Рис. 1. Граф сетевого оператора математического выражения
Figure 1. Graph of the network operator for a mathematical expression

На графе цифры в узлах графа обозначают номер функции с двумя аргументами, цифры возле дуг графа указывают на номер функции с одним аргументом, цифры в верхних частях узлов графа — это номер узла. Если пронумеровать граф так, чтобы номер узла, откуда дуга выходит, был меньше номера узла, куда дуга входит, а это всегда можно сделать в графе без циклов, то матрица смежности графа будет иметь верхний треугольный вид. Для хранения графа в памяти компьютера используется матрица сетевого оператора.

Эта матрица строится по матрице смежности графа с заменой единиц на номера функций с одним аргументом и добавлением номеров функций с двумя аргументами в соответствующую номеру узла строку на диагональ матрицы. Матрица сетевого оператора для рассматриваемого математического выражения имеет следующий вид:

$$\Psi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}. \quad (16)$$

2.2. Метод вариационного декартова генетического программирования

Метод вариационного декартова генетического программирования является модификацией метода декартова генетического программирования [15] с использованием в нем принципа малых вариаций базисного решения [16]. Для кодирования математического выражения этим методом используются множество аргументов и множество всех примитивных функций. Кодирование представляет собой последовательное описание вызовов функций. Для описания вызова функции используется целочисленный вектор. Первая компонента вектора указывает на номер функции, остальные компоненты — на номер аргумента, после вычисления функции ее результат добавляется к множеству аргументов и поэтому он тоже может быть записан в качестве аргумента последующих вызовов.

Рассмотрим пример кодирования математического выражения (12).

Задаем расширяемое при вычислении множество аргументов

$$F_0 = \{a_1 = x_1, a_2 = x_2, a_3 = q_1, a_4 = q_2\}. \quad (17)$$

Определяем объединенное множество необходимых функций

$$F_1 = \{f_1(z) = z, f_2(z) = -z, f_3(z) =$$

$$= \sin(z), f_4(z) = \cos(z), f_5(z) = \exp(z), f_6(z_1, z_2) = z_1 + z_2, f_7(z_1, z_2) = z_1 z_2\}. \quad (18)$$

Код декартова генетического программирования для математического выражения (12) имеет следующий вид:

$$\mathbf{D} = \left(\begin{bmatrix} 7 \\ 1 \\ 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 7 \\ 2 \\ 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2 \\ 6 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 5 \\ 7 \\ 2 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 4 \\ 5 \\ 3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 6 \\ 8 \\ 9 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 3 \\ 10 \\ 4 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 2 \\ 11 \\ 3 \end{bmatrix} \right). \quad (19)$$

В примере первый вектор кодирует $x_1 q_1$. Первая компонента 7 обозначает функцию умножения, 1 обозначает элемент из множества аргументов, это x_1 , 2 обозначает q_1 . Результат вычислений $x_1 q_1$ добавляется ко множеству аргументов в качестве пятого аргумента.

3. Вычислительный эксперимент

Рассмотрим пример решения задачи синтеза системы пространственной стабилизации мобильного робота. Математическая модель объекта управления имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= 0.5(u_1 + u_2) \cos(x_3), \\ \dot{x}_2 &= 0.5(u_1 + u_2) \sin(x_3), \\ \dot{x}_3 &= 0.5(u_1 - u_2). \end{aligned} \quad (20)$$

На управление наложены ограничения

$$-10 \leq u_i \leq 10, \quad i = 1, 2. \quad (21)$$

Заданы тридцать начальных значений

$$\begin{aligned} X_0 &= \{\mathbf{x}^{0,1} = [-2 \ -2.5 \ -5\pi/12]^T, \\ \mathbf{x}^{0,2} &= [-2 \ -2.5 \ 0]^T, \mathbf{x}^{0,3} = [-2 \ -2.5 \ 5\pi/12]^T, \\ \mathbf{x}^{0,4} &= [-2 \ 2.5 \ -5\pi/12]^T, \\ \mathbf{x}^{0,5} &= [-2 \ 2.5 \ 0]^T, \mathbf{x}^{0,6} = [-2 \ 2.5 \ 5\pi/12]^T, \\ \mathbf{x}^{0,7} &= [-1 \ -2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,8} = [-1 \ -2.5 \ 0]^T \\ \mathbf{x}^{0,9} &= [-1 \ -2.5 \ 5\pi/12]^T, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}^{0,10} &= [-1 \ 2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,11} = [-1 \ 2.5 \ 0]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,12} &= [-1 \ 2.5 \ 5\pi/12]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,13} &= [0 \ -2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,14} = [0 \ -2.5 \ 0]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,15} &= [0 \ -2.5 \ 5\pi/12]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,16} &= [0 \ 2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,17} = [0 \ 2.5 \ 0]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,18} &= [0 \ 2.5 \ 5\pi/12]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,19} &= [1 \ -2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,20} = [1 \ -2.5 \ 0]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,21} &= [1 \ -2.5 \ 5\pi/12]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,22} &= [1 \ 2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,23} = [1 \ 2.5 \ 0]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,24} &= [1 \ 2.5 \ 5\pi/12]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,25} &= [2 \ -2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,26} = [2 \ -2.5 \ 0]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,27} &= [2 \ -2.5 \ 5\pi/12]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,28} &= [2 \ 2.5 \ -5\pi/12]^T, \mathbf{x}^{0,29} = [2 \ 2.5 \ 0]^T, \\
 \mathbf{x}^{0,30} &= [2 \ 2.5 \ 5\pi/12]^T.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Задано одно терминальное условие

$$\mathbf{x}^f = [0 \ 0 \ 0]^T. \tag{23}$$

Задан функционал качества в виде (10), (11), в котором $K = 30$, $t^+ = 1.5$ с, $\varepsilon = 0.01$.

Метод сетевого оператора нашел следующее математическое выражение:

$$u_i = \begin{cases} 10, & \text{если } \tilde{u}_i > 10 \\ -10, & \text{если } \tilde{u}_i < -10, \quad i = 1, 2, \\ \tilde{u}_i & - \text{иначе} \end{cases} \tag{24}$$

где

$$\begin{aligned}
 \tilde{u}_1 &= B + \operatorname{sgn}(A)(\exp(|A|) - 1) + \\
 &+ \frac{1}{q_3(x_3^f - x_3)} + \left(q_3(x_3^f - x_3)\right)^2, \tag{25}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \tilde{u}_2 &= \sqrt[3]{u_1} + \sqrt[3]{B} + A - A^3 + \\
 &+ \operatorname{sgn}(x_3^f - x_3) + \sin(q_2(x_2^f - x_2)) + \\
 &+ \sqrt[3]{q_1 x_1 \arctan(q_2)} + \operatorname{sgn}(x_3^f - x_3) \ln(|x_3^f - x_3| + 1) + \\
 &+ \operatorname{sgn}(x_1^f - x_1) \sqrt{|x_1^f - x_1|}, \tag{26}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 A &= \sin(q_3(x_3^f - x_3)) + q_3(x_3^f - x_3) + q_2(x_2^f - x_2), \\
 B &= A + \exp(q_3(q_3(x_3^f - x_3))) + \sqrt[3]{q_3(x_3^f - x_3)} + \\
 &+ \exp(q_2(x_2^f - x_2)) + \operatorname{sgn}(x_2^f - x_2) \sqrt{|x_2^f - x_2|} + \\
 &+ \operatorname{sgn}(x_1^f - x_1). \\
 q_1 &= 11.78540 \quad q_2 = 13.77734, \quad q_3 = 10.04736.
 \end{aligned}$$

Графики моделирования объекта управления (20) с найденной функцией управления (24) – (26) для восьми начальных условий $\mathbf{x}^{0,1}, \mathbf{x}^{0,3}, \mathbf{x}^{0,13}, \mathbf{x}^{0,15}, \mathbf{x}^{0,16}, \mathbf{x}^{0,18}, \mathbf{x}^{0,28}, \mathbf{x}^{0,30}$ приведены на рис. 2.

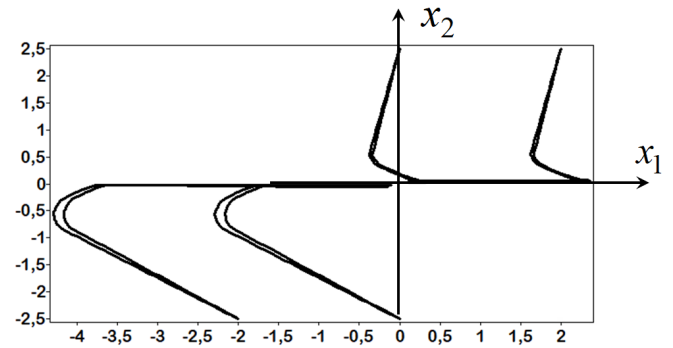


Рис. 2. Траектории движения робота из восьми начальных условий для управления (24) – (26)
 Figure 2. Robot trajectories from eight initial conditions at the control (24) – (26)

Метод вариационного декартова генетического программирования получил следующее решение:

$$u_1 = \begin{cases} 10, & \text{если } \tilde{u}_i > 10 \\ -10, & \text{если } \tilde{u}_i < -10, \\ \tilde{u}_1 & - \text{иначе} \end{cases} \tag{27}$$

$$u_2 = \begin{cases} 10, & \text{если } A > B \\ -10 & - \text{иначе} \end{cases}, \tag{28}$$

где

$$\begin{aligned}
 \tilde{u}_1 &= \operatorname{sgn}(-q_1^2(x_3^f - x_3) \operatorname{sgn}(\arctan(x_2^f - x_2))) \times \\
 &\times \sqrt{|-q_1^2(x_3^f - x_3) \operatorname{sgn}(\arctan(x_2^f - x_2))|}, \tag{29} \\
 A &= (x_1^f - x_1) + CD \tanh(-q_1^2(x_3^f - x_3) \operatorname{sgn}(\arctan(x_2^f - x_2))), \\
 B &= \tanh(-q_1^2(x_3^f - x_3) \operatorname{sgn}(\arctan(x_2^f - x_2))).
 \end{aligned}$$

$$C = \begin{cases} \tanh(\cos(x_3^f - x_3)), & \text{если } \tanh(\cos(x_3^f - x_3)) > \arctan(x_2^f - x_2) \\ -\tanh(\cos(x_3^f - x_3)) & - \text{ иначе} \end{cases}$$

$$D = q_2 + \begin{cases} 1, & \text{если } x_2^f - x_2 > 0 \\ 1/x_2, & - \text{ иначе} \end{cases}$$

$$q_1 = 15.3283 \quad q_2 = 10.9794.$$

Графики моделирования объекта управления (20) с найденной функцией управления (27)—(29) для

тех же восьми начальных условий $x^{0,1}$, $x^{0,3}$, $x^{0,13}$, $x^{0,15}$, $x^{0,16}$, $x^{0,18}$, $x^{0,28}$, $x^{0,30}$ приведены на рис. 3.

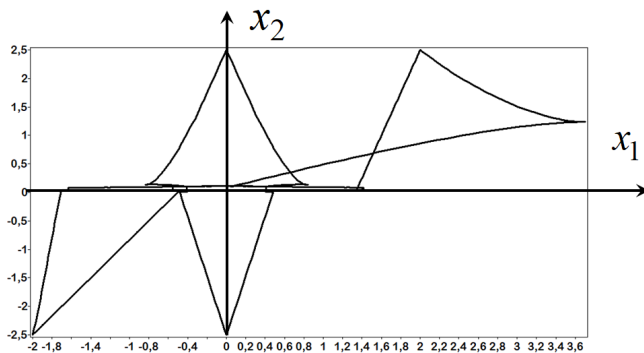


Рис. 3. Траектории движения робота из восьми начальных условий для управления (27)–(29)

Figure 3. Robot trajectories from eight initial conditions at the control (27) – (29)

Заключение

В работе представлен подход к решению задачи синтеза управления на основе обучения методом символьной регрессии. Приведено краткое описание двух методов символьной регрессии и представлено решение этими методами прикладной задачи синтеза системы пространственной стабилизации мобильного робота.

Список литературы

1. Bellman R., Glickberg I., Gross O. *Some Aspects of the Mathematical Theory of Control Processes*. Rand Corporation. Santa Monica, California, 1958.
2. Bellman R., Kalaba R. *Dynamic Programming and Modern Control Theory*. New York: London Academic Press, 1966.

3. Bellman R.E., Dreyfus S.E. *Applied Dynamic Programming*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1962.

4. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов. I // Автоматика и телемеханика. 1960. № 21 (4). С. 436—441.

5. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов. 4-е изд. М.: Наука, Главное издательство физико-математической литературы, 1983. 392 с.

6. Boltyanskii V.G. *Mathematical Methods of Optimal Control*. Holt, Rinehart & Winston in New York, 1971. 272 p.

7. Khalil H.K. *Nonlinear Systems*. New York: Prentice Hall, 2002.

8. Колесников А.А., Колесников А.А., Кузьменко А.А. Метод АКАР и теория адаптивного управления в задачах синтеза нелинейных систем управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. № 18 (9). С. 579—589. doi: 10.17587/mau.18.579-589

9. Koza J.R. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, Massachusetts, London, MA: MIT Press, 1992. 819 p.

10. Diveev A.I., Sofronova E.A. Numerical method of network operator for multiobjective synthesis of optimal control system // Proceedings of Seventh International Conference on Control and Automation (ICCA'09) Christchurch, New Zealand, December 9—11, 2009. P. 701—708.

11. Дивеев А.И. Численный метод сетевого оператора для синтеза системы управления с неопределенными начальными значениями // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 2. С. 63—78.

12. Дивеев А.И. Численные методы решения задачи синтеза управления. М.: Изд-во РУДН, 2019. 192 с.

13. Duriez T., Brunton S.L., Noak B.R. *Machine Learning Control — Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence*. Part of the Fluid Mechanics and Its Applications book series (FMIA, vol. 116). Springer, 2017. 211 p. doi: 10.1007/978-3-319-40624-4

14. Дивеев А.И. Метод сетевого оператора. М.: Изд-во ВЦ РАН, 2010. 178 с.

15. Miller J., Thomas P., Cartesian Genetic Programming. Proceedings EuroGP' 200R. 3-rd European Conference genetic Programming. R. Poly et al. (eds.) Edinburgh, Scotland. Vol. 1802. Berlin: Springer-Verlag, 2000. P. 121—132. doi: 10.1007/978-3-540-46239-2_9

16. Diveev A. Small Variations of Basic Solution Method for Non-numerical Optimization // IfacPapers-OnLine. 2015. Vol. 48. Is. 25. P. 28—33. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.11.054

References

1. Bellman R, Glickberg I, Gross O. *Some Aspects of the Mathematical Theory of Control Processes*. Rand Corporation. Santa Monica, California; 1958.

2. Bellman R, Kalaba R. *Dynamic Programming and Modern Control Theory*. New York London Academic Press; 1966.
3. Bellman RE, Dreyfus SE. *Applied Dynamic Programming*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press; 1962.
4. Letov AM. Analytical design of controllers. I. *Automatica I Telechanika*, 1960;21(4):436—441. (In Russ.)
5. Pontryagin LS, Boltyanskii VG, Gamkrelidze RV, Mishchenko EF. *The Mathematical Theory of Optimal Processes*. Ed. 4. Moscow: Nauka Press; 1983. (In Russ.)
6. Boltyanskii VG. *Mathematical Methods of Optimal Control*. Holt, Rinehart & Winston in New York; 1971.
7. Khalil HK. *Nonlinear Systems*. New York: Prentice Hall; 2002.
8. Kolesnikov AA. ADAR Method and theory of adaptive control in the tasks of synthesis of the nonlinear control systems. *Mechatronics, Automation, Control*. 2017;18(9):579—589. doi: 10.17587/mau.18.579-589
9. Koza JR. *Genetic Programming: On the Programming of Computers by Means of Natural Selection*. Cambridge, Massachusetts, London, MA: MIT Press; 1992.
10. Diveev AI, Sofronova EA. Numerical method of network operator for multiobjective synthesis of optimal control system. In: *2009 IEEE International Conference on Control and Automation, ICCA 2009*. Christchurch; 2009. p. 701–708. doi: 10.1109/ICCA.2009.5410619
11. Diveev A. A Numerical Method for Network Operator for Synthesis of a Control System with Uncertain Initial Values. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2012;51(2):228—243.
12. Diveev A. *Chislennyye metody resheniya zadachi sinteza upravleniya [A Numerical Methods for solution of Control Synthesis Problem]*. Moscow: Peoples' Friendship University of Russia Press; 2019. (In Russ.)
13. Duriez T, Brunton SL, Noak BR. Machine Learning Control—Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence. *Part of the Fluid Mechanics and Its Applications book series (FMIA, vol. 116)*. Springer Publ.; 2017. doi: 10.1007/97-3-319-40624-4
14. Diveev AI. *Metod setevogo operatora [The Network Operator Method]*. Moscow: Dorodnitsyn Computing Center Press; 2010. (In Russ.)
15. Miller J, Thomas P. Cartesian Genetic Programming. In: Poly R et al. (eds.). *Proceedings EuroGP'200R. 3-rd European Conference genetic Programming* (vol. 1802). Edinburgh, Scotland, Berlin: Springer-Verlag; 2000. p. 121—132. doi: 10.1007/978-3-540-46239-2_9
16. Diveev A. Small Variations of Basic Solution Method for Non-numerical Optimization. *IfacPapers-OnLine*, 2015;48(25):28—33. doi: 10.1016/j.ifacol.2015.11.054

Сведения об авторах

Дивеев Асхат Ибрагимович, главный научный сотрудник Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, доктор технических наук, профессор; Scopus Author ID: 6507267391, eLIBRARI SPIN-код: 5726-6572; e-mail: aidiveev@mail.ru

Мендес Флорес Недер Хаир, аспирант департамента механики и мехатроники, инженерная академия, Российский университет дружбы народов; e-mail: nederjair@gmail.com

About the authors

Askhat I. Diveev, Chief Researcher, Federal Research Center «Computer Science and Control» of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Technical Sciences, Professor; Scopus Author ID: 6507267391, eLIBRARI SPIN-code: 5726-6572; e-mail: aidiveev@mail.ru

Neder Jair Mendez Florez, Graduate Student at the Department of Mechanics and Mechatronics, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); e-mail: nederjair@gmail.com




DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-139-147
УДК 528.8.04

Научная статья / Research article

Оценка влияния текущих метеопрогнозов в задаче планирования космической съемки

П.Е. Розин , Ю.А. Смольянинов  

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
 E-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 3 марта 2021 г.
Доработана: 12 апреля 2021 г.
Принята к публикации: 15 мая 2021 г.

Аннотация. Статья посвящена актуальной задаче планирования работы группы разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Описывается укрупненный алгоритм решения задачи планирования для разнотипных КА. Результат укрупненного алгоритма ищется в виде совокупности опорных планов для групп однотипных КА, прореженной за счет удаления части конфликтующих операций сброса данных зондирования. Характеристики разрабатываемых планов в значительной мере зависят от используемой методики учета влияния облачности. Исследуется возможность реализации методики, основанной на применении скачанных из Интернета файлов текущих метеопрогнозов гидрометцентров, в виде специального приложения. Проводится проверка созданного приложения на скачанных с американского сервера реальных данных гидрометцентра, которые охватывают большой регион, включающий европейскую часть Евразии и часть Африки. С помощью приложения, моделирующего распределение точек внутри региона, оценивается число точек, накрытых слабой облачностью (20% или менее). По результатам моделирования установлено, что доля доступных для съемки точек лежит в интервале от примерно четверти до трети. На основе полученных количественных оценок делается вывод о том, что учет влияния облачности коренным образом меняет опорные планы, рассчитанные с учетом только освещенности, и влияет на структуру укрупненного алгоритма планирования.

Ключевые слова: космические аппараты дистанционного зондирования Земли, планирование космосъемки

Для цитирования

Розин П.Е., Смольянинов Ю.А. Оценка влияния текущих метеопрогнозов в задаче планирования космической съемки // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 139–147. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-139-147


© Розин П.Е., Смольянинов Ю.А., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Assessment of the impact of current weather forecasts in the task of space survey planning

Peter E. Rozin , Yuri A. Smolyaninov  

Moscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe Shosse, 125993, Moscow, Russian Federation
 E-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru

Article history

Received: March 03, 2021

Revised: April 12, 2021

Accepted: May 15, 2021

Abstract. The article is devoted to the actual task of planning the work of a group of different types of spacecraft for remote sensing of the Earth. An enlarged algorithm for solving the planning problem for different types of spacecraft is described. The result of the enlarged algorithm is sought in the form of a set of reference plans for groups of similar spacecraft, thinned out by removing some of the conflicting operations of resetting the sensing data. The characteristics of the developed plans largely depend on the methodology used to account for the impact of cloud cover. The possibility of implementing a methodology based on the use of files of current weather forecasts of hydrometeorological centers downloaded from the Internet in the form of a special application is investigated. The created application is being tested on the real data of the hydrometeorological center downloaded from the American server, which covers a large region, including the European part of Eurasia and part of Africa. An application that simulates the distribution of points within a region estimates the number of points covered by weak cloud cover (20% or less). Based on the results of the simulation, it was found that the proportion of points available for shooting lies in the range from about a quarter to a third. Based on the obtained quantitative estimates, it is concluded that taking into account the influence of cloud cover radically changes the reference plans calculated taking into account only illumination, and affects the structure of the enlarged planning algorithm.

Keywords: space survey planning, assessing the impact of cloud cover

For citation

Rozin PE, Smolyaninov YuA. Assessment of the impact of current weather forecasts in the task of space survey planning. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):139–147. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-139-147

Введение

Наращивание орбитальной группировки (ОГ) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), реализуемое в рамках Федеральной космической программы России на 2016—2025 годы, и увеличение ее производительности влечет значительное увеличение объемов принимаемых данных. В условиях существенного увеличения отечественной ОГ за счет ввода новых КА, оснащенных различными типами аппаратуры ДЗЗ, важнейшим вопросом является обеспечение согласованного, планомерного целевого

применения разнотипных КА за счет разработки специализированного программного обеспечения (СПО). Создание такого СПО непременно должно включать математические модели, позволяющие учитывать влияние облачности при разработке оперативных планов функционирования ОГ. Задача настоящего исследования состоит в получении количественных оценок влияния облачности при использовании одной из возможных методик, основанной на применении скачанных из Интернета файлов текущих метеопрогнозов.

1. Задача планирования космосъемки

Целевое функционирование орбитальной группировки заключается в периодически повторяющейся совместной реализации программы съемки заданного множества земных объектов и программы сброса данных зондирования на пункты приема информации (ППИ) наземной инфраструктуры на заданном временном интервале. Единичная операция съемки завершается регистрацией отснятого сюжета (данных зондирования) в виде цифрового снимка в бортовом запоминающем устройстве (БЗУ). Серия последовательных снимков одного КА формирует поток данных, объем которого может быть велик.

Число объектов, подлежащих съемке, также может быть достаточно большим. Поскольку низкоорбитальные КА группировки за сутки совершают более 15 витков по орбитам, то в зависимости от длительности интервала планирования количество потенциальных съемок земных объектов может составить сотни и тысячи единиц, что приводит к многовариантности формирования съемочных планов. Однако на число потенциальных съемок с использованием оптико-электронной аппаратуры существенное влияние может оказать облачность. Интересно оценить, насколько существенно такое влияние. Вместе с тем требования к экономической эффективности обуславливают необходимость формирования таких планов, реализация которых обеспечивает максимальную ценность информации о снятых земных объектах в условиях ограниченных возможностей бортовых информационных комплексов КА по ее сбору, хранению и передаче. Для формализации задачи планирования в работах [1; 2] введены в рассмотрение модель временных последовательностей возможной съемки объектов и сеансов связи и модели целевого функционирования бортовых информационных комплексов КА. Последние описывают меняющиеся состояния БЗУ и процессы переориентации съемочной аппаратуры каждого КА группировки. На основе математической формализации осуществляется переход к оптимизационной задаче дискретного программирования (задаче маршрутизации), заключающейся в поиске такой программы управления бортовой съемочной аппаратурой КА, которая обеспечивает максимум критерия эффективности целевого функциониро-

вания — совокупной ценности космоснимков — при ограничениях, накладываемых внешней средой (освещенность, облачность) и ограниченных технических возможностях каждого КА.

В составе отечественной орбитальной группировки эксплуатируются КА ДЗЗ трех типов: «Ресурс-П», «Канопус-В», «Метеор-М», работающих на солнечно-синхронных орбитах. Их движение описывается моделью в виде системы дифференциальных уравнений для околокруговых орбит, входящей в состав СПО. С вводом в эксплуатацию КА «Арктика-М» набор моделей движения, необходимых для корректного описания изменившейся структуры ОГ, следует дополнить моделью движения по высокоэллиптическим орбитам.

Укрупненный алгоритм решения задачи планирования для группы разнотипных КА предлагается выполнять поэтапно, а именно:

1) решением задачи дискретного программирования строятся опорные планы в виде временной последовательности координатно привязанных операций съемки и сброса для каждой группы однотипных КА с учетом освещенности, но при отсутствии облачности;

2) по набору найденных расчетных точек и интервалов съемки выполняется прогноз количества облачности в пределах интервала планирования и часть операций съемки, не удовлетворяющих ограничениям по облачности, из планов исключается;

3) прореженные опорные планы для групп однотипных КА объединяются в хронологически упорядоченную последовательность целевых операций ОГ, внутри которой выявляются и устраняются (при наличии) возможные конфликты на проведение операций сброса данных зондирования на ППИ. В итоге некоторая часть операций сброса из объединенного плана исключается;

4) прореженный объединенный план рассматривается как решение задачи планирования для группы разнотипных КА и для него вычисляются частные показатели эффективности, оценивающие расчетные доли участия каждого КА и каждого ППИ в выполнении скоординированного плана.

Решение задачи планирования позволяет формировать циклограммы работы целевой аппаратуры каждого КА группировки и каждого ППИ в течение интервала планирования.

Для выполнения расчетов на втором этапе важно выбрать реализуемую программно методичку учета прогнозируемого состояния облачности.

2. Современные подходы к оценке облачного покрова для систем космосъемки

В настоящее время существует несколько подходов к оценке облачности при планировании космосъемки. Эти подходы можно условно разделить на два вида:

1) статистические модели, базирующиеся на априорном знании параметров облачности на длительном интервале наблюдений, например, математическая модель облачного покрова, описывающая распределение количества облачности над районами съемки с помощью карт зон однородности, зависящих от сезона [3];

2) модели облачности, базирующиеся на данных гидрометеорологических центров, представленные в виде таблиц с прогнозом процента облачного покрова для заданного участка земной поверхности. Как правило, интервал прогноза покрывает потребности как оперативного планирования (1—3 суток), так и среднесрочного планирования (до 10 суток) космосъемки. Прогнозируемые по данным моделям текущие метеопараметры распространяются метеорологическими службами как на платной, так и бесплатной основе.

К недостаткам первой модели относятся: невысокая точность прогноза по отношению ко второму виду моделей, обобщение процента облачного покрова для больших площадей, порядка десятков миллионов квадратных километров. Обобщение прогноза на больших площадях затрудняет применение таких моделей для спутников высокодетальной съемки, поле зрения оптической аппаратуры которых не превышает сотен квадратных километров. Кроме того, для использования таких моделей необходимо вначале провести обработку данных об облачности с формированием матриц перехода, что является отдельной достаточно трудоемкой задачей.

Достоинством является автономность прогноза облачности, когда после статистической обработки данных не требуется доступа к данным гидрометцентра.

Данная статистическая модель представляется в виде абсолютно случайной последовательности или

цепи (при интервалах между наблюдениями, превышающих время корреляции процесса), а также марковской цепи или дискретного марковского процесса (при малых интервалах между наблюдениями). Съемка «точечного» объекта в момент t или площадного на интервале (t_1, t_2) считается возможной, если разыгрываемое с помощью датчика случайных чисел (ДСЧ) количество облачности над центром района съемки не превышает заданное. Применение ДСЧ предполагает наличие статистических данных о пространственно-временных распределениях облачности. Другими словами, подход, основанный на формировании карт зон однородности, требует трудоемкой обработки многолетних статистических данных о глобальном сезонном распределении облачности по результатам наземных и спутниковых наблюдений. Он позволяет получать оценки количества облачности лишь в среднем по зонам, имеющим весьма значительные площади, без учета текущих метеопрогнозов, характеризующихся достаточно подробным разрешением по времени и конкретной координатной привязкой.

К достоинствам второго рода моделей относится их более высокая точность прогноза, достаточно высокое временное и пространственное разрешение (карта прогноза $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ по широте и долготе). К недостаткам можно отнести необходимость постоянной связи с гидрометеорологическими службами, которые непосредственно обеспечивают формирование прогноза. Данные прогнозы базируются на самых современных алгоритмах, которые используются в мировых гидрометцентрах, а не просто на статистических характеристиках процессов, полученных по результатам обработки данных многолетних измерений. Именно использование таких данных является наиболее перспективным и современным подходом.

Стандартным представлением метеоданных, которые формируют гидрометцентры, является GRIB-файл. GRIB (GRIdded Binary) — математический формат сжатых данных, используемый для хранения исторических и прогнозируемых данных о погоде. Он был стандартизирован комиссией по основным системам Всемирной метеорологической организации, известен под номером GRIB FM 92-IX и описан в 306 номере руководства ВМО по кодам. В настоящее время существует три версии GRIB. Версия 0 ограниченно используется в таких проектах, как TOGA, и больше

практически не применяется. Первая редакция (текущая подверсия — 2) используется во всем мире большинством метеорологических центров для вывода численного прогноза погоды. Новое поколение было введено как вторая редакция GRIB [4]¹. Данные файлы формируются по запросу клиентской программы на удаленном сервере гидрометеорологической службы и пересылаются по сети Ethernet на компьютер клиента. GRIB-файл, помимо параметров облачности, может включать в себя данные о температуре, ветре, осадках, толщине снежного покрова и многом другом. Кроме того, файл может быть сформирован как для специфической области, ограниченной прямоугольником с соответствующими вершинами (широта, долгота), так и для всей поверхности Земли. Интервал прогноза файла — 10 суток, разрешение на местности (для бесплатно распространяемых данных) варьируется от $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, до $3^\circ \times 3^\circ$

В контексте задачи планирования многие из этих данных являются излишними. Параметры облачности, необходимые для планирования, следует извлекать и считывать выборочно, т.е. данные из GRIB-файла, которые хранятся в нем в специальной двоичной структуре данных, требуют обработки и отбора.

После получения GRIB-файла становится возможным обработать эти данные для последующего использования в программном обеспечении задачи планирования. После обработки объем файла значительно уменьшается. Так, прогноз только облачности на 6 суток с шагом в 3 часа и разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ будет занимать примерно 3 Мбайт для всей территории России. Для их извлечения удобно воспользоваться свободно распространяемым модулем `wgrib` на языке СИ, который имеет открытый код. Использование данного программного модуля в собственной программе, а также построение на его базе собственных подпрограмм позволяет адаптировать код для применения в различных средах разработки и при создании кроссплатформенных приложений. Использование `wgrib` рекомендовано ФГБУ «Гидрометцентр России» (рекомендации даны на официальном сайте) [5; 6]².

Идея использования GRIB-файла в контексте задачи планирования космосъемки реализована в виде

адаптированного модуля `wgrib_m` и динамической библиотеки `cloud.dll`.

Рассмотрим тестовый пример. Сделаем запрос данных на сервер гидрометеорологической службы и получим GRIB-файл для прямоугольника, ограниченного широтным диапазоном от 68° до 39° с.ш. и диапазоном долгот от 44° до 93° в.д. Потребуем, чтобы файл содержал исключительно прогноз облачности на 10 суток вперед с шагом в 3 часа и разрешением $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Нанесем на график, имеющий размеры ограничивающего прямоугольника, данные прогноза облачности: синим — процент облачности от 100 до 70 %; голубым — процент облачности от 70 до 30 %; белым — процент облачности от 30 до 0 %.

На рис. 1 представлена карта облачности, построенная по данным прогноза на 3 часа по указанным выше параметрам для заданного долготно-широтного диапазона.

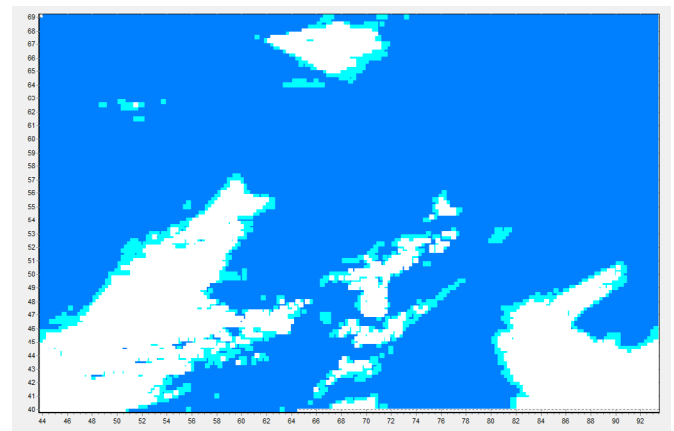


Рис. 1. Карта прогнозируемого распределения облачности для заданного региона (Авторский)

Figure 1. The map of predicted cloud distribution for the given region

Прогноз облачности можно осуществлять упрощенным образом, без интерполяции между временными интервалами. Либо осуществлять интерполяцию с использованием данных о конвективном теплообмене, скорости и направлении ветра, рельефе местности и т.п. В зависимости от требуемой точности можно использовать различные способы. В случае упрощения точность прогноза находится в пределах разрешающей способности GRIB-файла по времени и составляет

¹ GRIB. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/GRIB> (дата обращения: 01.03.2021).

² См.: URL: <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/wgrib.html> (дата обращения: 01.03.2021); URL: <https://meteoinfo.ru/grib> (дата обращения: ссылка рабочая, проверена 18.04.2020).

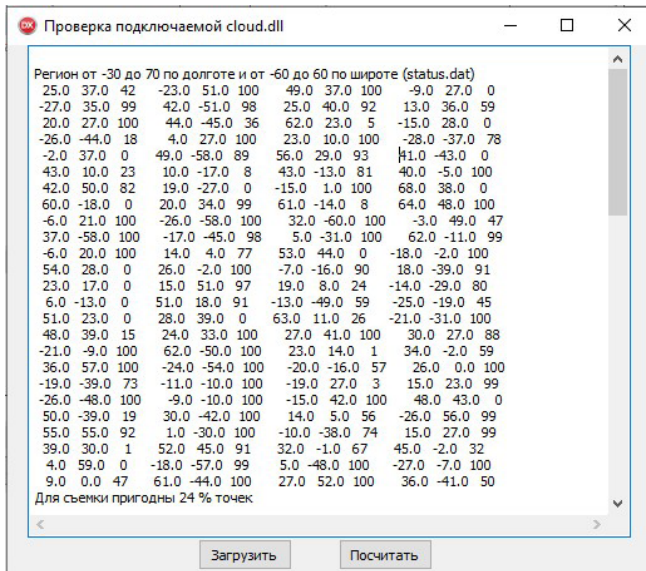
минимально 3 часа для бесплатных данных. Данное упрощение может приводить к существенным ошибкам на пограничных областях, т.е. в тех областях, где между соседними областями прогноза сетки поверхности плотность облачного покрова существенным образом отличается (на 50...70 %). Для таких областей параметры облачности могут меняться чрезвычайно интенсивно, что увеличивает ошибку прогноза. Предварительно данную ошибку можно оценить в 30...40 %. То есть, к примеру, если прогноз облачности по данным СПО был 40 %, при использовании более точных систем с интерполяцией он составит 70...80 %. Указанные ошибки характерны именно для пограничных с интенсивной облачностью районов.

Для второго теста взят файл wgrib.out, который содержит извлеченные из GRIB-файла данные о реальном состоянии облачности над регионом, охватывающим всю европейскую часть Евразии и лежащим в пределах от -30 до 70 градусов долготы и от -60 до 60 градусов широты на 18.04.2020. Координаты внутренних точек региона формируются с помощью ДСЧ в цикле из 100 реализаций. Для парирования влияния ДСЧ и целочисленности задаваемых координат расчеты повторены 10 раз. При таких условиях число

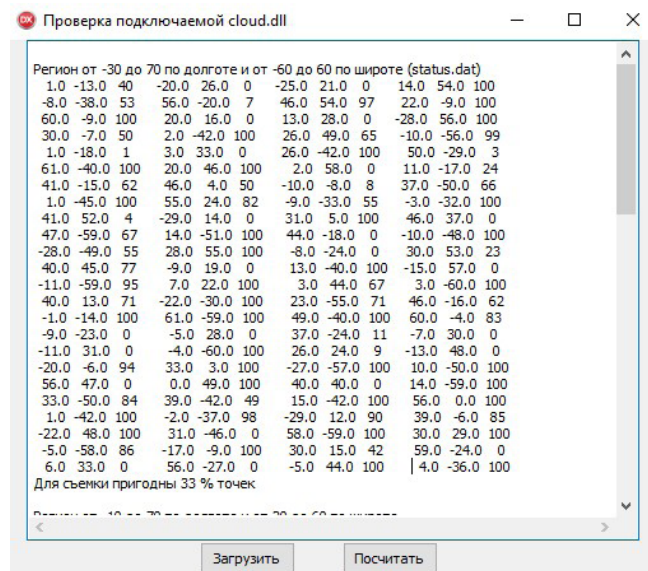
точек, накрытых облачностью не более 2 баллов (20 %), лежит в интервале от 24 (рис. 2, а) до 33 (рис. 2, б) со средним значением 28,3. Проведенная проверка работы библиотеки Cloud.dll на соответствующих данных показывает (рис. 2, а и б), что:

- а) подключение библиотеки Cloud.dll к СПО планирования проходит нормально;
- б) функция getCloud, формирующая процент облачности по заданным координатам точки и времени прогноза, работает удовлетворительно: любой точке из 100, лежащих внутри заданного региона, ставится в соответствие положительное число, лежащее в допустимых пределах — процент облачности; значение -1, свидетельствующее об ошибке, в результатах отсутствует;
- в) для съемки пригодны от четверти до трети из 100 просмотренных точек, выбранных с помощью ДСЧ (взят допустимый предел 2 балла из 10).

Для исследования влияния числа реализаций использован тот же GRIB-файл, но извлечение параметров облачности выполнено для региона меньшей площади, охватывающего Европу и лежащего в пределах от -10 до 70 градусов долготы и от 20 до 60 градусов широты на ту же дату 18.04.2020 года. Результаты 30 расчетов представлены в табл. 1.



а



б

Рис. 2. Оценка доли точек заданного региона, доступных для съемки, лежит в диапазоне от четверти до трети; а – худший из 10 просчитанных: 24 %, б – лучший из 10: 33 %

Figure 2. The estimate of the percentage of points in the given region available for shooting is in the range from a quarter to a third; а – the worst of 10 calculated: 24 %, б – the best of 10: 33 %

Еще один тест проведен на данных GRIB-файла, который определяет параметры облачности для региона, лежащего в пределах от -0 до -37 градусов долготы

и от -54 до 8 градусов широты на дату 04.03.2021 года. Результаты 30 расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Оценка числа доступных для съемки точек

Table 1

Estimation of the number of points available for shooting		
Регион от $(-10, 20)$ до $(70, 60)$ – «Европа+», 18.04.20 Region from $(-10,20)$ to $(70,60)$ – «Europe+», 18.04.20		
Число точек Number of points	Число точек, накрытых слабой облачностью (20 % или менее) в 10 вариантах расчета The number of points covered with weak clouds (20 % or less) in 10 calculation options	Среднее значение Average value
100	43, 38, 34, 41, 48, 39, 33, 44, 47, 41	40.8
500	34, 35, 37, 34, 38, 35, 36, 38, 36, 41	36.4
1000	34, 36, 35, 38, 34, 36, 36, 35, 37, 37	35.8

Таблица 2

Оценка числа доступных для съемки точек

Table 2

Estimation of the number of points available for shooting		
Регион от $(-80, -54)$ до $(-37, 8)$ – «Южная Америка», 04.03.2021 Region from $(-80, -54)$ to $(-37, 8)$ – «South America», 04.03.2021		
Число точек Number of points	Число точек, накрытых слабой облачностью (20 % или менее) в 10 вариантах расчета The number of points covered with weak clouds (20 % or less) in 10 calculation options	Среднее значение Average value
100	18, 17, 24, 22, 15, 23, 30, 18, 22, 17	20.6
500	23, 23, 24, 21, 22, 23, 22, 20, 19, 21	21.8
1000	21, 19, 20, 21, 24, 23, 22, 20, 22, 20	21.2

Заключение

На основании проведенного инженерного исследования можно сделать следующие оценочные выводы:

- применение методики учета влияния облачности, основанной на загружаемых из Интернета текущих метеопрогнозах гидрометцентров, позволяет создать достаточно простое и вполне работоспособное программное обеспечение, пригодное для использования в задачах планирования космосъемки;
- учет влияния облачности может кардинально менять полученные оптимизацией опорные планы космосъемки, значительно уменьшая число возможных сеансов съемки в плане примерно на 65...80 %;
- влияние облачности на построение планов настолько велико, что, возможно, следует поменять местами этапы 1 и 2 в укрупненном алгоритме решения

задачи планирования, для чего требуется дополнительное исследование.

Список литературы

1. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Формализация задачи оперативного планирования целевого функционирования разнотипных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Труды МАИ. 2017. № 96. 11 с.
2. Малышев В.В., Дарных В.В. Оперативное планирование целевого функционирования космических систем наблюдения и связи. М.: Изд-во МАИ, 2017. 29 с.: ил.
3. Малышев В.В., Бобронников В.Т., Красильщиков М.Н., Нестеренко О.П., Федоров А.В. Спутниковые системы мониторинга. Анализ, синтез и управление. М.: Изд-во МАИ, 2000. 568 с.: ил.

4. Скобелев П.О., Скимунт В.К., Симонова Е.В., Жилиев А.А., Травин В.С. Планирование целевого применения группировки космических аппаратов дистанционного зондирования Земли с использованием мультиагентных технологий // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 10 (171). С. 60—70.
5. Соллогуб А.В., Аншаков Г.П., Данилов В.В. Космические аппараты систем зондирования поверхности Земли. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
6. Соллогуб А.В., Скобелев П.О., Симонова Е.В., Царев А.В., Степанов М.Е., Жилиев А.А. Интеллектуальная система распределенного управления групповыми операциями кластера малоразмерных космических аппаратов в задачах дистанционного зондирования Земли // Информационно-управляющие системы. 2013. № 1 (62). С. 16—26.
7. Усовик И. В., Дарнопых В.В. Автоматизированный программный комплекс для параметрического анализа и оптимизации планирования целевого функционирования космических систем ДЗЗ // Труды МАИ. 2013. № 65. 31 с.
8. Globus A., Crawford J., Lohn J., Pryor A. Application of Techniques for Scheduling Earth-Observing Satellites // Proceedings of the 16th conference on Innovative applications of artificial intelligence. 2004. P. 836—843.
9. Xhafa F., Sun J, Barolli A., Biberaj A., Barolli L. Genetic algorithms for satellite scheduling problems // Mobile Information Systems. 2014. No. 8. P. 351—377.
10. Iacopino C., Palmer P., Policella N., Donati A., Brewer A. How ants can manage your satel-lites // Acta Futura. 2014. No. 9. P. 57—70.
11. Kebin G., Guohua W., Jianghan Z. Multi-Satellite Observation Scheduling Based on a Hybrid Ant Colony Optimization // Advances in Intelligent Systems Research. 2013. P. 532—536.
12. Li Y., Wang R., Xu M. Rescheduling of Observing Spacecraft Using Fuzzy Neural Network and Ant Colony Algorithm // Chinese Journal of Aeronautics. 2014. Vol. 27. Is. 3. P. 678—687. doi: 10.1016/j.cja.2014.04.027
13. Xiaolua L., Baocunb B., Yingwua Ch., Fenga Y. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism // Applied Mathematics and Computation. 2014. No. 230. P. 687—700. doi: 10.1016/j.amc.2013.12.109
14. Dishan Q., Chuan H., Jin L., Manhao M. A Dynamic Scheduling Method of Earth-Observing Satellites by Employing Rolling Horizon Strategy // The Scientific World Journal. 2013. Article ID304047. doi: 10.1155/2013/304047
15. Wanga J., Zhua X., Yangb L., Zhua J., Maa M. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites // Journal of Computer and System Sciences. 2015. No. 81. P. 110—124.

References

1. Emelyanov AA, Malyshev VV, Smolyaninov YuA, Starkov AV. Formalization of the problem of operative target functioning of diverse spacecraft for remote Earth probing. *Trudy MAI [Proceedings of the MAI]*. 2017;96:11. (In Russ.)
2. Malyshev VV, Darnopyh VV. *Operativnoe planirovanie celevogo funkcionirovaniya kosmicheskikh sistem nablyudeniya i svyazi [Operational planning of the targeted operation of space surveillance and communication systems]*. Moscow: MAI Publ.; 2017. (In Russ.)
3. Malyshev VV, Bobronnikov VT, Krasil'shchikov M N, Nesterenko OP, Fedorov AV. *Sputnikovye sistemy monitoringa. Analiz, sintez i upravlenie [Satellite monitoring systems. Analysis, synthesis, and management]*. Moscow: MAI Publ.; 2000. (In Russ.)
4. Skobelev PO, Skirmunt VK, Simonova EV, Zhilyaev AA, Travin VS. Planning for target application of a group of Earth remote sensing satellites using multi-agent technologies. *Izvestiya SFEDU. Engineering sciences*. 2015;10(171):60—70. (In Russ.)
5. Sollogub AV, Anshakov GP, Danilov VV. *Kosmitcheskie apparaty distancionnogo zondirovaniya Zemli [Spacecraft of Earth surface sensing systems]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2009. (In Russ.)
6. Sollogub AV, Skobelev PO, Simonova EV, Tcarev AV, Stepanov ME, Zhilyaev AA. Intelligent system for distributed problem solving in cluster of small satellites for Earth remote sensing. *Information and control systems*. 2013;1(62):16—26. (In Russ.)
7. Usovik IV, Darnopyh VV. Avtomatizirovannyi programmnyi kompleks dlya parametritceskogo analiza i optimizatcii planirovaniya tcelevogo funkcionirovaniya kosmitcheskikh sistem DZZ [Automated software package for parametric analysis and optimization of planning of targeted functioning of remote sensing space systems]. *Trudy MAI [Proceedings of the MAI]*. 2013;65:31. (In Russ.)
8. Globus A, Crawford J, Lohn J, Pryor A. Application of Techniques for Scheduling Earth-Observing Satellites. *Proceedings of the 16th conference on Innovative applications of artificial intelligence*. 2004:836—843.
9. Xhafa F, Sun J, Barolli A, Biberaj A, Barolli L. Genetic algorithms for satellite scheduling problems. *Mobile Information Systems*. 2014;8:351—377.
10. Iacopino C, Palmer P, Policella N, Donati A, Brewer A. How ants can manage your satel-lites. *Acta Futura*. 2014;9:57—70.
11. Kebin G, Guohua W, Jianghan Z. Multi-Satellite Observation Scheduling Based on a Hybrid Ant Colony Optimization. *Advances in Intelligent Systems Research*. 2013:532—536. doi: 10.2991/isccca.2013.169

12. Li Y, Wang R, Xu M. Rescheduling of Observing Spacecraft Using Fuzzy Neural Network and Ant Colony Algorithm. *Chinese Journal of Aeronautics*. 2014;27(3):678—687. doi: 10.1016/j.cja.2014.04.027

13. Xiaolua L, Baocunb B, Yingwua Ch, Fenga Y. Multi satellites scheduling algorithm based on task merging mechanism. *Applied Mathematics and Computation*. 2014;230:687—700. doi: 10.1016/j.amc.2013.12.109

14. Dishan Q, Chuan H, Jin L, Manhao M. A Dynamic Scheduling Method of Earth-Observing Satellites by Employing Rolling Horizon Strategy. *The Scientific World Journal*. 2013. Article ID304047. doi: 10.1155/2013/304047

15. Wanga J, Zhua X, Yangb L, Zhua J, Maa M. Towards dynamic real-time scheduling for multiple earth observation satellites. *Journal of Computer and System Sciences*. 2015;81:110—124.

Сведения об авторах

Розин Петр Евгеньевич, доцент кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кандидат технических наук; ORCID: 0000-0001-8892-5566, eLIBRARI SPIN-код: 1671-7820; e-mail: rozinpe@rambler.ru

Смолянинов Юрий Алексеевич, доцент кафедры 604 «Системный анализ и управление», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кандидат технических наук; ORCID: 0000-0003-4735-1206, eLIBRARI SPIN-код: 9418-6061; e-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru

About the authors

Peter E. Rozin, Associate Professor of the Department «System analysis and management», Moscow Aviation Institute (National Research University), PhD in Engineering; ORCID: 0000-0001-8892-5566, eLIBRARI SPIN-code: 1671-7820; e-mail: rozinpe@rambler.ru.

Yuri A. Smolyaninov, Associate Professor of the Department «System analysis and management», Moscow Aviation Institute (National Research University), PhD in Engineering; ORCID: 0000-0003-4735-1206, eLIBRARI SPIN-code: 9418-6061; e-mail: smolyaninov-77@psk-net.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161

УДК 629.78

Научная статья / Research article

Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли Часть 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей

А.В. Старков^а✉, А.А. Емельянов^б, Л.А. Гришанцева^б, К.И. Жуковская^б, А.А. Морозов^б, А.А. Тришин^а

^аМосковский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4

^бАкционерное общество «Российские космические системы», Научный центр оперативного мониторинга Земли,
Российская Федерация, 127490, Москва, ул. Декабристов, вл. 51, стр. 25

✉ E-mail: starkov@goldstar.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 13 февраля 2021 г.

Доработана: 21 апреля 2021 г.

Принята к публикации: 14 мая 2021 г.

Аннотация. Во второй части цикла статей рассматриваются вопросы системной организации математических моделей для решения задачи управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Представлено описание взаимосвязанных математических моделей орбитальной группировки как составных частей информационной системы, основной задачей которой является съемка наземных объектов и формирование начального объема информации для ее дальнейшей обработки. Для расчета времени обслуживания заявки космическим сегментом предложены методики формирования: модели эволюции орбиты космического аппарата дистанционного зондирования Земли; модели прогноза возможных интервалов коррекции космического аппарата для поддержания номинальных параметров орбит; модели прогноза возможных интервалов времени циклов включения/выключения аппаратуры наблюдения; модели прогноза возможных интервалов времени для сброса полученной информации на пункт приема и передачи информации. При расчете затрат на обслуживание единичной заявки со стороны орбитального комплекса учитывалась как стоимость обслуживания одного космического аппарата в единицу времени, так и стоимость обработки единичной заявки со стороны наземного комплекса. В заключении предложена обобщенная форма представления модели потока целевой информации космической системы дистанционного зондирования Земли как взаимосвязанная последовательность функций изменения объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функций изменения трафика). Рассмотрены общие подходы к решению оптимизационной задачи.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, обработка данных, распределение информационных ресурсов, оптимизация, эффективность, пункты приема информации, наземный комплекс приема обработки и распределения информации

Для цитирования

Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А. Методология управления потоками целевой информации в космической системе дистанционного зондирования Земли. Часть 2. Формирование системы взаимосвязанных математических моделей // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 148–161. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161

© Старков А.В., Емельянов А.А., Гришанцева Л.А., Жуковская К.И., Морозов А.А., Тришин А.А., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system Part 2. Interrelated mathematical models systems formation

A.V. Starkov^a✉, A.A. Emelianov^b, L.A. Grishantseva^b, K.I. Zhukovskaya^b, A.A. Morozov^b, A.A. Trishin^a

^aMoscow Aviation Institute (National Research University),
4 Volokolamskoe Shosse, 125993, Moscow, Russian Federation

^bRussian Space Systems, Research Center for Earth Operative Monitoring,
b. 51, h.25, Decabristov St, 127490, Moscow, Russian Federation

✉ E-mail: starkov@goldstar.ru

Article history

Received: February 13, 2021

Revised: April 21, 2021

Accepted: May 14, 2021

Keywords: remote sensing of the Earth, data processing, distribution of information resources, optimization, efficiency, information reception points, ground-based information reception and distribution complex

Abstract. In the second part of the series of articles, the issues of the systemic organization of mathematical models for solving the problem of controlling the flows of target information in the Earth remote sensing space system are considered. A description of the interrelated mathematical models of the orbital constellation as components of the information system, the main task of which is to survey ground objects and the formation of the initial volume of information for its further processing, is presented. To calculate the time of servicing the request by the space segment, the following methods of formation are proposed: a model of the evolution of the Earth remote sensing spacecraft orbit; model for forecasting possible spacecraft correction intervals to maintain nominal orbital parameters; model for forecasting possible time intervals for on / off cycles of observation equipment; model for forecasting possible time intervals for dumping the received information to the information reception points. When calculating the cost of servicing a single request from the orbital complex, both the cost of servicing one spacecraft per unit of time and the cost of processing a single request from the ground complex were taken into account. In conclusion, a generalized form of representation of the target information flow model of the Earth remote sensing space system is proposed as an interconnected sequence of functions for changing the amount of information when an appropriate processing process (traffic change functions) is applied to it. General approaches to solving the optimization problem are considered.

For citation

Starkov AV, Emelianov AA, Grishantseva LA, Zhukovskaya KI, Morozov AA, Trishin AA. Methodology for managing the flows of target information in the remote sensing space system. Part 2. Interrelated mathematical models systems formation. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):148–161. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-148-161

Введение

В первой части данной серии статей были представлены результаты формализации актуальной задачи управления потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), сформулирована техническая постановка задачи и предложен общий методический подход к решению поставленной технической задачи управления, который включает в себя: формулировку постановки оптимизационной задачи, выбор общего подхода к ее решению и определение условий применимости [1—9].

Математическая постановка задачи заключается в оптимизации маршрута прохождения заявки по узлам графа, в котором вершиной является заявка, а формализованные данные заявки передаются последовательно на элементы космического и наземного сегментов:

$$\Gamma = \{ \Gamma_k, k = \overline{1, N} \} = \{ (Q, L)_k, k = \overline{1, N} \}$$

$$k_i = \text{const}, i = \overline{1, N}$$

с учетом возможности вычисления представленных выше системных показателей, или их свертки, при наличии текущих ограничений Характеристики узлов

и каналов связи между ними считаются известными и по ним мы можем определить время и стоимость передачи информации. Прохождение трафика по графу приводит к вычислению системных показателей.

Представленная математическая постановка определяет необходимость в разработке согласованных между собой математических моделей более низкого уровня [2–4], декомпозиция которых изображена на рис. 1.

1. Общие подходы к формированию отдельных элементов системы взаимосвязанных моделей

К ним относятся (см. рис. 1): модель движения в задаче определения и прогнозирования состояния космического аппарата (КА), а также проведения орбитальных коррекций; модели описания земных объектов модель проведения съемки, включая модели

целевой аппаратуры; модели проведения сеансов связи и передачи целевой информации между КА и пунктом приема и передачи информации (ППИ) [2].

Результатом применения моделей являются:

— множество интервалов времени вывода КА на техобслуживание, связанное с необходимостью проведения коррекций орбиты [10–18];

— последовательность возможных интервалов времени проведения наблюдений заданного района

$$\{(t_{ik}^1, t_{ik}^2)\}, i = \overline{1, N}, k = \overline{1, K};$$

— последовательность возможных интервалов времени проведения сеансов связи КА ↔ ППИ

$$\{(t_{il}^1, t_{il}^2)\}, i = \overline{1, N}, l = \overline{1, L}.$$

В качестве модели движения можно принять систему дифференциальных уравнений, описывающих пространственное движение космического аппарата в оскулирующих элементах [10–15]:

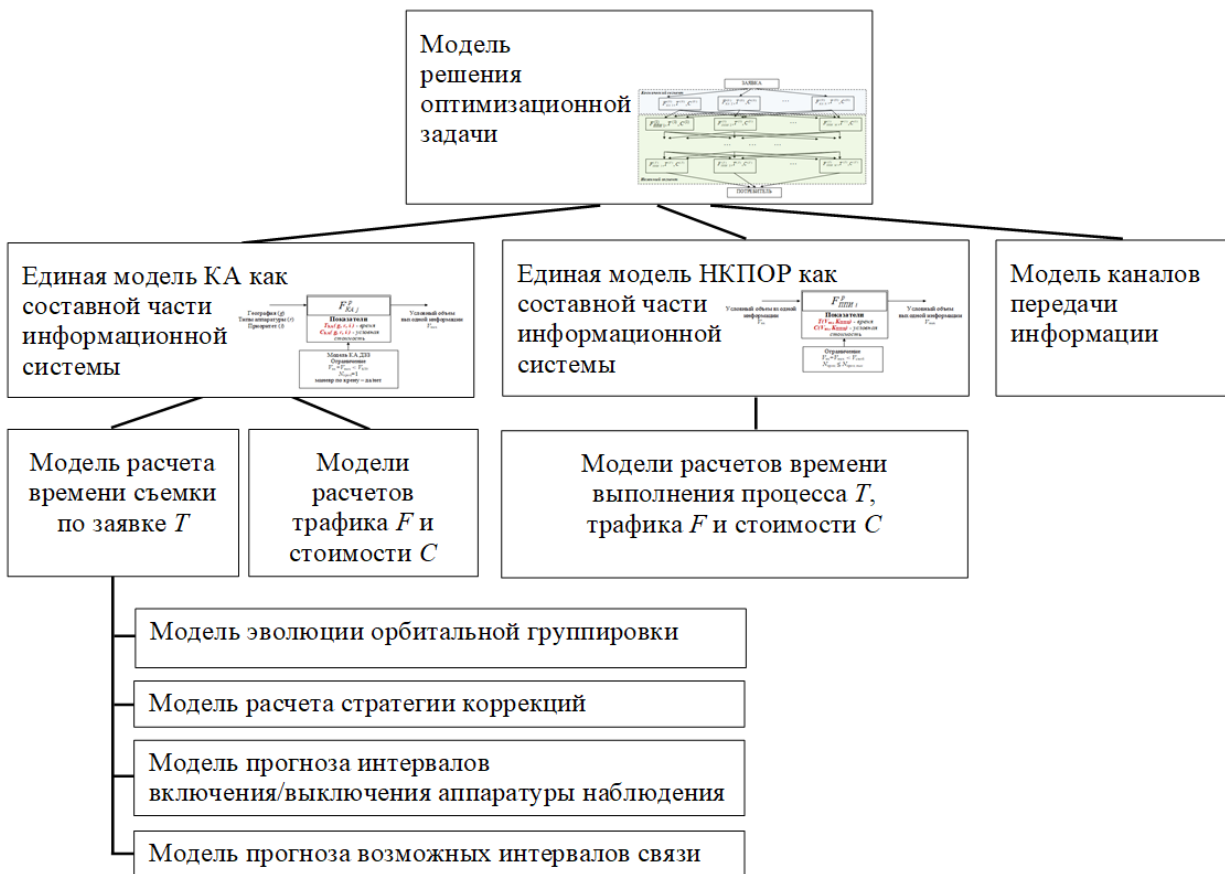


Рис. 1. Система взаимосвязанных моделей

Классическое решение предполагает проведение орбитальных коррекций с целью изменения двух параметров — высоты перигея орбиты и периода обращения КА [10—18]. Задача об изменении высоты перигея формулируется следующим образом. Задана исходная орбита. Полагается, что она определяется апогейным и перигейным расстояниями соответственно $r_{п1}$, $r_{а1}$. Требуется определить величину, направление и точку приложения управляющего импульса скорости, обеспечивающего изменение перигейного расстояния с $r_{п} = r_{п1}$ на $r_{п} = r_{п2}$ при условии сохранения апогейного расстояния орбиты, т.е. при условии $r_{а1} = r_{а2}$. Оптимальный маневр при изменении большой полуоси орбиты характеризуется известным трансверсальным импульсом, приложенным в перигее орбиты.

Стохастический подход к решению задачи управления подразумевает линеаризацию исходных уравнений движения в окрестности средней долготы [13—14]. Это позволяет синтезировать алгоритм управления для проведения динамических операций в окрестности опорной орбиты. Так как главными возмущениями, изменяющими драконический период обращения КА по орбите, являются возмущения вследствие резонанса с долготными членами разложения гравитационного потенциала и доминирующими являются компоненты возмущений с индексами (2, 2, 1, 1) в разложении геопотенциала, то в уравнениях движения можно выделить уравнения, описывающие эволюцию средней долготы и периода обращения (скорости дрейфа). С учетом ошибок реализации управляющего ускорения при корректировании средней долготы и возмущений от коррекции наклона уравнение движения долготы восходящего узла представимо в дискретном виде (см. [13—14]).

Для определения последовательности возможных интервалов времени проведения наблюдений отдельным КА заданного района можно использовать представленную выше модель прогноза с учетом запретов на проведение съемки, связанных с техобслуживанием КА и проведением коррекций. Иллюстрация возможных моделей объектов съемки и проверки возможности наблюдения и сеанса связи приведена на рис. 2—4 [2].

При этом должны учитываться возможности многопроходной съемки, выполняемой в надир, многопроходной съемки, выполняемой с переориентацией оси визирования камеры, съемки в азимутальном режиме, реализуемом за счет синхронизированного программного разворота по тангажу и крену, одновитковой двухпо-

лосной съемки со скачкообразной переориентацией оси визирования камеры по тангажу и крену после первого прохода. В модели переориентации КА участкам изменения углов визирования земных объектов бортовой съемочной аппаратурой КА соответствуют участки кусочно-постоянной функции скорости их переориентации, а сам процесс переориентации бортовой съемочной аппаратуры КА характеризуется предельным углом визирования земного объекта и предельной скоростью.

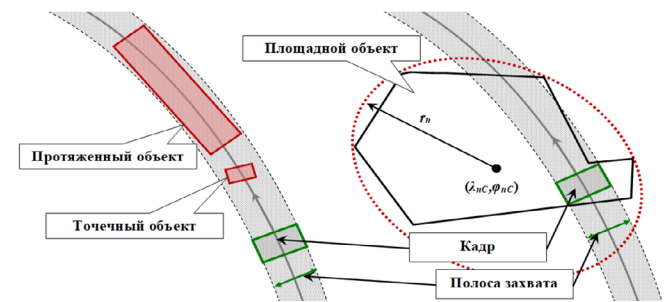


Рис. 2. Типы объектов съемки

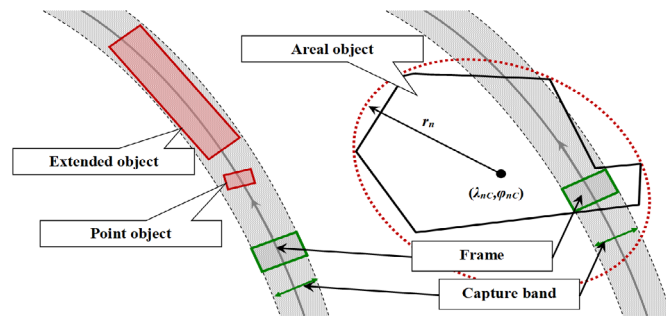


Figure 2. Types of shooting objects

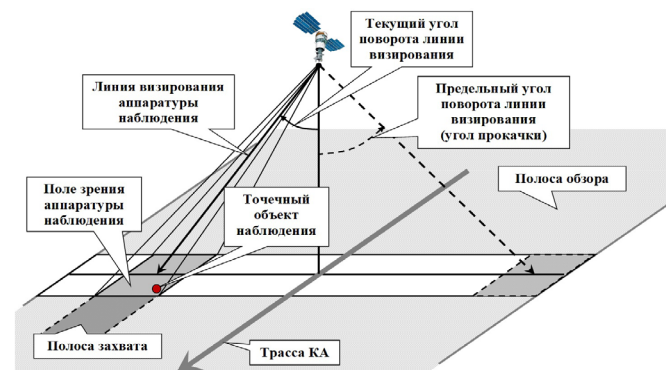


Рис. 3. Проверка возможности наблюдения

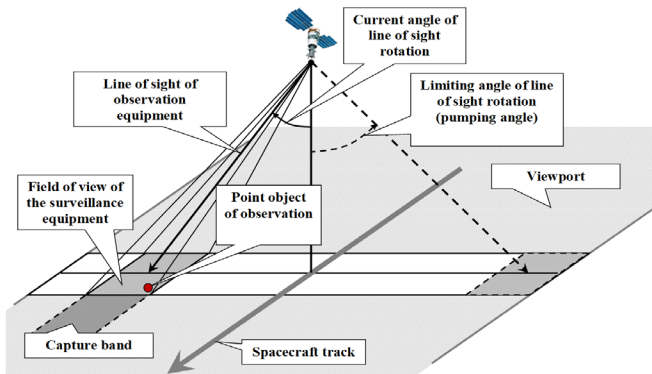


Figure 3. Checking the possibility of observation

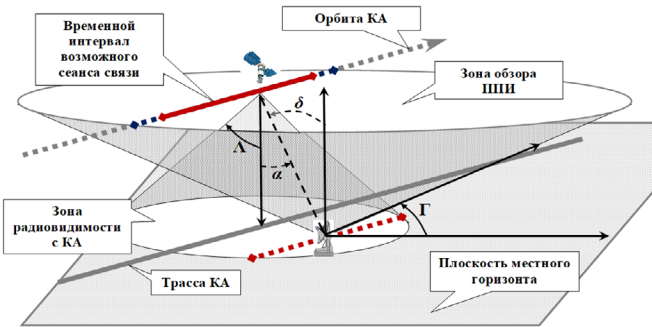


Рис. 4. Проверка возможности проведения сеанса связи КА ↔ ППИ

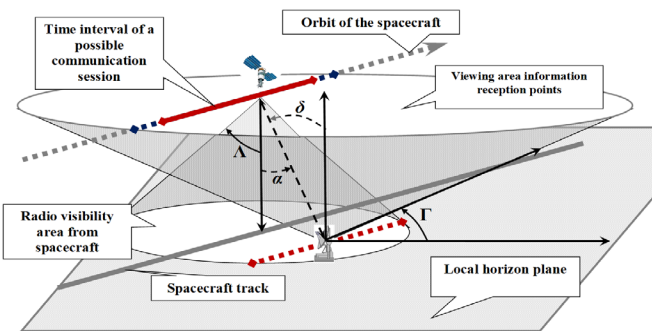


Figure 4. Checking the possibility of conducting a communication session Spacecraft ↔ information reception points

Для расчета ограничений на объем данных отдельно взятого КА можно принять модель динамики бортового запоминающего устройства, в которой занятый объем БЗУ увеличивается/уменьшается линейно по времени, скорость роста зависит от числа одновременно работающих камер, скорость сброса определяется производительностью передающей аппаратуры, а приращение занятого объема бортового запоминающего устройства (БЗУ) за счет съемки

одного объекта определяется суммарным объемом снимков одновременно задействованных камер.

Как было отмечено ранее обобщенная форма представления модели потока целевой информации космической системы ДЗЗ может быть представлена как взаимосвязанная последовательность функций изменения объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функций изменения трафика).

Формально каждый элемент рассматриваемой системы представляется как функция преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию, при одновременном вычислении показателей эффективности: времени, необходимого для выполнения процесса; условной стоимости обработки. И проверке ограничений: на максимальное количество одновременно выполняющихся однотипных процессов; на максимальный общий объем памяти.

В рамках такой формализации для космических аппаратов, наземных пунктов и линий необходимо сформировать модель расчета объема выходной информации; модель расчета времени выполнения процесса; модель расчета стоимости.

Для оценки объема сбрасываемой с отдельного КА на ППИ информации (начального трафика) можно принять, что для каждого типа аппаратуры наблюдения имеется прямая связь между общей площадью района съемки, заданного в заявке, и объемом информации, передаваемым с каждого конкретного КА на ППИ. Эта связь может быть задана как в виде аналитической функции, так и таблично. Время выполнения процесса определяется как время, необходимое для передачи циклограммы работы на борт КА, для проведения съемки и передачи снимка на ППИ. Ограничением является объем БЗУ. Все эти параметры вычисляются с использованием математического аппарата, методика формирования которого представлена выше.

Для оценки затрат на обслуживание единичной заявки со стороны орбитального комплекса можно считать, что стоимость обслуживания одного КА в единицу времени $C_{уд}$ зависит от сложности КА — $Q_{КА}$ и затрат на оплату труда операторов смены. Тогда оценку стоимости обслуживания заявки $C_{iqКА}$ одним КА можно рассчитать по формуле [2—4]

$$C_{jq \text{ КА}} = (C_{уд}(Q_{ка}) + C_{оп} \cdot N_{оп}) \cdot (t_{пд2} - t_0),$$

где $C_{оп}$ — стоимость чел.-ч в конкретном ППИ; $N_{оп}$ — число операторов в смене. Параметр $C_{уд}(Q_{ка})$, входящий в эмпирическую формулу, существенно зависит от уровня развития техники и нуждается в периодическом уточнении на основании обработки статистических данных по различным КА. Также возможно более упрощенное, табличное представление уравнения для стоимости обслуживания заявки.

Для оценки изменения объема информации при применении к ней процесса обработки будем считать, что имеется прямая связь между объемом входной и выходной информации. Эта связь может быть задана как в виде аналитической функции, так и таблично. Тогда общее время выполнения процесса рассчитывается по формуле [2—4]

$$T_{проц i} = K_{ппи} \cdot T_{эталон.проц i}(V_{вх}) + T_{ожидания}, \quad (1)$$

где $T_{ожидания}$ — время ожидания до момента освобождения ресурсов в следующем узле, когда для каждого момента времени выполнения процесса выполняются условия: количество одновременно запущенных однотипных процессов на каждом наземном пункте строго меньше заданного $V_{вх} + V_{вых} < V_{своб}$; объем входной и выходной информации не превышает уровня объема свободной памяти $N_{проц} \leq N_{проц max}$; $T_{эталон.проц i}$ — эталонное время выполнения процесса в эталонном наземном пункте, зависящее от объема входной информации; $K_{ппи}$ — коэффициент производительности наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных.

Возможно также более упрощенное представление расчета времени в виде таблицы.

Для оценки затрат на обслуживание процесса при обработке единичной заявки со стороны наземного пункта можно принять, что стоимость обслуживания процесса в единицу времени $C_{проц.уд}$ зависит от его сложности — $Q_{проц}$ и затрат на оплату труда задействованных операторов. Тогда для стоимости обслуживания заявки $C_{iqпроц}$ одним ППИ будем иметь

$$C_{jq \text{ проц}} = (C_{проц.уд}(Q_{проц}) + C_{оп} \cdot N_{оп}) \cdot C_{ппи} \cdot T_{эталон.проц i},$$

где $C_{оп}$ — стоимость чел.-ч в конкретном наземном пункте; $N_{оп}$ — число операторов, задействованных в процессе обработки; $C_{ппи}$ — коэффициент себестоимости наземного пункта, в котором выполняется процесс обработки данных.

Возможно более упрощенное представление расчета стоимости в виде таблицы.

Представленный подход к формированию математических моделей позволяет определить способы их дальнейшей программной реализации. При этом должна быть учтена необходимость обеспечения возможности оперативного внесения изменений как в форму представления, так и в параметры модели. Механизмы, которые обеспечат такую возможность, формируются одним из нижеперечисленных способов:

1. Текстовой формулой в синтаксисе языка программирования, например:

$$V_{вых} = \text{sqrt}(V_{вход}).$$

В этом случае в параметры правой части формулы помимо $V_{вход}$ могут входить как длительность процесса, так и общие константы.

2. В виде полинома, например:
 $V_{вых} = aV_{вход}^2 + bV_{вход} + c$, где коэффициенты a, b, c задаются экспертами.

3. Таблично.

4. Внешней вычислительной библиотекой, если расчет показателей связан с привлечением сложной вычислительной процедуры.

2. Описание системы взаимосвязанных математических моделей

Модель процесса обработки информации космическим сегментом представляется в виде функции генерации трафика, входом которой являются параметры заявки потребителя. Результатом применения модели является величина информации, которая после проведения сеанса связи попадает для дальнейшей обработки в НКПОР. В процессе вычислений определяются показатели эффективности — время и стоимость [3].

Для расчета времени и стоимости обслуживания заявки космическим сегментом должны быть сформированы:

— модель эволюции орбиты КА ДЗЗ;

— модель прогноза возможных интервалов коррекции КА для поддержания номинальных параметров орбит (стратегии коррекций);

— модель прогноза возможных интервалов времени циклов включения/выключения аппаратуры наблюдения;

— модель прогноза возможных интервалов времени для сброса полученной информации на ППИ.

Для модели съемки земных объектов должны быть сформированы [2]:

— модель съемочного плана, включающая в себя: модели объектов съемки, модели для проверки выполнения условий съемки и модель временных последовательностей выполнения съемочных операций;

— модель съемки точечных объектов;

— модель съемки площадных объектов, сформированная на основе аппроксимации объекта съемки как в виде замкнутого полигона, так и в виде совокупности точечных объектов.

Модель передачи целевой информации между КА и ППИ в общем случае служит для определения интервалов взаимной видимости ППИ → КА и КА → ППИ.

Совокупность моделей целевого функционирования аппаратуры бортового информационного

комплекса КА составляют модель динамики состояния БЗУ и модели переориентации бортовой съемочной аппаратуры. Для модели изменения памяти в БЗУ можно считать, что в процессе съемки занятый объем БЗУ увеличивается линейно по времени, в процессе сброса — уменьшается также линейно по времени. Скорость роста зависит от числа одновременно работающих камер, скорость сброса определяется производительностью передающей аппаратуры. Приращение занятого объема БЗУ за счет съемки одного объекта определяется суммарным объемом снимков одновременно задействованных камер.

При выполнении съемки земных объектов бортовая съемочная аппаратура КА изменяет свою ориентацию. Переориентация аппаратуры совершается равномерно, скорость переориентации представляет собой кусочно-постоянную функцию, участки которой определяются парами последовательных моментов съемки земных объектов.

В результате время, необходимое для проведения съемки по заявке, определяется как совокупность суммарного времени проведения съемки, времени, необходимого для переориентации аппаратуры наблюдения, и времени, необходимого для того, чтобы КА

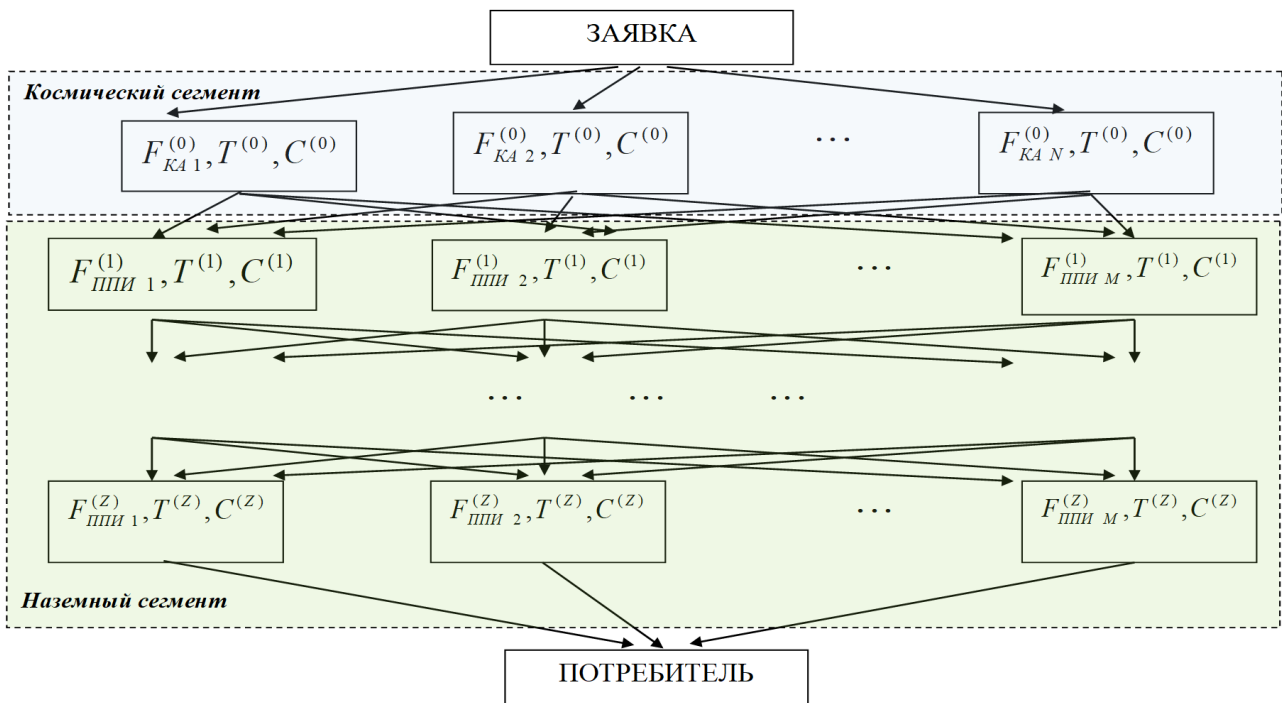


Рис. 5. Граф возможных вариантов выполнения заявки

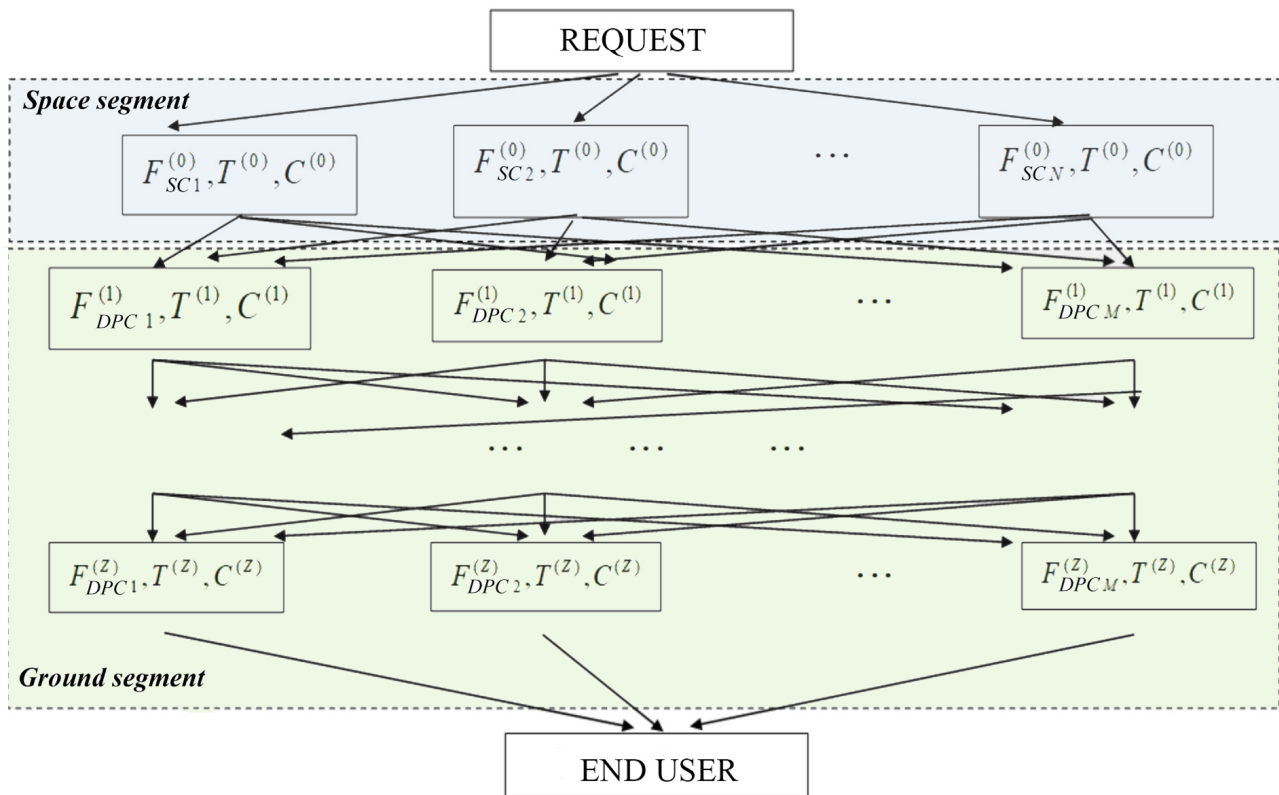


Figure 5. Graph of possible options for executing an order

оказался в зоне взаимной радиовидимости с одним из ППИ, при условии, что:

- КА в это время не совершает корректирующие маневры;
- объема памяти БЗУ достаточно для сохранения снимка объекта съемки на протяжении всего интервала наблюдений.

В конечном итоге каждый элемент рассматриваемой системы формально представляется как функция преобразования объема входной информации в объем выходной информации инвариантно к ее тематическому содержанию, при одновременном вычислении показателей эффективности:

- времени, необходимого для выполнения процесса;
- условной стоимости обработки и проверке ограничений;
- на максимальное количество одновременно выполняющихся однотипных процессов;
- на максимальный общий объем памяти.

Таким образом, возникает полностью определенная задача оптимизации распределения процессов обработки с учетом возможности вычисления представленных выше системных показателей или их свертки, при наличии текущих ограничений. Эта задача может быть интерпретирована как задача оптимизации маршрута на взвешенном графе (рис. 5) [4].

3. Общий подход к решению оптимизационной задачи

Как следует из постановки, задача оптимального распределения целевой информации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям системы является двухкритериальной. В связи с тем, что число критериев невелико, для ее решения можно воспользоваться классическим математическим аппаратом многокритериальной оптимизации [19—20], предварительно адаптировав их к условиям функционирования. Это позволит определить и выработать наиболее предпочтительные варианты распределения целевой инфор-

мации с разнотипных КА ДЗЗ по составным частям системы. Таким образом, целью является принятие решений в условиях многокритериальной неопределенности, позволяющей

- рассматривать множество всех допустимых способов учета неопределенности;
- формировать комплексную оценку решений в условиях неопределенности, используя любые известные и неизвестные свертки;
- рассматривать как количественные, так и качественные критерии;
- использовать интервальные оценки частных критериев;
- не задавать весовые коэффициенты (они считаются неопределенными);
- устанавливать предпочтения между отдельными критериями.

В случае, если число процессов и доступных ППИ для обработки заявки невелико, задача оптимального распределения может быть решена методом перебора. Кроме того, возможно применение одного из классических методов:

- метод сведения к однокритериальной задаче с использованием линейной свертки критериев;
- метод поиска Парето-оптимальных решений;
- метод последовательных назначений;
- метод случайной оптимизации.

В нашем случае, когда число критериев минимально и равно двум, по-видимому, наиболее эффективным вариантом служит представление всего множества Парето в виде графика, что позволяет проанализировать последствия всех возможных эффективных решений. Это не обеспечивает полного решения задачи, так как по-прежнему остается множество альтернатив, для которых необходимо выбрать единственное наилучшее. Один из современных путей развития Парето-оптимальных методов многокритериальной оптимизации состоит в том, чтобы предоставить возможность опираться на все множество допустимых способов учета неопределенности, что, однако, требует больших вычислительных ресурсов. Такой подход может быть реализован с использованием метода уверенных суждений [19—20].

Изучение частных методов и алгоритмов решения задачи позволяет выработать единый методический подход к их решению. Во-первых, можно заметить, что предлагаемые для решения численные методы

и алгоритмы являются стандартными при минимальной адаптации к рассматриваемой предметной области, что позволяет достаточно легко выполнить их программную реализацию.

Во-вторых, предложенная формализация моделей процессов обработки заявки также иллюстрирует общность в способах их формирования и программной реализации.

Наконец, в-третьих, реализация последовательности «модель–алгоритм–оптимизация» также свидетельствует о возможности выработать единый методический подход, в основе которого предлагается последовательное выполнение четырех основных этапов вычислений (расчетов), укрупненная блок-схема которых представлена на рис. 6.

Первый этап — моделирование динамики орбитальной группировки КА ДЗЗ. Целью является исследование взаимного расположения космических аппаратов и ППИ на всем интервале планирования. Определяется множество интервалов времени, доступных для проведения сеансов съемки и приема-передачи информации с учетом эволюции орбит и необходимости вывода КА на техническое обслуживание. Рассчитываются параметры для управления бортовой целевой аппаратурой.

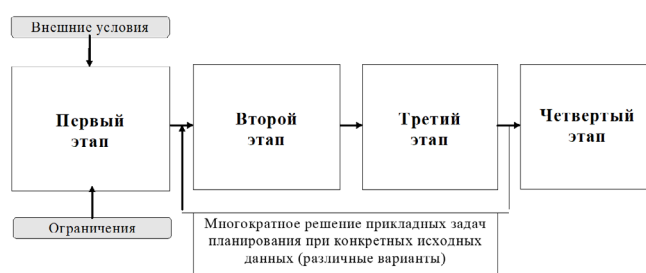


Рис. 6. Схема формирования и использования математических моделей

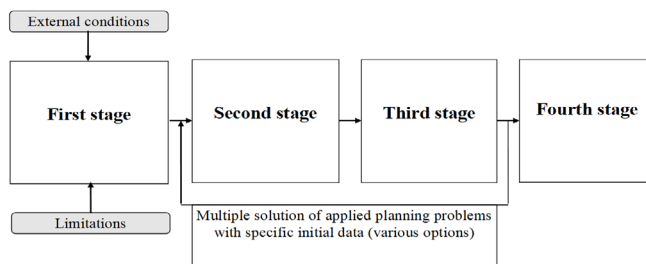


Figure 6. Scheme of the formation and use of mathematical models

Исходными данными являются:

- параметры орбиты КА;
- характеристики целевой аппаратуры;
- циклограммы работы отдельно взятых КА ОГ

ДЗЗ;

- информация о НКПОР (географическое расположение, зоны радиовидимости ППИ и др.).

К внешним условиям относятся:

- условия освещенности и наличие теней в районе съемки;
- облачность в районе съемки;
- совместимость радиочастотных диапазонов приема-передачи информации и др.

Необходимо отметить, что для проведения исследований необходимо использовать:

- упрощенные модели, которые позволяют интегрировать уравнения движения как без учета внешних управляющих воздействий, так и при использовании наиболее значимых;
- полные модели, учитывающие весь спектр возмущений, для расчетов орбитального движения КА на длительных интервалах времени вплоть до периода их активного существования.

Результатом *первого этапа* являются:

- возможные интервалы времени проведения съемки и их продолжительность;
- возможные интервалы проведения сеансов связи с наземными ППИ, их продолжительность и объем информации;
- условная стоимость реализации процесса съемки как параметров заявки потребителя.

Второй этап — формирование модели КА и элементов НКПОР как взаимосвязанных составных частей функционирования космической системы ДЗЗ, представляющей собой модель планирования с учетом специфики сценария ее целевого функционирования и постановки оптимизационной задачи. На этом этапе используются и обобщаются результаты выполнения предыдущего этапа в виде параметров математической модели.

Такая модель служит основой для реализации процедуры формирования (поиска) плана целевого функционирования. Элементы модели, по существу, выражают значения показателей эффективности выполнения целевых операций КА системы (см. п. 1.4), а также возможность или отсутствие возможности

потенциальных переходов между двумя последовательными процессами с учетом имеющихся ограничений.

Третий этап — решение задачи оптимизации распределения целевой информации по элементам (узлам) системы. Проводится синтез временной последовательности выполнения операций на основе модели первого и второго этапа. Следует отметить, что на данном этапе допускается возможность существования нескольких (или множества) планов, что особенно характерно для задач многокритериальной оптимизации.

Реализовать процедуру формирования оптимального плана можно с применением одного из классических, например, рассмотренных выше методов либо специально разработанных методов оптимизации.

Результатом выполнения рассматриваемого этапа методического подхода является один (или набор) оптимальных (близких к оптимальному) планов распределения целевой информации по узлам системы.

Четвертый этап — многократное решение задачи распределения потоков информации в целях проведения системных исследований. На этом этапе осуществляется многократное решение задачи управления при различных вариантах исходных данных, в качестве которых могут выступать параметры орбит КА ОГ ДЗЗ, характеристики бортовой аппаратуры КА, параметры и расположение элементов НКПОР, требования потребителей к результатам тематической обработки и т.д. Результаты многократного решения задачи позволяют выявить зависимости показателей эффективности целевого функционирования при реализации предложенного программно-математического подхода, т.е. провести параметрический анализ целевого функционирования системы в целом.

Заключение

В статье на основе математической постановки оптимизационной задачи определен перечень взаимосвязанных математических моделей, требующих дальнейшей разработки. В совокупности эти модели описывают процесс обработки, в том числе определяют, что происходит с объемом информации, и вычисляют системные показатели эффективности — время, требуемое для реализации процесса и его условную стоимость. Это позволяет окончательно представить

модель обработки информации как взаимосвязанную последовательность функций изменения условного объема информации при применении к нему соответствующего процесса обработки (функция изменения трафика), а сама математическая постановка задачи может быть сведена к оптимизации маршрута прохождения заявки по графу. Таким образом, можно сказать, что предлагаемый подход к формированию и использованию математических моделей при решении прикладных задач оптимизации распределения потоков целевой информации является системным, а для доведения ее до практического использования необходимо формирование соответствующих численных методов, алгоритмов и программного обеспечения.

Список литературы

1. Selin V.A., Emelyanov A.A., Sizov O.S., Emelyanov K.S., Borisov A.V. Medium-resolution optical range space images: consumer expectations // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020. Т. 56. № 9. P. 1182—1189.
2. Емельянов А.А., Малышев В.В., Смольянинов Ю.А., Старков А.В. Управление потоками целевой информации при функционировании космической системы дистанционного зондирования Земли: монография. М.: Изд-во МАИ, 2020. 232 с.
3. Емельянов А.А., Малышев В.В., Нгуен Виет Хоай Нам, Старков А.В. Математическая модель функционирования наземного сегмента обработки данных ДЗЗ в части распределения процессов обработки // *Научно-технический вестник Поволжья*. 2018. № 2. С. 74—79.
4. Emelianov A.A., Grishantseva L.A., Zubkova K.I., Malyshev V.V., Nguyen Viet Hoai Nam, Starkov A.V., Zay Yar Win. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution // *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc. 2020. Vol. 170. P. 495—504.
5. Leun E.V., Leun V.I., Sysoev V.K., Zanin K.A., Shulepov A.V., Vyatlev P.A. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018. Vol. 944. P. 012073. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012073
6. Zanin K.A., Moskatinev I.V. Improvement of Methods for Evaluating the Resolving Power of a Space Synthetic Aperture Radar // *Solar System Research*. 2018. Vol. 52. No. 7. P. 666—672. doi: 10.1134/S0038094618070213.
7. Zay Yar Win, Malyshev V.V., Bobronnikov V.T., Starkov A.V. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit // *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc., 2020. Vol. 170. P. 433—442.
8. Malyshev V.V., Starkov A.V., Fedorov A.V. Orbital Corrections of Space Vehicles while Performing Dynamic Operations // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2013. Vol. 52. No. 2. P. 313—325. doi: 10.1134/S1064230713010085
9. Malyshev V.V., Starkov A.V., Zay Yar Win. The Decision of Problems of Evasion When Holding the Geostationary Satellites in the Neighborhood of The Reference Orbit // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 13-Special Issue, 2018. Vol. 10. P. 53—58.
10. Razoumny Y., Razoumny V., Kozlov P., Baranov A., Varatharajoo R. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure // *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. 2016.
11. Baranov A.A., Razoumny V.Y., Razoumny Y.N., Malyshev V.V. Low orbit spacecraft service planning // *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. 2017. P. 835—844.
12. Baranov A.A., Grishko D.A., Mayorova V.I. The features of constellations' formation and replenishment at near circular orbits in non-central gravity fields // *Acta Astronautica*. November–December, 2015. Vol. 116. P. 307—317.
13. Krasil'shchikov M.N., Malyshev V.V., Fedorov A.V. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. I. Formalization of control problem // *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2015. Vol. 54(6). P. 916—930. doi: 10.1134/S1064230715060118
14. Voiskovskii A.P., Krasil'shchikov M.N., Malyshev V.V., Fedorov A.V. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. II. Synthesis of control algorithms // *Journal of computer and systems sciences international*. 2016. Vol. 55 (6). P. 948—968. doi: 10.1134/S1064230716060113
15. Petukhov V.G. Application of the Angular Independent Variable and Its Regularizing Transformation in the Problems of Optimizing Low-Thrust Trajectories // *Cosmic Research*. 2019. Vol. 57 (5). P. 351—363. doi: 10.1134/S001095251905006X
16. Ivanyukhin A.V., Petukhov V.G. Low-Energy Sub-Optimal Low-Thrust Trajectories to Libration Points and Halo-Orbits // *Cosmic Research*. 2019. Vol. 57 (5). P. 378—388. doi: 10.1134/S0010952519050022
17. Petukhov V.G., Ivanyukhin A.V., Sang Wook W. Joint Optimization of Control and Main Trajectory and Design Parameters of an Interplanetary Spacecraft with an Electric Propulsion System // *Cosmic Research*. 2019. Vol. 57 (3). P. 188—203. doi: 10.1134/S0010952519030079
18. Grechkoseev A.K., Krasil'shchikov M.N., Kruzhkov D.M., Mararescul T.A. Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft: Concept and Information Technologies //

J. Comput. Syst. Sci. Int. 2020. Vol. 59 (4). P. 598—608. doi: 10.1134/S1064230720040061

19. Golubev S.I., Malyshev V.V., Piyavskii S.A., Sypalo K.I. Decision making in multicriteria problems at the image design stage of aviation rocket technique // J. Comput. Syst. Sci. Int. 2020. Vol. 59 (2). P. 223—231. doi: 10.1134/S1064230720020057

20. Brusov V.S., Korchagin P.O., Malyshev V.V., Piyavsky S.A. Advanced «Confident Judgments» Method when Choosing Multicriteria Solutions in a Multipurpose Approach // J. Comput. Syst. Sci. Int. 2020. Vol. 59 (1). P. 83—94. doi: 10.1134/S1064230720010049

References

1. Selin VA, Emelyanov AA, Sizov OS, Emelyanov KS, Borisov AV. Medium-resolution optical range space images: consumer expectations. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2020;56(9):1182—1189. doi: 10.1134/S0001433820090224

2. Emel'yanov AA, Malyshev VV, Smol'yaninov YuA, Starkov AV. *Upravlenie potokami celevoj informacii pri funkcionirovanii kosmicheskoy sistemy distancionnogo zondirovaniya Zemli [Control of target information flows in the functioning of the space system of remote sensing of the Earth: Monograph]*. Moscow: MAI-PRINT Publ.; 2020. (In Russ.)

3. Emelyanov AA, Malyshev VV, Nguyen VHN, Starkov AV. Mathematical model of functioning of the ground segment in distributed remote sensing data processing. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Bulletin of the Volga Region]*. 2018;2:74—79. (In Russ.)

4. Emelianov AA, Grishantseva LA, Zubkova KI, Malyshev VV, Nguyen VHN, Starkov AV, Zay YW. Mathematical model of ERS data processing ground segment operation in terms of processing distribution. *Advances in the Astronautical Sciences* (vol. 170). CA, USA: Univelt Inc.; 2020. p. 495—504.

5. Leun EV, Leun VI, Sysoev VK, Zanin KA, Shulepov AV, Vyatlev PA. The active control devices of the size of products based on sapphire measuring tips with three degrees of freedom. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2018;944:012073. doi: 10.1088/1742-6596/944/1/012073

6. Zanin KA, Moskatinev IV. Improvement of Methods for Evaluating the Resolving Power of a Space Synthetic Aperture Radar. *Solar System Research*. 2018;52(7):666-672. doi: 10.1134/S0038094618070213

7. Zay Yar Win, Malyshev VV, Bobronnikov VT, Starkov AV. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit. *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc. 2020;170:433—442.

8. Malyshev VV, Starkov AV, Fedorov AV. Orbital Corrections of Space Vehicles while Performing Dynamic

Operations. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2013.52(2):313—325. doi: 10.1134/S1064230713010085

9. Malyshev VV, Starkov AV, Zay Yar Win. The Decision of Problems of Evasion When Holding the Geostationary Satellites in the Neighborhood of The Reference Orbit. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 13-Special Issue, 2018;10:53—58.

10. Razoumny Y, Razoumny V, Kozlov P, Baranov A, Varatharajoo R. Method of optimization of the servicing space-based system orbits and detached units maneuvers parameters in the problem of on-orbit-servicing of the given multi-satellite space infrastructure. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC*. 2016.

11. Baranov AA, Razoumny VY, Razoumny YN, Malyshev VV. Low orbit spacecraft service planning. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC68*. 2017:835—844.

12. Baranov AA, Grishko DA, Mayorova VI. The features of constellations' formation and replenishment at near circular orbits in non-central gravity fields. *Acta Astronautica*. November–December 2015;116:307—317.

13. Krasil'shchikov MN, Malyshev VV, Fedorov AV. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. I. Formalization of control problem. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2015;54(6):916—930. doi: 10.1134/S1064230715060118

14. Voiskovskii AP, Krasil'shchikov MN, Malyshev VV, Fedorov AV. Autonomous implementation of dynamic operations in a geostationary orbit. II. Synthesis of control algorithms. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2016;55(6):948—968. doi: 10.1134/S1064230716060113

15. Petukhov VG. Application of the Angular Independent Variable and Its Regularizing Transformation in the Problems of Optimizing Low-Thrust Trajectories. *Cosmic Research*. 2019; 57(5);351—363. doi: 10.1134/S001095251905006X

16. Ivanyukhin AV, Petukhov VG. Low-Energy Sub-Optimal Low-Thrust Trajectories to Libration Points and Halo-Orbits. *Cosmic Research*. 2019;57(5):378-388. doi: 10.1134/S0010952519050022

17. Petukhov VG, Ivanyukhin AV, Sang Wook W. Joint Optimization of Control and Main Trajectory and Design Parameters of an Interplanetary Spacecraft with an Electric Propulsion System. *Cosmic Research*. 2019;57(3):188-203. doi: 10.1134/S0010952519030079

18. Grechkoseev AK, Krasil'shchikov MN, Kruzhkov DM, Mararescul TA. Refining the Earth Orientation Parameters Onboard Spacecraft: Concept and Information Technologies. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(4):598—608. doi: 10.1134/S1064230720040061

19. Golubev SI, Malyshev VV, Piyavskii SA, Sypalo KI. Decision making in multicriteria problems at the image design

stage of aviation rocket technique. *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(2):223–231. doi: 10.1134/S1064230720020057 *J. Comput. Syst. Sci. Int.* 2020;59(1):83–94. doi: 10.1134/S1064230720010049

20. Brusov VS, Korchagin PO, Malyshev VV, Piyavsky SA. Advanced «Confident Judgments» Method when Choosing Multicriteria Solutions in a Multipurpose Approach.

Сведения об авторах

Старков Александр Владимирович, профессор кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), доктор технических наук; Scopus Author ID: 56205648500, eLIBRARI SPIN-код: 5242-3413; e-mail: starkov@goldstar.ru

Емельянов Андрей Александрович, начальник Научного центра оперативного мониторинга Земли — заместитель директора проектов по созданию систем дистанционного зондирования Земли, акционерное общество «Российские космические системы», кандидат технических наук; Scopus Author ID: 57214857574, eLIBRARI SPIN-код: 4484-1479; e-mail: ntsomz@ntsomz.ru

Гришанцева Любовь Александровна, начальник сектора Научного центра оперативного мониторинга Земли, акционерное общество «Российские космические системы», кандидат физико-математических наук; eLIBRARI SPIN-код: 9940-8756; e-mail: grishantseva_la@ntsomz.ru

Жуковская Ксения Ивановна, инженер-исследователь 1 категории Научного центра оперативного мониторинга Земли, акционерное общество «Российские космические системы»; eLIBRARI SPIN-код: 4805-5960; e-mail: zubkova.k@ntsomz.ru

Морозов Александр Андреевич, инженер-исследователь 3 категории Научного центра оперативного мониторинга Земли, акционерное общество «Российские космические системы»; e-mail: aamorozko@mail.ru

Тришин Алексей Александрович, студент кафедры информационно-управляющих комплексов летательных аппаратов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: trishin0202@mail.ru

About the authors

Alexander V. Starkov, Professor of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Doctor of Technical Sciences; Scopus Author ID: 56205648500, eLIBRARI SPIN-code: 5242-3413; e-mail: starkov@goldstar.ru

Andrey A. Emelyanov, Head of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems, Candidate of Technical Sciences; Scopus Author ID: 57214857574, eLIBRARI SPIN-code: 4484-1479; e-mail: ntsomz@ntsomz.ru

Lyubov A. Grishantseva, Head of the Sector of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems, Candidate of Physical and Mathematical Sciences; eLIBRARI SPIN-code: 9940-8756; e-mail: grishantseva_la@ntsomz.ru

Ksenia I. Zhukovskaya, Research Engineer of the 1st Category of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems; eLIBRARI SPIN-code: 4805-5960; e-mail: zubkova.k@ntsomz.ru

Alexander A. Morozov, Research Engineer of the 3rd category of the Research Center for Earth Operative Monitoring, Russian Space Systems; e-mail: aamorozko@mail.ru

Alexey A. Trishin, Student of the Department of Information and Control Systems of Aircraft, Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: trishin0202@mail.ru




DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-162-171

УДК 621.9

Научная статья / Research article

Анализ влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя при точении композиционного материала на основе терморасширенного графита

И.С. Михеенко, А.А. Смелик, С.А. Егоров , В.В. Черняк

Военный инновационный технополис ЭРА,
Российская Федерация, 353456, Анапа, Пионерский пр., д. 41
 E-mail: columbia1996@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 02 августа 2020 г.

Доработана: 31 сентября 2020 г.

Принята к публикации: 04 ноября 2020 г.

Аннотация. Существующая на сегодняшний день тенденция замены металлических сплавов композиционными материалами при изготовлении различных типов подшипников скольжения, уплотнительных элементов сборочных единиц, антифрикционных втулок и прочих деталей машин является одной из перспективнейших направлений, влияющих на развитие различных отраслей промышленности. Однако при изготовлении из композиционных материалов изделий современными методами, такими как экструзия, прессование, литье под давлением, возникают различного рода дефекты, характерные для данных видов обработки, вследствие чего не всегда возникает возможность получить надлежащее качество рабочих поверхностей деталей, а отсюда вытекает необходимость вводить дополнительную механическую обработку, от результата выполнения которой зависит долговечность узлов и изделий в целом. В статье проанализированы основные параметры, влияющие на качество получаемой поверхности при токарной обработке для металлических сплавов, а также для композиционных материалов. Разработана методика получения заготовок методом прессования из рассматриваемого композиционного материала, сконструирована и изготовлена необходимая для проведения исследования технологическая оснастка, построен план проведения по принципу полнофакторного эксперимента с созданием модели в программе Mathcad, осуществлен активный эксперимент по определению влияния параметров режимов резания на шероховатость поверхности. Представлены результаты исследования, на основании которых сделаны выводы о зависимости различных параметров резания на качество поверхностного слоя, определены нюансы токарной обработки рассматриваемого композиционного материала, даны практические рекомендации, которые положительно повлияют на время и успешность внедрения изготовления деталей из данного композиционного материала.

Ключевые слова: композиционные материалы, токарная обработка, режимы резания, терморасширенный графит, шероховатость поверхности

Для цитирования

Михеенко И.С., Смелик А.А., Егоров С.А., Черняк В.В. Анализ влияния режимов резания на шероховатость поверхностного слоя при точении композиционного материала на основе терморасширенного графита // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 162–171. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-162-171

© Михеенко И.С., Смелик А.А., Егоров С.А., Черняк В.В., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Analysis of the influence of cutting conditions on the roughness of the surface layer when machining a composite material based on thermally expanded graphite

Ivan S. Mikheenko, Anatoly A. Smelik, Semen A. Yegorov✉,
Vladislav V. Chernyak

Military Innovative Technopolis ERA,
41 Pionersky Ave., Anapa, 353456, Russian Federation
✉ E-mail: columbia1996@mail.ru

Article history

Received: August 02, 2020

Revised: September 31, 2020

Accepted: November 04, 2020

Abstract. The current trend of replacing metal alloys with composite materials in the manufacture of various types of plain bearings, sealing elements of Assembly units, anti-friction bushings, and other machine parts is very promising for the development of many industries. However, in the manufacture of composite material products by modern methods, such as extrusion, pressing, and injection molding, various types of defects characteristic of these types of processing occur, resulting in the required parameters of the quality of the working surfaces of parts are not provided. This leads to the need for additional mechanical processing the quality of which largely depends on the reliability and durability of the functioning of parts and mechanisms. The article analyzes the main parameters that affect the quality of the surface obtained during turning for metal alloys, as well as for composite materials. The method of obtaining blanks by pressing from the material under consideration was developed, the technological equipment necessary for the research was designed and manufactured, a plan was developed for conducting a full-factor experiment with the creation of a model in the Mathcad program, and an active experiment was carried out to determine the influence of cutting mode parameters on surface roughness. Given the results of the study on the basis of which conclusions about the dependence of various cutting parameters on the quality of the surface layer, defined by the nuances of turning the considered composite material, practical recommendations that will positively affect the timing and success of implementation of fabrication of parts from this material.

Keywords: composite materials, turning, cutting modes, thermally expanded graphite, surface roughness

For citation

Mikheenko IS, Smelik AA, Yegorov SA, Chernyak VV. Analysis of the influence of cutting conditions on the roughness of the surface layer when machining a composite material based on thermally expanded graphite. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):162–171. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-162-171

Введение

Спектр специфичных свойств, которыми обладают композиционные материалы (КМ), объясняет значительное отличие процессов их механической обработки от резания металлических сплавов, но при этом на производительность, а также эффективность процесса оказывают значительное влияние режимы обработки, геометрия режущего инструмента. Зачастую при определении оптимальных параметров, характеризующих процесс резания, для достижения максимально возможной производительности и требуемого качества

поверхностного слоя возникают затруднения ввиду недостаточных данных в литературе и опыта обработки традиционных конструкционных материалов.

Таким образом, повышение эффективности механической обработки композиционных материалов является актуальной задачей, так как при ее решении удастся повысить качественные характеристики изготавливаемой продукции, снизить себестоимость ее изготовления, а также значительно увеличить номенклатуру изделий из данных материалов.

1. Влияние режимов резания на шероховатость поверхности металлов

На качество обработанной поверхности, в частности шероховатость, деталей влияют многие технологические факторы. При лезвийной обработке проявляется влияние режимов, используемый режущий инструмент, схема обработки на направление, форму, величину неровностей. Наиболее существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывают такие параметры режимов резания, как подача и скорость резания. Наличие таких дефектов, как налипание на режущий инструмент обрабатываемого материала, выкрашивание слоев детали, расположенных под режущей кромкой инструмента, выламывание частиц, характерных для хрупких материалов, определяет скорость резания.

Наиболее высокие параметры шероховатости достигаются при скорости резания порядка 15...30 м/мин. Этот эффект происходит по причине налипания материала на переднюю поверхность резца — наростообразования. При увеличении скорости вращения шпинделя наростообразование прекращается из-за повышения температуры в зоне резания и величина шероховатости уменьшается. Для материалов не склонных к наростообразованию, более хрупких, скорость главного движения резания не влияет на величину шероховатости [1].

При достаточной жесткости глубина срезаемого слоя не оказывает существенного влияния на величину микронеровностей. Глубина должна обеспечивать полное снятие дефектного слоя от предыдущего метода обработки детали или заготовки.

Существенное влияние при механической обработке на шероховатость оказывают структура и свойства обрабатываемой поверхности. Пластичные, более вязкие, такие как обычные малоуглеродистые стали, материалы после обработки обладают относительно высокими параметрами шероховатости. Более хрупкие, твердые материалы выходят после обработки с более «чистой» поверхностью. Это связано с отсутствием эффекта наростообразования. После механической обработки автоматные стали, с повышенным содержанием серы, а также материалы с присадкой свинца, имеют более высокий класс шероховатости, нежели углеродистая сталь, обработанная в одинаковых с ними условиях [2].

Подача — параметр режима резания, определяющий производительность процесса обработки. При назначении подачи на чистовых проходах опираются на показатель шероховатости, требующийся согласно конструкторской документации. При повышении подачи шероховатость растет, точность обработанной поверхности падает ввиду роста температуры в зоне резания, увеличения силы резания, роста контактных напряжений. Помимо ухудшения качества поверхностного слоя, при увеличении подачи без снижения скорости резания негативно сказывается на стойкости режущего инструмента [3].

2. Резание полимерных композиционных материалов

Одним из основных параметров, определяющим процесс резания, является глубина резания, припуск на механическую обработку. Геометрическая точность размеров, качество поверхностного слоя, технологические условия обработки изделий — основные исходные данные для назначения глубины резания. При достаточной жесткости системы СПИД (станок, приспособление, инструмент, деталь) величина снимаемого слоя материала не влияет на шероховатость обработанной детали, но при значительном увеличении припуска качество поверхности ухудшается [4].

При выполнении литературного [4; 5; 6] обзора было установлено, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает подача режущего инструмента. Как и при обработке металлов и сплавов композиционные материалы, в том числе пластмассы, имеют большее количество поверхностных дефектов при увеличении подачи. Наиболее оптимальный вариант при точении уже исследованных образцов полимеров достигается при подаче, не превышающей 0,18—0,24 мм/об. При дальнейшем увеличении данного параметра наблюдается резкое ухудшение качества поверхностного слоя. Такие режимы резания могут быть назначены только для предварительного, чернового точения.

При проведении исследований по выявлению зависимости скорости вращения шпинделя на шероховатость [7] было выявлено, что данный параметр не оказывает значительного влияния. Высота микронеровностей находится в диапазоне одного класса

шероховатости. Но учитывая резкое различие свойств композиционных материалов, температурный фактор, сопровождающий процесс стружкообразования, существуют диапазоны скоростей резания, где шероховатость будет принимать максимальные и минимальные значения. Графики на рис. 1, 2 показывают зависимости скорости резания на шероховатость поверхностного слоя различных перспективных образцов материалов.

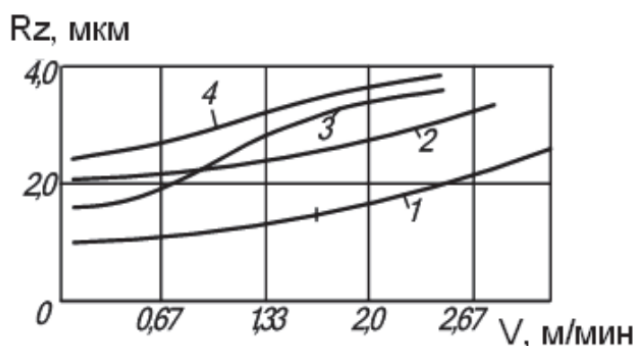


Рис. 1. Зависимость шероховатости поверхности стеклопластика от скорости резания: 1 – точение; 2 – фрезерование поперечное; 3 – сверление; 4 – фрезерование продольное

Figure 1. Dependence of the surface roughness of fiberglass on the cutting speed: 1 – turning; 2 – transverse milling; 3 – drilling; 4 – longitudinal milling

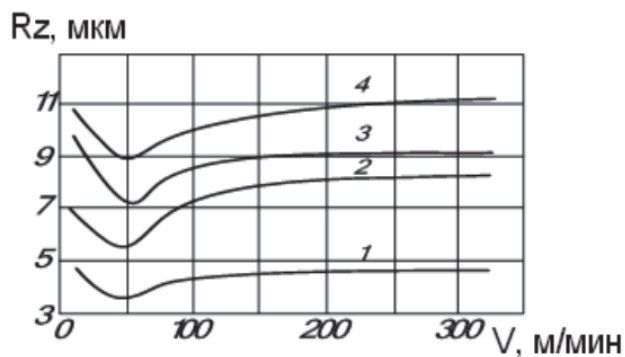


Рис. 2. Зависимость шероховатости обработанной поверхности скорости резания: 1 – органическое стекло; 2 – волокнит К-21–22; 3 – волокнит К-18–2; 4 – текстолит

Figure 2. Dependence of the roughness of the processed surface of the cutting speed: 1 – organic glass; 2 – fiber K-21–22; 3 – fiber K-18–2; 4 – textolite

3. Свойства и структура обрабатываемого материала

Графит представляет собой паркетный полимер, построенный из расположенных в одной плоскости атомов углерода [8]. Слоистой структурой обусловлена анизотропия свойств графита [9], склонность к охрупчиванию, также это объясняет, почему так легко можно поместить атомы или молекулы между слоями углерода. Согласно идеализированной кристаллической структуре, предложенной Берналом, атомы углерода в каждом слое располагаются точно над центром правильных гексагонов в соседнем верхнем слое [3; 8].

Терморасширенный графит (ТРГ) — материал, получаемый путем термического удара интеркалированных соединений графита. Процесс интеркалирования сводится к внедрению молекул и ионов серной кислоты в присутствии окислителя.

В промышленных условиях ТРГ в основном получают из пропитанного серной, азотной кислотой или их смесью чешуйчатого графита, который проводится через пламя печи. Происходит мгновенное испарение интеркалита, из-за чего интеркалированные чешуйки начинают крайне сильно и неконтролируемо расширяться. Получается состоящая из графитовых «червячков» разновидность «черного снега» (рис. 3), при этом ТРГ представляет собой углеродные пеноструктуры [10; 12].

Высокое сжатие ТРГ происходит при прокатывании, когда чешуйки ТРГ цепляются друг за друга изогнутыми сетками, между ними возникают связи Ван-дер-Ваальса, и после прокатки получается довольно прочный и гибкий лист или нить. Главное их достоинство — упругость [11; 12].

Терморасширенный графит обладает высокой химической стойкостью в большинстве сред, кроме сильных окислителей (в первую очередь, таких как олеум, концентрированные кислоты: серная, азотная и хромовая) при температурах: до 3000 °С — в инертной атмосфере, до 650 °С — на пару, до 550 °С — на воздухе, от –240 до +350 °С — в кислороде и т.д.; высокими упругими характеристиками: модуль Юнга при сжатии — от 100 до 200 МПа (на практике наблюдается зависимость от плотности); газопроницаемость перпендикулярно поверхности прокатки близка к нулю

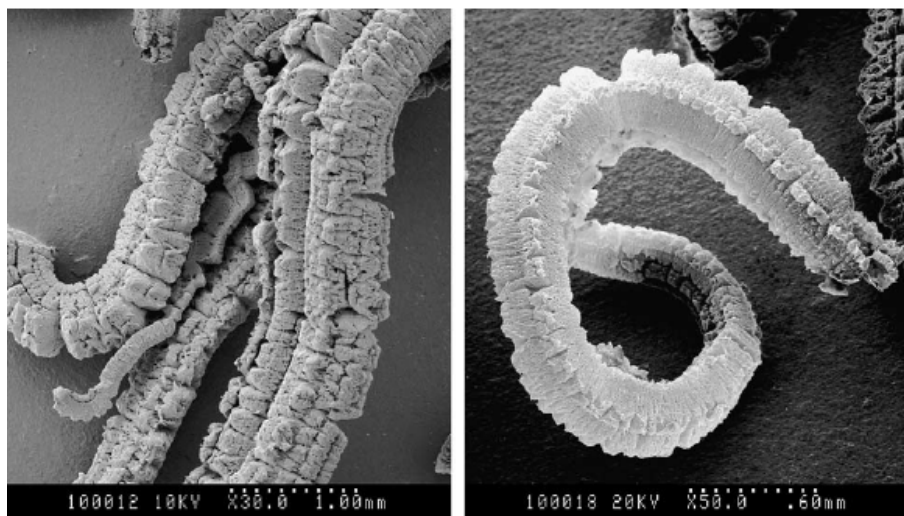


Рис. 3. Строение отдельных червячков ТРГ

Figure 3. Structure of individual worms of thermally expanded graphite

(порядка $10\text{—}6\text{ см}^3\cdot\text{см}/\text{см}^2\cdot\text{с}\cdot\text{атм. азота}$); электропроводность порядка $105\text{ (Ом}\cdot\text{м)}^{-1}$ [9; 12].

4. Получение образцов из композиционного материала на основе терморасширенного графита

Для проведения эксперимента по выявлению зависимости режимов резания на качество поверхностного слоя поверхности при обработке заготовок из КМ на основе ТРГ стоит задача получить образцы, габаритные размеры которых будут подходить для закрепления в токарном станке и обработки на длине, необходимой для оценки шероховатости.

На первом этапе КМ, находящийся в состоянии «черного снега» или «пуха», подлежит измельчению для получения требуемой насыпной плотности (примерно $14\text{ кг}/\text{м}^3$). Режимы и методика измельчения производится из результатов экспериментальных исследований (время измельчения 90 с. с периодически перемешиванием материала) [11].

Согласно исследованию [12] при увеличении времени измельчения насыпная плотность не увеличивается, размеры частиц графита не уменьшаются. Для измельчения использовалось устройство с гладкими спиралеобразными элементами (рис. 4).

Устройство, изображенное на рисунке, состоит из бункера 1, в который засыпается ТРГ, и двух спиралеобразных элементов 2.

В измельченный ТРГ добавляется кремнийорганическое связующее в пропорции 80 % ТРГ и 20 % связующего, далее перемешивается 30 мин по принципу «пьяная бочка». Экспериментальные данные, представленные в работе [12] показали, что данные пропорции, метод и время смешивания, а также продолжительность и способ измельчения обеспечивают наилучшие физико-механические свойства полученных из данного материала образцов.

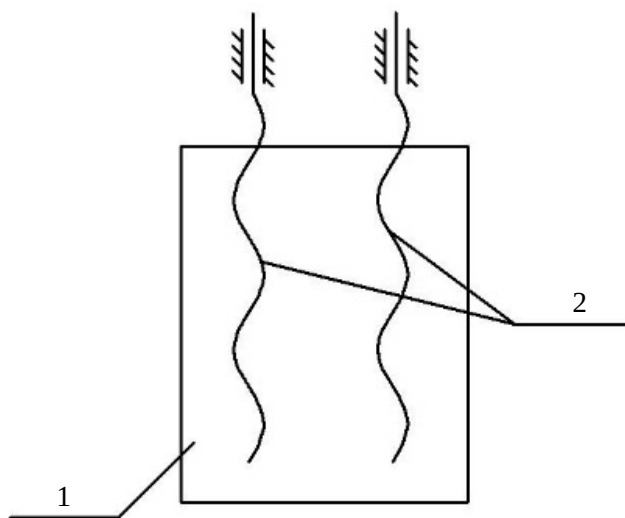


Рис. 4. Измельчитель

Figure 4. Shredder

Перемешанную смесь ТРГ и кремнийорганического связующего необходимо спрессовать с использованием специально собранной оснастки (рис. 5).

Оснастка состоит из двух труб 1, общая длина которых примерно 2,5 метра, диаметр отверстия 16 мм, разрезной втулки 2, соединяющей эти трубы. С одной стороны в трубу запрессовывается заглушка 5 с другой — засыпается смесь ТРГ с кремнийорганическим связующим и спрессовывается поршнем 3.

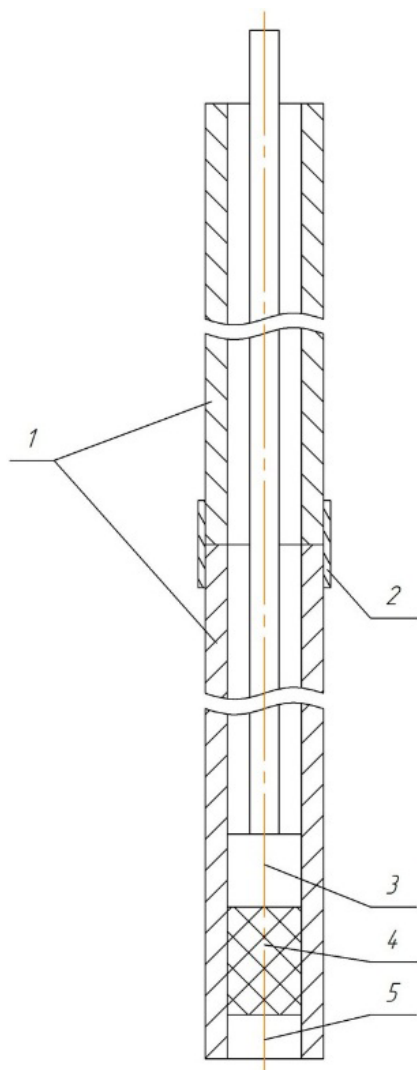


Рис. 5. Эскиз оснастки для прессования образцов
Figure 5. Sketch of equipment for pressing samples

Полученные образцы нагреваются в электрической печи СШОЛ со скоростью 1 °С/мин до температуры

200±10 °С и выдерживаются при этой температуре в течение 30 мин, а затем остывают вместе с печкой благодаря и придаются все свойства данного материала.

5. Методика проведения эксперимента

Эксперимент заключается в точении образцов из КМ на основе ТРГ при различных режимах, выбранных исходя из литературного обзора и результатов предварительных экспериментов, с целью установления зависимости каждого из параметров на показатель шероховатости обрабатываемой поверхности.

Эксперимент будет проводиться на универсальном станке 16К20, имеющем возможность закрепления резца с тензометрическим датчиком. Резец с тензометрическим датчиком был ранее протарирован при разработке компьютерной системы измерения силы резания. От тензометрического датчика выходной сигнал к тензостанции передается через провода, также ограничивающие выбор оборудования для проведения эксперимента.

Было принято решение зажимать образцы в специальной оснастке, действующей по принципу цангового патрона, установленную в трехкулачковый патрон, для исключения местных нагрузок и, как следствие, разрушения заготовок.

После закрепления образцов перед точением на режимах, выбранных для проведения эксперимента, выполняем проточку каждого образца до $\varnothing 15 \pm 0,05$ для обеспечения повторяемости, минимизации погрешности, связанной с разной геометрией, биением образцов.

Контроль шероховатости на обработанных образцах будет производиться при помощи профилографа MarSurf Perthometer S2. Прибор предназначен для измерения и оценки параметров шероховатости поверхности различных машиностроительных и приборостроительных деталей с точностью до 0,8 нм. Профилограф позволяет оценивать параметры шероховатости по ГОСТ 2789—73, а также по ISO 3274.

6. Планирование экспериментальных исследований

Планирование эксперимента — это процедура выбора числа и условий проведения опытов, необходимых и достаточных для решения поставленной

задачи с требуемой точностью. Поиск оптимальных условий является одной из наиболее распространенных научно-технических задач [13].

В качестве параметров оптимизации была принята шероховатость поверхности, измеряемая параметром Ra (мкм), оказывающим существенное влияние на качество поверхности детали, ее функциональные возможности, производительность и экономичность процесса обработки.

Для исследования выбраны следующие факторы:

V — обороты шпинделя, об./мин;

S — подача инструмента, мм/об.;

t — глубина резания, мм.

Выходным параметром является шероховатость получаемой поверхности в Ra. Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Кодирование факторов		
Encoding factors		
Наименование и обозначение факторов Name and designation of factors	Уровни варьирования Variation levels	
	-1	1
X_1 – обороты шпинделя, об./мин Spindle speed, rpm	125	800
X_2 – подача инструмента, мм/об. Tool feed, mm/rpm	0,05	0,1
X_3 – глубина резания, мм Cutting depth, mm	0,3	0,5

Table 1

Проводится эксперимент типа 2^3 , где число факторов $k=3$, число уровней $p=2$, число опытов $N=8$, 9 эксперимент среднее значение для проверки зависимости.

В табл. 2 сведены режимы, на которых будут обрабатываться образцы согласно плану эксперимента.

Таблица 2

План эксперимента

The experiment plan

Номер образца Sample number	Режимы обработки Processing mode		
	V , об./мин rpm	S , мм/об. mm/rpm	t , мм mm
1	125	0,1	0,5
2	800	0,05	0,5
3	800	0,1	0,5
4	125	0,05	0,5
5	125	0,1	0,3
6	125	0,05	0,3
7	800	0,1	0,3
8	800	0,05	0,3
9	500	0,075	0,4

Table 2

После расчета в программе Mathcad получают следующие графики зависимостей измеренного параметра — шероховатости поверхности от заданных входных параметров (рис. 6–8).

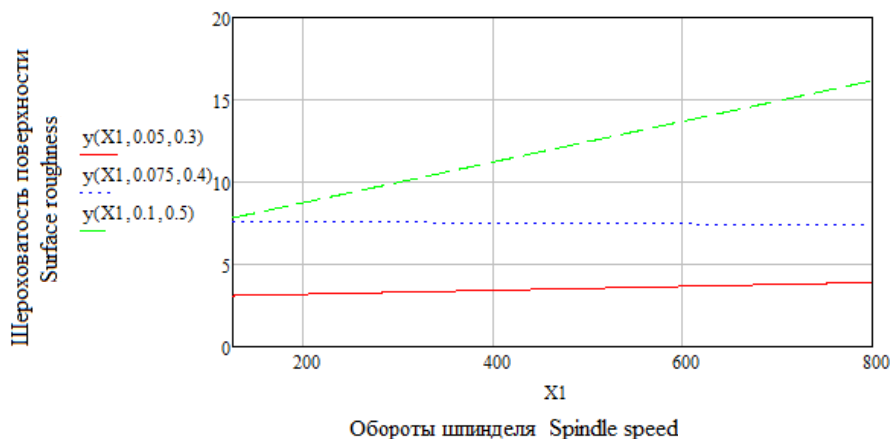


Рис. 6. График зависимости оборотов шпинделя на шероховатость обрабатываемой поверхности

Figure 6. Graph of the dependence of the spindle speed on the roughness of the treated surface

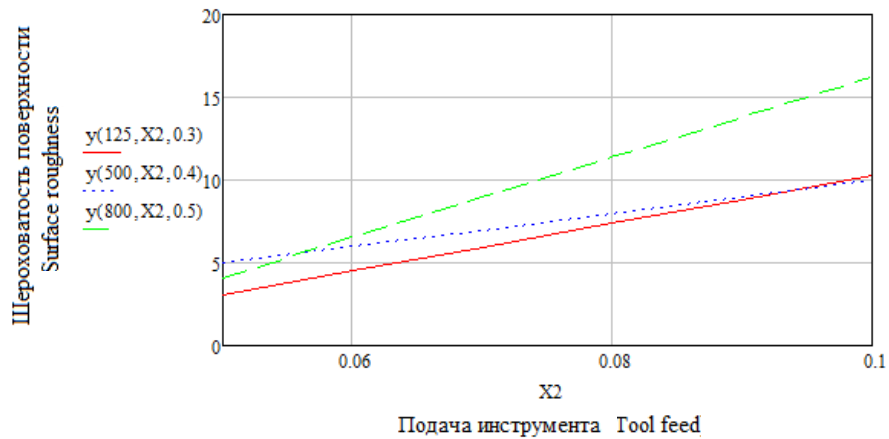


Рис. 7. График зависимости подачи инструмента на шероховатость обрабатываемой поверхности
 Figure 7. Graph of the dependence of the tool feed on the roughness of the treated surface

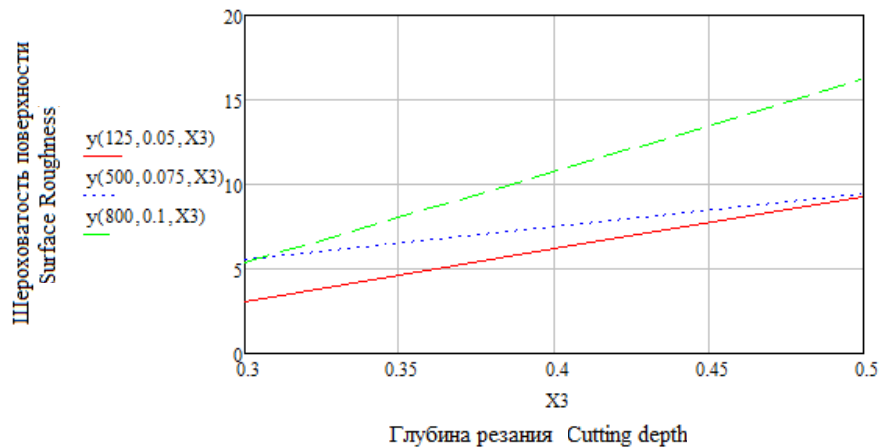


Рис. 8. График зависимости глубины резания на шероховатость обрабатываемой поверхности
 Figure 8. Graph of the dependence of the cutting depth on the roughness of the treated surface

7. Результаты экспериментальных исследований

Анализируя результаты контроля шероховатости на профилометре и при визуальном рассмотрении обработанной поверхности образцов, а также результаты обработки полученных данных (рис. 6–8), можно сделать следующие выводы:

1. На шероховатость поверхности наибольшее влияние оказывает подача. При увеличении подачи шероховатость увеличивается, количество видимых на поверхности дефектов увеличивается, возрастает вероятность разрушения материала.

2. Следующий по влиянию на качество поверхностного слоя параметр — это глубина резания. Как

и у большинства материалов при увеличении срезаемого слоя шероховатость возрастает в связи с тем, что сила резания и, как следствие, нагрузка на обрабатываемый образец возрастает, а, как показали результаты экспериментов, заготовки из данного материала очень плохо сопротивляются силе, действующей перпендикулярно оси вращения. Другими словами, вероятность поломки обрабатываемой заготовки сильно увеличивается при возрастании радиальной составляющей силы резания.

3. Скорость практически не влияет на качество обрабатываемой поверхности, но результаты эксперимента показали, что при обработке на наибольшей глубине и подаче шероховатость увеличивается

пропорционально увеличению скорости вращения шпинделя.

Заключение

Исследован процесс точения КМ на основе ТРГ. Получены зависимости качества поверхностного слоя от режимов, на которых производится механическая обработка. Определены следующие основные рекомендации, которые положительно повлияют на время и успешность внедрения изготовления деталей изданного материала:

- зажим заготовки необходимо осуществлять только по достаточной площади поверхности (в приспособлениях типа цангового патрона) или в специальных приспособлениях, усилие зажима которых направлено вдоль оси вращения детали;
- для достижения шероховатости более высокого класса, чем полученная в ходе выполнения эксперимента, рекомендуется уменьшать подачу инструмента, а также использовать инструмент с радиусом при вершине, позволяющим снимать меньшую толщину срезаемого слоя;
- при конструировании деталей из данного материала следует учитывать, что вероятность удачного изготовления деталей, обладающих малой жёсткостью мала. Наиболее технологично обосновано будет изготовление из данного материала деталей типа «Кольцо», «Уплотнение», «Седло» и подобной конфигурации.

Список литературы

1. Рыжкин А.А. Обработка материалов резанием. Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. 411 с.
2. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость профиль. Международный опыт / под ред. Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та. 2007. 136 с.
3. Фиалков А.С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе М.: Аспект-пресс, 1997. 717 с.
4. Кобаяши А. Обработка пластмасс резанием. М.: Машиностроение, 1974. 192 с.
5. Степанов А.А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов. Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1987. 176 с.
6. Семко М.Ф., Дрожжин В.И. Обработка резанием электроизоляционных материалов. М.: Энергия, 1974. 174 с.
7. Дрожжин В.И., Сустан П.И. Качество обработ-

ки и прочность слоистых пластиков // Станки и инструменты. 1969. № 10. С. 15—16.

8. Мелешко А.И., Половников С.П. Углерод, углеродные волокна, углеродные композиты. М.: Сайнс-Пресс, 2007. 194 с.

9. Белова М.Ю. От «черного мела» к уплотнениям из ТРГ // Арматуростроение. 2008. № 1 (52). С. 42—49.

10. Черныш И.Г., Бурая И.Д. Исследование процесса окисления графита раствором бихромата калия в серной кислоте // Химия твердого топлива. 1990. № 1. С. 123—127.

11. Караваев Д.М., Макарова Л.Е., Дегтярев А.И., Трошков К.В. Определение насыпной плотности терморасширенного графита // Известия Самарского научного Центра РАН. 2013. Т. 15. № 4 (2). С. 360—362.

12. Караваев Д.М. Композиционные материалы на основе терморасширенного графита для эксплуатации при температурах до 500 °С: дис. ... к.т. н.: 05.16.06. 2016. 151 с.

13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. С. 84—90.

References

1. Ryzhkin AA, Shuchev KG, Klimov MM. *Obrabotka materialov rezaniyem [Processing of materials by cutting]*. Rostov na Donu: Feniks Publ., 2008. (In Russ.)
2. Tabenkin AN, Tarasov SB, Stepanov SN. *Sherokhovatost', volnistost' profil'. Mezhdunarodnyy opyt / Pod red. kand. tekhn. nauk NA Tabachnikovoy*. Saint Petersburg: IzdvoPolitekhn. un-ta; 2007. (In Russ.)
3. Fialkov AS. *Uglerod, mezhslopevyye soyedineniya i kompozity na yego osnove [Carbon, interlayer compounds and composites based on it]*. Moscow: Aspekt-press Publ.; 1997. (In Russ.)
4. Kobayashi A. *Obrabotka plastmass rezaniyem [Machining of plastics cutting]*. Moscow: Mashinostroyeniye Publ.; 1974. (In Russ.)
5. Stepanov AA. *Obrabotka rezaniyem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov [Cutting of high-strength composite polymer materials]*. Leningrad: Mashinostroyeniye. Publ.; 1987. (In Russ.)
6. Semko MF, Drozhzhin VI. *Obrabotka rezaniyem elektroizolyatsionnykh materialov [Machining of insulating materials]*. Moscow: Energiya; 1974. (In Russ.)
7. Drozhzhin VI, Sustan PI. *Kachestvo obrabotki i prochnost' sloistyykh plastikov [Quality of processing and strength of layered plastics]*. *Stanki i instrument [Machines and tools]*. 1969;10:15—16. (In Russ.)

8. Meleshko AI, Polovnikov SP. *Uglerod, uglerodnyye volokna, uglerodnyye kompozity* [Carbon, carbon fibers, carbon composites]. Moscow: Sayns-Press Publ.; 2007. (In Russ.)
9. Belova MYu. Ot «chernogo mela» k uplotnениyam iz TRG [From “black chalk” to seals from TRG]. *Armaturostroyeniye*. 2008;1(52):42-49. (In Russ.)
10. Chernysh IG, Buraya ID. Issledovaniye protsessa okisleniya grafitа rastvorom bikhromata kaliya v sernoy kisloste [Investigation of the process of graphite oxidation with a solution of potassium bichromate in sulfuric acid]. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid fuel Chemistry]. 1990;1:123–127. (In Russ.)
11. Karavayev DM, Makarova LYe, Degtyarev AI, Troshkov KV. Opredeleniye nasypnoy plotnosti termorasshirennogo grafitа [Determination of bulk density of thermally expanded graphite]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo Tsentra RAN* [Proceedings of the Samara scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013;15,4(2):360-362. (In Russ.)
12. Karavayev DM. *Kompozitsionnyye materialy na osnove termorasshirennogo grafitа dlya ekspluatatsii pri temperaturakh do 500°S* [Composite materials based on thermally expanded graphite for operation at temperatures up to 500° C] (Thesis of Candidate of Technical Sciences). 05.16.06. 2016. (In Russ.)
13. Adler YuP, Markova YeV, Granovskiy YuV. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experiment Planning in search of optimal conditions.]. Moscow: Nauka Publ.; 1976. p. 84-90. (In Russ.)

Сведения об авторах

Михеенко Иван Сергеевич, оператор 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: 1231vanya@mail.ru

Смелик Анатолий Анатольевич, младший научный сотрудник 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: general26rus2000@mail.ru

Егоров Семен Анатольевич, оператор 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: columbia1996@mail.ru

Черняк Владислав Владимирович, оператор 4-й научной роты, Военный инновационный технополис ЭРА; e-mail: mchernak.com@inbox.ru

About the authors

Ivan S. Mikheenko, Operator of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: 1231vanya@mail.ru

Anatoly A. Smelik, Junior Researcher of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: general26rus2000@mail.ru

Semen A. Yegorov, Operator of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: columbia1996@mail.ru

Vladislav V. Chernyak, Operator of the 4th Scientific Company, Military Innovative Technopolis ERA; e-mail: mchernak.com@inbox.ru




DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-172-183
УДК 629.78

Научная статья / Research article

Методика создания программно-математического обеспечения для отработки проведения динамических операций космических аппаратов

В.В. Мальшев, А.В. Старков , А.В. Федоров, А.А. Тришин

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4
 E-mail: starkov@goldstar.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 декабря 2020 г.
Доработана: 21 февраля 2021 г.
Принята к публикации: 28 февраля 2021 г.

Аннотация. Основой обеспечения высокого уровня надежности и безопасности при проведении динамических операций является всесторонняя экспериментальная отработка изделий в условиях, максимально приближенных к реальным условиям функционирования с применением математического и имитационного моделирования. Анализируется техническая задача проведения динамических операций на орбите, которая, в свою очередь, сводится к двум базовым: приведение начального состояния космического аппарата группировки в заданную область пространства и выполнение маневров в заданной области пространства в течение срока активного существования. Перечисленные постановки задач управления и терминальные требования рассматриваются как первоначальные по отношению к стохастическому и минимаксному подходам, которые предлагаются для применения при построении рабочих алгоритмов. Предложена методика разработки программно-моделирующего комплекса, решающего задачи отработки средств проведения динамических операций КА. Применение иллюстрируется на примерах.

Ключевые слова: космический аппарат, оптимальное управление, динамические операции, синтез, круговая орбита, высокоэллиптическая орбита, методика, безопасность, математическая модель

Для цитирования

Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В., Тришин А.А. Методика создания программно-математического обеспечения для отработки проведения динамических операций космических аппаратов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 172–183. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-172-183

© Мальшев В.В., Старков А.В., Федоров А.В., Тришин А.А., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Methodology for creating software and mathematical support for modeling the spacecraft dynamic operations

Veniamin V. Malyshev, Alexander V. Starkov ✉, Alexander V. Fedorov, Alexey A. Trishin

Moscow Aviation Institute (National Research University)
4 Volokolamskoe Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation
✉ E-mail: starkov@goldstar.ru

Article history

Received: December 14, 2020

Revised: February 21, 2021

Accepted: February 28, 2021

Keywords: spacecraft, optimal control, dynamic operations, synthesis, circular orbit, highly elliptical orbit, technique, safety, mathematical model

Abstract. The basis for ensuring a high level of reliability and safety in dynamic operations is a comprehensive experimental development of products in conditions as close to the real conditions of operation as possible with the use of mathematical and simulation modeling. The technical task of conducting dynamic operations in orbit is analyzed, which in turn boils down to two basic: bringing the initial state of the spacecraft grouping into a given area of space and performing maneuvers in a given area of space during the active life. These management tasks and terminal requirements are considered to be initial in relation to the stochastic and minimax approaches that are offered for use in the construction of working algorithms. The method of developing a software-modeling complex of the decisive task of developing the means of conducting dynamic operations of the spacecraft has been proposed. The application is illustrated by examples.

For citation

Malyshev VV, Starkov AV, Fedorov AV, Trishin AA. Methodology for creating software and mathematical support for modeling the spacecraft dynamic operations. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):172–183. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-172-183

Введение

В результате человеческой деятельности количество управляемых и неуправляемых космических объектов в околоземном пространстве с каждым годом возрастает. Для увеличения сроков активного существования дорогостоящих космических аппаратов (КА) возникает необходимость проведения их технического обслуживания [1]. Вместе с тем при большом числе КА увеличивается вероятность столкновения космических объектов друг с другом. Поэтому потребность в обеспечении безопасного проведения динамических операций в околоземном пространстве очевидна. Динамические операции проводятся при выведении КА на орбиту (в том числе с использованием разгонного блока), переориентации на орбите для использования фрагментов корпуса КА в качестве экранной защиты, выполнении на орбите маневров в относительной близости от других КА и космического мусора. Проводимые динамические

операции должны быть безопасными. Под безопасностью динамической операции КА подразумевается выполнение им маневров, которые не ухудшают функциональные возможности надсистемы. В этом смысле другие космические объекты и «космический мусор» могут рассматриваться как дополнительные ограничения в оптимизационной задаче.

Одним из основных направлений развития экспериментальной базы является разработка и внедрение современных средств математического моделирования, учитывающих условия и параметры функционирования этих изделий в полете, включая соответствующее математическое обеспечение. Это неизбежно приводит к значительному усложнению и снижению эффективности применения существующих стандартных программных комплексов конечным пользователем, а ключевая цель обеспечения функциональной полноты программных средств остается нереализованной. Разумным шагом на пути к преодолению этого недостатка

является специализация программных решений на основе концепции открытой архитектуры, состоящих из следующих взаимосвязанных компонент:

1) системы ведения данных, основанной на собственной модели представления и интерпретации информации, которая обеспечивает исполнение системы произвольных запросов к собственной базе данных и механизм межпрограммного взаимодействия;

2) единого, стандартизованного языка высокоуровневого описания объектов моделирования, входной и выходной информации, исполнительской макропрограммы с поддержкой механизмов межпрограммного взаимодействия;

3) комплекса макропрограмм на языке высокого уровня, описывающих работу различных подсистем КА, алгоритмы функционирования которых подвержены частым модификациям, а также нестандартные, характерные именно для данного КА, особенности обработки данных, которые нецелесообразно включать в типовую систему.

Целью статьи является представление методики создания алгоритмического и программного обеспечения для отработки безопасного проведения динамических операций КА, что, безусловно, имеет важное практическое значение. Для достижения поставленной цели необходимо:

1) исследовать требования, предъявляемые к средствам безопасного проведения динамических операций КА;

2) разработать математические модели бортовых систем КА, внешней среды и проведения динамических операций для КА на типовых высокоэллиптических и круговых орбитах;

3) Определить принципы построения и технический облик программно-моделирующего комплекса (ПМК);

4) Провести отработку программно-математического обеспечения на модельных примерах.

1. Требования, предъявляемые к средствам безопасного проведения динамических операций космических аппаратов

В целом основные проблемы с безопасностью связаны с отслеживаемыми и потенциально отсле-

живаемыми объектами. В соответствии с принципом декомпозиции весь перечень опасных ситуаций может быть привязан к фазам активного существования КА: выведение, испытания, эксплуатация и захоронение. При этом требования, предъявляемые к средствам отработки проведения динамических операций, можно условно разделить на две большие группы.

Первая группа — требования к алгоритмическому обеспечению, а именно требования к типам задач, для чего необходимо определить перечень основных динамических операций, которые необходимо отбатывать, а именно [2]:

- ввод спутника в заданное место (слот) орбитальной структуры после выведения носителем на промежуточную орбиту;
- коррекция относительного положения спутников, когда искажение орбитальной структуры приводит к снижению целевой эффективности системы;
- поддержание относительного положения спутников в заданных пределах при проведении экспериментов;
- перевод спутника из одного слота структуры в другой, в частности при замене вышедшего из строя спутника резервным;
- удержание спутника в окрестности номинального положения слота в течение длительных промежутков времени (например, удержание спутника на ГСО, удержание долготы восходящего узла высокоапогейной синхронной орбиты);
- сближение с другим КА для инспекции;
- выполнение маневров уклонения на фоне решения КА его основной задачи;
- регулирование относительного положения спутников при проведении экспериментов и т.п.

Приведенный перечень технических требований может быть сведен к двум базовым задачам:

1) задача приведения вектора начального состояния КА группировки в заданную область пространства;

2) Задача выполнения маневров в заданной области пространства в течение срока активного существования.

Перечисленные постановки задач управления и терминальные требования можно рассматривать как первоначальные по отношению к стохастическому и минимаксному подходам, которые должны применяться при построении рабочих алгоритмов.

Вторая группа требований — это требования к программному обеспечению, которое должно:

- обеспечить возможность автоматической генерации циклограммы коррекции в детерминированной, стохастической и минимаксной постановках с получением соответствующих оценок принятого критерия оптимальности;
- обеспечить возможность назначения пользователем критерия оптимальности или взвешенного обобщенного критерия с коэффициентами предпочтения;
- использовать математические модели, учитывающие основные возмущения, характерные для орбит рассматриваемых классов;
- обеспечить возможность поиска управления как при фиксированной, так и при свободной ориентации вектора тяги;
- обеспечить «прозрачность» (понятность) генерируемых решений для конечного потребителя.

Требования, предъявляемые к средствам обработки динамических операций КА для исключения возникновения опасных ситуаций, позволили сформулировать две взаимосвязанные между собой задачи синтеза алгоритмов управления КА с учетом безопасности проведения динамических операций и формирования методики построения ПМК для их обработки.

2. Математические модели бортовых систем космических аппаратов, внешней среды и проведения динамических операций

В качестве исходных уравнений можно рассмотреть общие нелинейные уравнения движения КА с учетом влияния нецентральной гравитационного поля Земли, гравитационных полей Луны и Солнца, давления солнечного ветра. Для учета управления предлагаются следующие варианты формирования проекций управляющих ускорений на орбитальные оси: трехосная система стабилизации с ориентацией КА по орбитальным осям и в инерциальной системе координат. В зависимости от решаемой технической задачи, можно выделить несколько постановок:

- обеспечение начальной орбиты с заданными параметрами (задача выведения);

- перевод на промежуточную и возвращение на опорную орбиту при выполнении маневра уклонения;

- удержание КА на расчетной орбите.

Для типовых орбит эти задачи в основном сводятся к формированию (поддержанию) гринвичских долгот восходящих узлов орбит в заданном ограниченном диапазоне, который определяет возможные колебания трасс полета. Поэтому при построении космических систем необходимо решать задачу приведения и стабилизации трасс полета КА.

Классическое решение предполагает проведение орбитальных коррекций с целью изменения двух параметров — высоты перигея орбиты и периода обращения КА [2]. Задача об изменении высоты перигея формулируется следующим образом. Задана исходная орбита. Полагается, что она определяется апогейным и перигейным расстояниями соответственно $r_{п1}$, $r_{а1}$. Требуется определить величину, направление и точку приложения управляющего импульса скорости, обеспечивающего изменение перигейного расстояния с $r_{п} = r_{п1}$ на $r_{п} = r_{п2}$ при условии сохранения апогейного расстояния орбиты, т.е. при условии $r_{а1} = r_{а2}$. Оптимальный маневр при изменении большой полуоси орбиты характеризуется известным трансверсальным импульсом, приложенным в перигее орбиты.

Стохастический подход к решению задачи управления подразумевает линеаризацию исходных уравнений движения в окрестности средней долготы [3]. Это позволяет синтезировать алгоритм управления для проведения динамических операций в окрестности опорной орбиты. Так как главными возмущениями, изменяющими драконический период обращения КА по орбите, являются возмущения вследствие резонанса с долготными членами разложения гравитационного потенциала и доминирующими являются компоненты возмущений с индексами (2, 2, 1, 1) в разложении геопотенциала, из уравнений движения можно выделить уравнения, описывающие эволюцию средней долготы и периода обращения (скорости дрейфа). С учетом ошибок реализации управляющего ускорения при корректировании средней долготы и возмущений от коррекции наклона уравнения движения долготы восходящего узла представимы в дискретном виде [4]:

$$y_{k+1} = y_k + [\vartheta_k + (1 + (1 + \mu_k)u_k)]\Delta t_k + b_s \Delta t_k^2 + b_r \Delta t_k + \xi_{y_k},$$

$$\vartheta_{k+1} = \vartheta_k + (1 + \mu_k)u_k + 2b_s \Delta t_k + \xi_{\vartheta_k}; \quad k = \bar{1}, N,$$

где k — индекс, соответствующий моменту начала проведения маневра; N — количество коррекций; y_k — отклонение географической долготы восходящего узла (ГДВУ) от требуемого значения (в град.); ϑ_k — скорость изменения y_k или скорость дрейфа ГДВУ (в град./зв.сут.); u_k — корректирующее воздействие или приращение скорости дрейфа, обусловленное работой двигательной установки (в град./зв.сут.); μ_k — мультипликативная ошибка реализации корректирующего воздействия; u_k ; ξ_{y_k} , ξ_{ϑ_k} — случайные аддитивные возмущения; b_s , b_r — постоянные на интервале времени Δt_k коэффициенты, вычисляемые по формулам

$$b_r = -\frac{2(\Delta g_{rr} + \Delta g_{msr})}{v_0}, \quad b_s = -\frac{3\pi}{v_0}(\Delta g_{rs} + \Delta g_{mss}),$$

где r , s — направления радиус-вектора КА и трансверсали соответственно, Δg_{rr} , Δg_{rs} — проекции гравитационного возмущающего ускорения; Δg_{msr} , Δg_{mss} — проекции осредненного на интервале Δt_k возмущающего ускорения от гравитационных полей Луны и Солнца.

Статистические характеристики случайных факторов μ_k , ξ_{y_k} , ξ_{ϑ_k} считаются известными:

$$\begin{aligned} M[\mu_k] &= M[\xi_{y_k}] = M[\xi_{\vartheta_k}] = \\ &= 0, \quad M[\xi_{y_k}^2] = \sigma_{y_k}^2, \quad M[\xi_{\vartheta_k}^2] = \sigma_{\vartheta_k}^2, \\ M[\xi_{y_k} \xi_{\vartheta_k}] &= E_k; \quad M[\mu_k^2] = \sigma_k^2, \end{aligned}$$

где $M[\cdot]$ — математическое ожидание.

Система уравнений плоского движения в матричном виде имеет вид

$$x_{k+1} = A_k x_k + (1 + \mu_k)B_k u_k + D_k + \xi_k,$$

где k — число маневров; x_k — n -мерный вектор состояния системы; u_k — m -мерный вектор управления; A_k — квадратная $n \times n$ матрица; B_k — прямоугольная $n \times m$ матрица; D_k — n -мерный неслучайный вектор;

μ_k — мультипликативная ошибка управления; ξ_k — случайный вектор ошибок прогноза вектора состояния x_{k+1} ,

$$\begin{aligned} x_k &= (y_k \vartheta_k)^T, \quad \xi_k = (\xi_{y_k} \xi_{\vartheta_k})^T, \\ A_k &= \begin{pmatrix} 1 & \Delta t_k \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad B_k = \begin{pmatrix} \Delta t_k \\ 1 \end{pmatrix}, \\ D_k &= \Delta t_k \begin{pmatrix} b_r + b_s \Delta t_k \\ 2b_s \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

В качестве характеристики конечной точности принимается величина

$$J = \min_{\{u_k\}} M[x_{N+1}^T \lambda x_{N+1}],$$

где λ — симметричная матрица с известными элементами $\lambda_{11}, \lambda_{12}, \lambda_{22}$.

В стохастической постановке оптимальное управление — линейная функция:

$$u_k = -L_k x_k - d_k,$$

где коэффициенты обратной связи L_k и смещение d_k вычисляются с помощью рекуррентных соотношений:

$$L_k = \gamma_k^{-1} B_k^T \lambda_{k+1} A_k,$$

$$\begin{aligned} d_k &= \gamma_k^{-1} B_k^T (\lambda_{k+1} D_k + G_{k+1}), \\ \gamma_k &= (1 + \sigma_k^2) B_k^T \lambda_{k+1} B_k, \\ \lambda_k &= A_k^T \lambda_{k+1} A_k - L_k^T \gamma_k L_k, \\ G_k &= A_k^T \lambda_{k+1} D_k + A_k^T G_{k+1} - \gamma_k d_k L_k^T, \\ c_k &= c_{k+1} + sp[F_k^T \lambda_{k+1} F_k E_k] + \\ &+ D_k^T \lambda_{k+1} D_k - \gamma_k d_k^2 + 2G_{k+1}^T D_k \end{aligned}$$

с граничными условиями на правом конце:

$$\lambda_{N+1} = \lambda; \quad G_{N+1} = 0; \quad c_{N+1} = 0.$$

Представленные результаты могут быть адаптированы для выполнения динамических операций на фоне решения задачи удержания, т.е. когда КА находится в допустимой области пространства. В этом случае для стабилизации долготы восходящего узла необходимо не более одной коррекции в течение достаточно длительного интервала времени между коррекциями (сутки или несколько суток) и КА постоянно находится в состоянии фиктивного равновесия относительно некоторой точки в пространстве фазовых координат (y, ϑ) . Величины коррекций вычисляются при $N=1$. При этом интервалы между коррекциями Δt выбираются из условия

$$|y_k(\Delta t_k)| \leq \Delta \lambda_{\max},$$

где $\Delta \lambda_{\max}$ — заданная величина, характеризующая интервал удержания по средней долготе.

Для этого случая скалярные соотношения для вычисления коэффициентов обратной связи и смещения имеют вид

$$L_y = (\Delta t + \chi_2)(1 + \sigma^2)^{-1}(\Delta t^2 + 2\chi_2\Delta t + \chi_1)^{-1},$$

$$L_\vartheta = (1 + \sigma^2)^{-1},$$

$$d = [\Delta t^2(b_r + b_s\Delta t) + \chi_2\Delta t(3b_s\Delta t + b_r) + 2b_s\Delta t\chi_1](1 + \sigma^2)^{-1}(\Delta t^2 + 2\chi_2\Delta t + \chi_1)^{-1},$$

где $\chi_2 = \frac{\lambda_{12}}{\lambda_{11}}$; $\chi_1 = \frac{\lambda_{22}}{\lambda_{11}}$,

а индекс k , равный 1, у всех величин опущен (для сокращения записи).

Считая Δt постоянным, выражение для управления имеет вид [5]

$$u = -L_y y - L_\vartheta \vartheta - d.$$

Предполагая постоянство интервалов между коррекциями Δt , эволюция долготы и скорости дрейфа может быть описана следующим матричным уравнением:

$$M[x_{k+1}] = \tilde{A}x_k + \tilde{C},$$

где

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} 1 - L_y\Delta t & \Delta t[1 - L_\vartheta] \\ -L_y & 1 - L_\vartheta \end{bmatrix},$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} b_r\Delta t + b_s\Delta t^2 - d\Delta t \\ 2b_s\Delta t - d \end{bmatrix}.$$

Из соотношения (9) находим координаты КА x^* в установившемся режиме:

$$x^* = (E - \tilde{A})^{-1} \tilde{C}.$$

Последнее равенство показывает, что вектор состояния КА в установившемся режиме зависит лишь от интервалов времени между коррекциями Δt и требуемой амплитуды колебаний долготы восходящего узла и скорости дрейфа, определяемой параметрами матрицы λ_{N+1} . Такой подход позволяет на фоне режима удержания проводить динамические операции по незначительному изменению в нужный момент

времени долготы восходящего узла орбиты КА и дальнейшему возвращению ее к расчетному значению без проведения дополнительных сложных расчетов [3—5].

Как было отмечено выше, рассмотренные алгоритмы предполагают разделение динамических операций либо на управление периодом обращения и высотой перигея, либо на управление средней долготой, на фоне которого проводятся коррекции эксцентриситета и наклона. Тем не менее при выполнении динамических операций представляют интерес алгоритмы, целью которых является одновременное обеспечение требуемых параметров орбиты. К ним относятся терминальные алгоритмы управления движением. Среди различных подходов, реализующих терминальное управление, выделим алгоритмы с использованием идеи прогнозирования управляемого процесса.

Терминальный алгоритм позволяет по заданным параметрам требуемой орбиты определить пространственную ориентацию вектора тяги КА. Требуемая орбита при этом может быть задана как жестко (задаются все шесть элементов орбиты), так и иметь свободные переменные (задаются три параметра — наклонение, радиус апоцентра и скорость в апоцентре).

Для формирования терминального алгоритма предлагается заменить дифференциальные уравнения движения соотношениями, связывающими текущее t_k и конечное T состояния, при условии, что весь импульс скорости прикладывается в текущий момент времени:

$$S_l(T) = S^{pr}(S_k, V_k, \Delta t_k) + (1 + \mu_k^2)\Delta V_k(P_l)_k \Delta t_k,$$

$$V_l(T) = V^{pr}(l_k, V_k, \Delta t_k) + (1 + \mu_k^2)\Delta V_k(P_l)_k,$$

где $l = x, y, z$, $\Delta t_k = T - t_k$; S_l, V_l — проекции векторов положения и скорости на оси выбранной системы координат, P_l — проекции единичного вектора направления действия управляющей силы на оси выбранной системы координат (ориентация двигательной установки); $\Delta V_k(P_l)_k$ — вектор проекций полного приращения скорости КА, вызванного работой двигательной установки на интервале Δt_k , на оси выбранной системы координат; S^{pr}, V^{pr} — векторные функции прогноза состояния КА на интервал времени Δt_k , вычисляемые по кеплеровской теории; $(1 + \mu_k)$ — мультипликативная ошибка, вызванная работой двигательной установки, причем $M[\mu_k^2] = \sigma_k^2$.

Определение пространственной ориентации корректирующей двигательной установки (ДУ) в этом

случае сводится к задаче минимизации линейной функции

$$F = F_0 + 2R_k^T P_k \rightarrow \min_{|P_k|=1},$$

где k — номер коррекции,

$$R^T = (R_x, R_y, R_z),$$

$$R_l = b_1[S_l(T) - S_l^*] + b_2[\dot{V}_l(T) - \dot{V}_l^*],$$

$$F_0 = [S(T) - S^*]^T [S(T) - S^*] + b_1^2 + b_2^2,$$

$$b_1 = (1 + \sigma_k^2)\Delta V_k/V_0, \quad b_2 = (1 + \sigma_k^2)\Delta t_k \Delta V_k/r_0,$$

S^* , V^* — векторы требуемых положения и скорости КА, ΔV_k — приращение характеристической скорости за время Δt_k . Решение задачи определяет пространственную ориентацию вектора тяги:

$$P_k = \frac{R_k}{\|R_k\|}.$$

В результате требуемое направление вектора ориентации P_k инвариантно к величинам полных приращений вектора скорости ΔV_k и зависит лишь от текущего и требуемого вектора состояния КА, а также выбранной функции прогноза. Полученные формулы служат для определения обобщенного алгоритма терминального управления в случае, когда параметры требуемой орбиты задаются всего тремя

составляющими: наклоном, радиусом и скоростью в апоцентре.

3. Принципы построения и технический облик программно-моделирующего комплекса

Основным функциональным назначением ПМК является [6]:

- создание математических моделей систем КА и внешней среды с использованием языка или команд моделирования и набора проблемно ориентированных программных модулей;
- организация дискретно-событийного взаимодействия моделей в модельном и реальном времени с возможностью розыгрыша отказов и помех;
- управление процессом моделирования как в диалоговом, так и пакетном режиме работы, написание сценариев моделирования;
- оперативное отображение результатов моделирования в графическом и табличном виде;
- регистрация и обработка результатов моделирования, взаимодействие с бортовыми регистраторами.

Состав и иерархическая структура программно-моделирующего комплекса представлена на рис. 1.

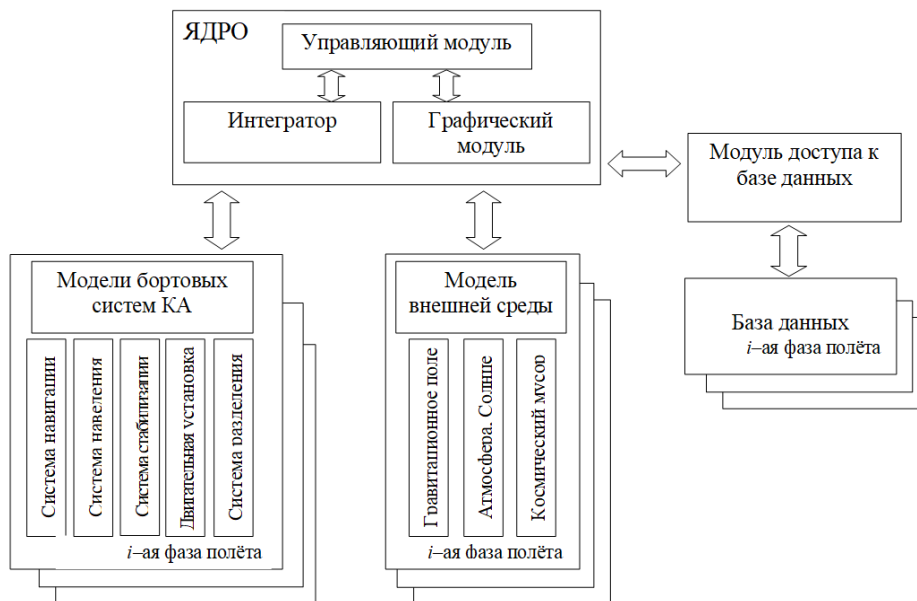


Рис. 1. Структурная схема программного комплекса

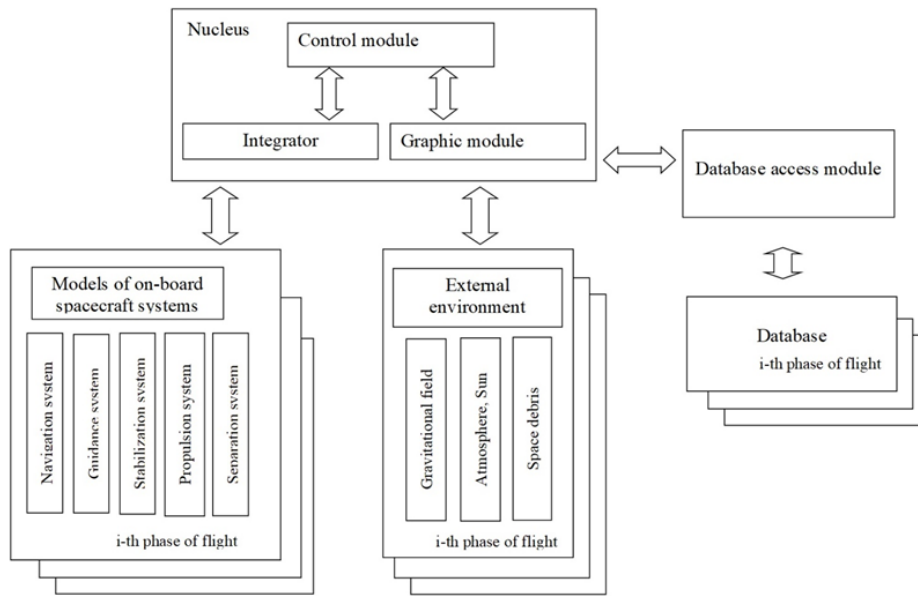


Figure 1. Software structure

На верхнем уровне находится ядро ПМК, которое взаимодействует с базой данных, хранящей исходные данные для моделирования. Заложенный в нем принцип объектно-ориентированного программирования позволяет легко модифицировать исходное ядро в зависимости от фазы полета или постановки решаемой задачи, не меняя при этом сущности моделирования. В состав ядра ПМК входят управляющий модуль, графический модуль и интегратор.

В базе данных все необходимые параметры КА и внешней среды задаются в зависимости от фазы полета. При этом предлагается считать, что процесс ввода КА в группировку, удержания, схода с орбиты и т.п. состоит из «элементарных» событий — фаз полета. В работе под фазой полета понимается участок траектории, характеризуемый выполнением одной динамической операции.

На следующем уровне иерархии находятся блоки моделирования функционирования бортовых систем КА и воздействия внешней среды, которые, в свою очередь, делятся на конкретные модели. Эти блоки созданы независимо от ядра и конкретной БД. В них моделируются различные алгоритмы работы систем и создаются модели внешних воздействий различной точности. В ядре, при организации моделирования, возможно использование любой созданной модели той или иной бортовой системы КА уже для конкретной

динамической операции. Моделирование возмущений осуществляется с помощью одной из созданных моделей в зависимости от выбранного режима (номинальный, предельный, стохастический) и требуемой точности расчета.

Принятая структура программного комплекса позволяет без труда варьировать параметры и алгоритмы работы любого компонента ПМК, не изменяя при этом другие компоненты. Это обеспечивает возможность разработки отдельных блоков ПМК независимо друг от друга.

Модели бортовых систем представляются в виде динамически подключаемых модулей, имеющих входные и выходные параметры, определяемые требованиями ПМК, с которым они взаимодействуют. В тело каждой такой процедуры заложен алгоритм функционирования соответствующей бортовой системы. В зависимости от фазы полета в ПМК моделируется работа таких бортовых систем, как система ориентации; система коррекции орбиты; система навигации; двигательная установка с исполнительными органами, система разделения и т.п. Модель внешней среды включает в себя модель гравитационного влияния Земли, модель гравитационного влияния Луны, модель гравитационного влияния Солнца, модель влияния давления солнечного света, модель атмосферы, модель представления случайных воздействий.

Управляющий модуль обеспечивает вывод на экран многоканального меню, запуск расчета, координацию работы всех компонентов ПМК, передачу данных между компонентами ПМК, вывод полученных результатов, запуск графического модуля. Управляющий модуль ПМК предлагается реализовать в виде многоуровневого приложения, отдельные элементы которого могут выполняться независимо и связываться между собой по стандартным протоколам обмена.

В нашем случае предлагается использовать трехуровневую модель клиент–сервер (рис. 2), которая реализует пользовательский интерфейс и посылает запросы на выполнение нужных действий, сервера приложений, обеспечивающего синхронизацию работы всех компонентов системы и организации связей между ними, удаленного сервера баз данных, выполняющего запросы от сервера приложений и не работающий напрямую с клиентскими программами [5].

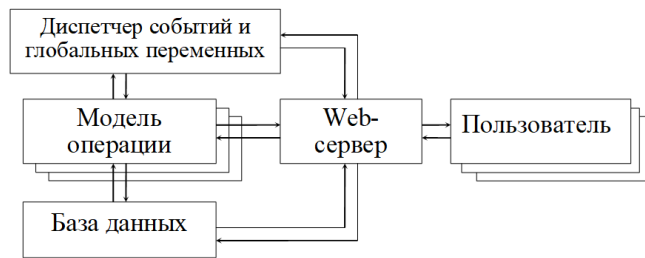


Рис. 2. Архитектура управляющего модуля

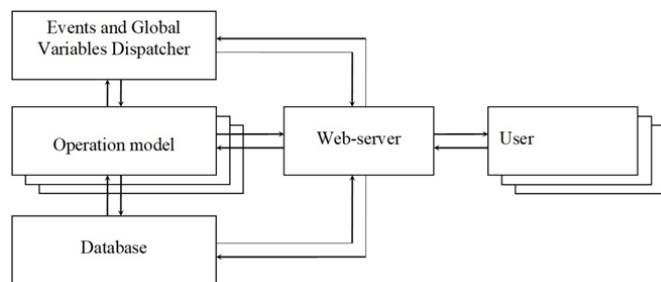


Figure 2. Control module structure

Такой подход позволяет разгрузить компьютеры клиентов, повысить отказоустойчивость и безопасность системы. При этом благодаря тому, что удастся выделить детали логики приложения в отдельные компоненты, клиентские программы могут обращаться к одним и тем же компонентам для решения различных задач,

а серверы приложений снимают все проблемы по синхронизации их работы. Кроме того, в этом случае мы можем дальше «отойти» от проблем совместимости операционных систем (ОС), поскольку все составные части выполнены в соответствии со стандартами, поддерживаемыми различными ОС.

Модель операций реализуется в соответствии со стандартом языка программирования и представляет собой информационную модель субъектов операции, отдельные элементы которых могут быть представлены дифференциальными уравнениями, алгебраическими зависимостями, функциями времени, таблицами и т.д. База данных предназначена для информационного обеспечения комплекса. При таком подходе работа с объектом моделирования с точки зрения разработчика программного обеспечения состоит из нескольких этапов. Диспетчер событий и глобальных переменных реализует механизм межпрограммного взаимодействия между отдельными модулями системы. Такой механизм необходим по нескольким причинам: невозможно заранее точно определить интерфейс всех библиотек программ; невозможно заранее определить степень изменений, которые библиотеки могут вносить в программный комплекс; невозможно заранее определить все события, происходящие в модели и реакции на них отдельных подсистем.

На первом этапе с использованием созданной автором системой команд (языком описания): определяется объектно-ориентированная иерархическая структура объекта моделирования; формируются исходные и текущие данные для проведения моделирования; описываются методы обработки данных; организуется сценарий межпрограммного взаимодействия.

На втором этапе разработчики программных модулей интегрируют свои приложения для работы с Диспетчером. Процесс интеграции намеренно упрощается до степени вызова определенных процедур (не более десятка) из специальной библиотеки (интерфейсного модуля), основной функцией которой является обеспечение «быстрой» передачи данных между приложением и Диспетчером.

На третьем этапе проводится моделирование, состоящее из представления объекта моделирования с необходимыми программными модулями в памяти компьютера (компиляции проекта) и непосредственно

самого моделирования с обеспечением возможностей «быстрого» обмена данными и событиями.

Отработка программно-математического обеспечения на модельных примерах включает в себя:

- отработку средств выведения КА с промежуточной круговой на рабочую орбиту;
- отработку средств выведения КА на круговую орбиту;
- отработку средств проведения динамических операций на высокоэллиптических орбитах;
- отработку средств проведения динамических операций на типовых круговых орбитах.

Отработку средств выведения КА с промежуточной круговой на рабочую орбиту можно проиллюстрировать на примере выведения КА системы ГЛОНАСС. Исследуется участок траектории разгонного блока с низкой круговой орбиты высотой $H \approx 180$ км до рабочей круговой орбиты с высотой 19135 км. На этом участке проводятся два включения двигательной установки разгонного блока. Первый активный участок формирует эллиптическую орбиту с высотой апогея, равной высоте рабочей орбиты КА ГЛОНАСС, а второй переводит КА на почти круговую рабочую орбиту. На первом участке циклограмма выведения задана жестко, т.е. обратной связи по измерениям параметров траектории нет. На втором участке обрабатывается обобщенный терминальный алгоритм управления. На рис. 3–4 представлены разбросы конечных параметров орбит при использовании на втором участке как жесткой циклограммы выведения (см. рис. 3), так и обобщенного терминального алгоритма (см. рис. 4).

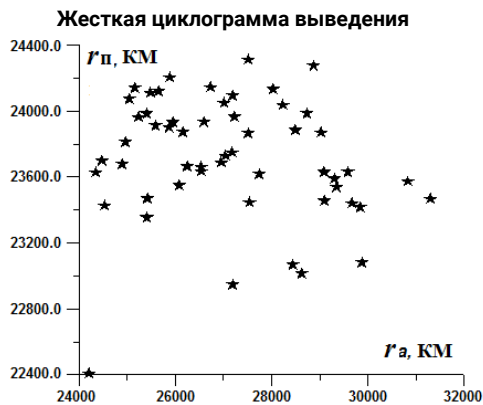


Рис. 3. Разбросы радиусов перигея и апогея при жесткой циклограмме выведения
 Figure 3. Apocenter/pericenter phase plane – standard sequence diagram

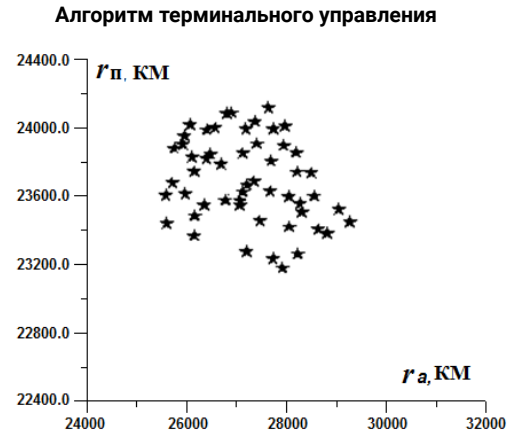


Рис. 4. Разбросы радиусов перигея и апогея при использовании алгоритма терминального управления
 Figure 4. Apocenter/pericenter phase plane – terminal control algorithm

На рис. 5–8 представлены примеры результатов отработки средств проведения динамических операций на высокоэллиптических орбитах, связанных с изменением высоты перигея орбиты и периода обращения КА.

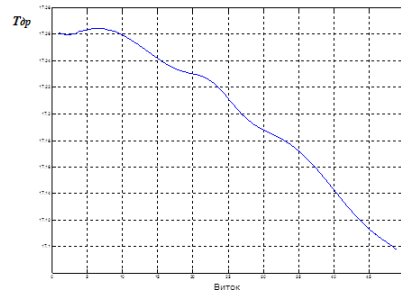


Рис. 5. Эволюция периода обращения
 Figure 5. Period evolution

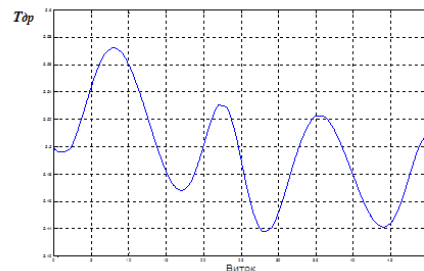


Рис. 6. Изменение периода обращения после проведения коррекции
 Figure 6. Period evolution after correction

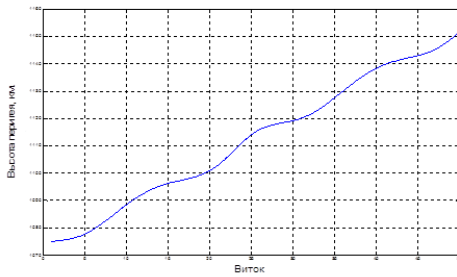


Рис. 7. Эволюция высоты перигея
Figure 7. Apocenter evolution

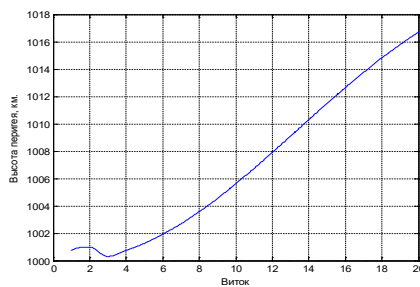


Рис. 8. Изменение высоты перигея после проведения коррекции
Figure 8. Apocenter evolution after correction

В случае отработки средств проведения динамических операций на круговой геостационарной орбите ($r=42164$ км, $e=10^{-4}$, $\Omega=30^\circ$, $i=4^\circ$, $\lambda_{mp}=45^\circ$) предполагалось, что для их проведения имеется бортовая корректирующая установка малой тяги, причем вектор тяги ориентируется вдоль нормали к радиус-вектору и по бинормали. Коррекции средней долготы и наклона осуществляются независимо, причем алгоритм коррекции наклона — заранее выбранная программа компенсации суточного ухода. В этом случае процесс выполнения динамической операции представляет собой последовательность коррекций наклона, на фоне которых осуществляется коррекция средней долготы. Начало очередного сеанса коррекций средней долготы, их продолжительность рассчитываются в соответствии с алгоритмом, описанным в четвертой главе. На рис. 9 представлены фазовые портреты в координатах: долгота восходящего узла — скорость дрейфа для разных начальных условий и рассчитанная точка сходимости процесса управления (y^* , v^*).

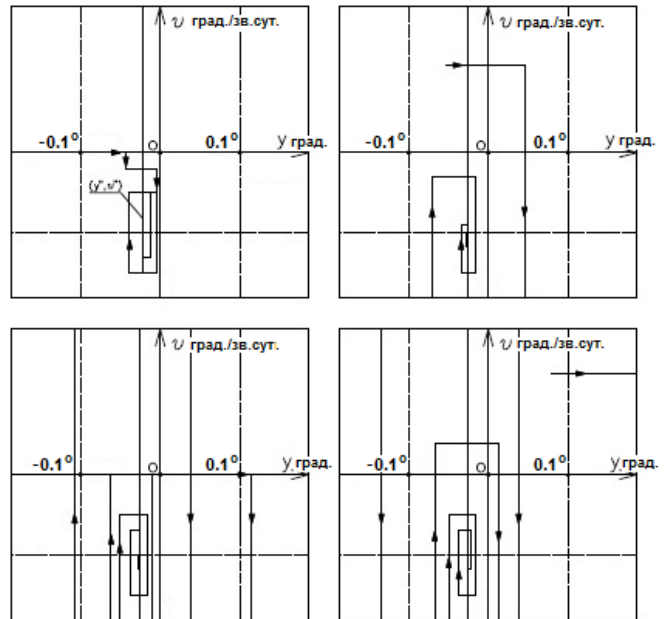


Рис. 9. Зависимость скорости дрейфа v от долготы восходящего узла y
Figure 9. Track drift velocity/ longitude of the ascending node

Заключение

В статье предложена методика решения задач, возникающих при разработке алгоритмов управления КА с учетом требований безопасности их проведения и создании специализированного программно-моделирующего комплекса. Сформированы требования к алгоритмическому и программному обеспечению средств отработки динамических операций. Предложен перечень математических моделей бортовых систем КА и внешней среды. Дана характеристика как классического решения, так и модифицированного алгоритма проведения динамических операций на фоне решения задачи удержания долготы восходящего узла круговой и высокоэллиптической орбиты и обобщенный терминальный алгоритм управления. Представлена методика формирования программно-моделирующего комплекса для отработки алгоритмов и программ проведения динамических операций КА. Кратко представлены примеры экспериментальной отработки динамических операций выведения, изменения и выполнения маневров на типовых орбитах КА.

Список литературы

1. Разумный В.Ю., Баранов А.А., Разумный Ю.Н. Проектирование орбитального построения космической системы для обслуживания космических аппаратов системы Globalstar // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 2. С. 111—122. doi: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-111-122
2. Сухой Ю.Г. Коррекции орбит геостационарных спутников: в 3 частях. Ч. 1: Особенности управления орбитальным движением и возмущения орбит геостационарных спутников: пособие для специалистов. М.: Спутник+, 2011.
3. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Орбитальные коррекции космических аппаратов при выполнении динамических операций // Известия РАН. Теория и системы управления. 2013. № 2. С. 154—166.
4. Малышев В.В., Старков А.В., Толстенков П.С., Федоров А.В. Методы поддержания параметров структуры высокоорбитальной группировки космических аппаратов для компенсации ухудшения ее функциональных возможностей // Космонавтика и ракетостроение. ЦНИИмаш. 2017. № 2 (95). С. 37—45.
5. Zay Yar Win, Malyshev V.V., Bobronnikov V. T., Starkov A.V. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit // *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc., 2020. Vol. 170. P. 433—442
6. Малышев В.В., Старков А.В., Федоров А.В. Методика разработки программно-моделирующего комплекса для отработки средств проведения динамических операций космических аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 57. С. 8.

Сведения об авторах

Малышев Вениамин Васильевич, заведующий кафедрой системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), доктор технических наук, профессор; Scopus Author ID: 7201400361; eLIBRARI AuthorID: 30; e-mail: veniaminmalyshev@mail.ru

Старков Александр Владимирович, профессор кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), доктор технических наук; Scopus Author ID: 56205648500, eLIBRARI SPIN-код: 5242-3413; e-mail: starkov@goldstar.ru

Федоров Александр Викторович, доцент кафедры системного анализа и управления, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), кандидат технических наук, доцент; Scopus Author ID: 55658057054, eLIBRARI SPIN-код: 6119-3614; e-mail: alexanderf@mail.ru,

Тришин Алексей Александрович, студент кафедры информационно-управляющих комплексов летательных аппаратов, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет); e-mail: trishin0202@mail.ru

About the authors

Veniamin V. Malyshev, Head of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Doctor of Technical Sciences, Professor; Scopus Author ID: 7201400361, eLIBRARI AuthorID: 30; e-mail: veniaminmalyshev@mail.ru

Alexander V. Starkov, Professor of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Doctor of Technical Sciences; Scopus Author ID: 56205648500, eLIBRARI SPIN-code: 5242-3413; e-mail: starkov@goldstar.ru

Alexander V. Fedorov, Associate Professor of the Department of System Analysis and Management, Moscow Aviation Institute (National Research University), Candidate of Technical Sciences; Scopus Author ID: 55658057054, eLIBRARI SPIN-code: 6119-3614; e-mail: alexanderf@mail.ru

Alexey A. Trishin, Student of the Department of Information and Control Systems of Aircraft, Moscow Aviation Institute (National Research University); e-mail: trishin0202@mail.ru

References

1. Razoumny VYu, Baranov AA, Razoumny YuN. Satellite constellation design of on-orbit servicing space system for GLOBALSTAR satellites. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2):111—122. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2019-20-2-111-122
2. Sukhoi YuG. *Korrekcii orbit geostacionarnykh sputnikov: V 3-h chastyah. CHast' 1. Osobennosti upravleniya orbital'nym dvizheniem i vozmushcheniya orbit geostacionarnykh sputnikov: Posobie dlya specialistov [Correction of the orbits of geostationary satellites: In 3 parts. Part 1. Features of orbital motion control and perturbation of the orbits of geostationary satellites: A manual for specialists]*. Moscow: Sputnik+ Publ.; 2011. (In Russ.)
3. Malyshev VV, Starkov AV, Fedorov AV. Orbital corrections of space vehicles while performing dynamic operations. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2013;52(2):313—325.
4. Malyshev VV, Starkov AV, Tolstenkov PS, Fedorov AV. Methods for maintaining the structure of the high-orbit constellation of spacecraft to compensate for the deterioration of its functionality. *Cosmonautics and rocket engineering*. 2017;2(95):37—45. (In Russ.)
5. Malyshev VV, Bobronnikov VT, Starkov AV. The joint solution of problem of evasion and keeping in a neighborhood reference orbit. *Advances in the Astronautical Sciences*. CA, USA: Univelt Inc. 2020;170:433—442.
6. Malyshev VV, Starkov AV. Development of program-modeling complex methodology for dynamic spacecraft operations and its means of testing. *Trudy MAI*. 2012;57:8. (In Russ.)



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-184-195


УДК 62-233.27

Научная статья / Research article

Теоретическое обоснование новых особенностей работы подшипников качения в условиях комбинированного нагружения

В.В. Кириловский , Ю.В. Белоусов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет),
Российская Федерация, 105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

 E-mail: kvv@bmstu.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 20 января 2021 г.

Доработана: 12 марта 2021 г.

Принята к публикации: 12 апреля 2021 г.

Аннотация. В изделиях авиационной и космической техники широко применяются подшипники качения. Для обеспечения их длительной безотказной работы необходимо иметь точную и достоверную информацию о силах, действующих на подшипники. Требуемые значения сил и, соответственно, требуемую долговечность подшипников обычно определяют на основе традиционной расчетной схемы двухопорной балки, то есть гладкой балки, установленной на две шарнирные опоры. В работе представлена новая интерпретация особенностей работы подшипниковых узлов на шариковых радиальных однорядных подшипниках, установленных по схеме враспор. Показано, что в условиях комбинированного нагружения, включающего радиальную и осевую силы, общепринятая теоретическая модель двухопорной балки не реализуется. Не существует какой-либо одной расчетной модели, адекватно отражающей характер взаимодействия деталей подшипников на всем диапазоне внешних нагрузок. В наиболее общем случае эта модель может быть представлена последовательностью из пяти статически неопределимых расчетных схем, видоизменяющихся и преобразующихся одна в другую. Так, при возрастании внешней радиальной силы сначала реализуется схема «заделка с дополнительной шарнирной опорой», которая затем преобразуется в схему «двухсторонняя заделка», а та в дальнейшем преобразуется в схему «две сдвоенные шарнирные опоры». Возможна реализация также и двух промежуточных переходных схем. На конкретном примере показано, что в изделиях авиационной и космической техники определение долговечности подшипников на основе традиционной модели нецелесообразно, поскольку ее значение может оказаться существенно завышенным.

Ключевые слова: опоры валов, расчетная схема, реакции в опорах

Для цитирования

Кириловский В.В., Белоусов Ю.В. Теоретическое обоснование новых особенностей работы подшипников качения в условиях комбинированного нагружения // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 184–195. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-184-195

© Кириловский В.В., Белоусов Ю.В., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Theoretical substantiation of new features of rolling bearings operation under combined loading conditions

Valeriy V. Kirilovskiy ✉, Yuri V. Belousov

Bauman Moscow State Technical University (National Research University),
5 2-ya Baumanskaya, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation
✉ E-mail: kvv@bmstu.ru

Article history

Received: January 20, 2021

Revised: March 12, 2021

Accepted: April 12, 2021

Abstract. Rolling bearings are widely used in the products of aviation and space technology. To ensure their long-term trouble-free operation, it is necessary to have accurate and reliable information about the forces acting on the bearings. The required values of forces and, accordingly, the required durability of bearings are usually determined on the basis of the traditional design scheme of a double-support beam (smooth beam mounted on two hinged supports). The paper presents a new interpretation of the features of the operation of bearing units on ball radial single-row bearings installed according to the «cross located» arrangement. It is shown that under conditions of combined loading, including radial and axial forces, the generally accepted theoretical model of a double-support beam is not implemented. There is no single calculation model that adequately reflects the nature of the interaction of bearing parts over the entire range of external loads. In the most general case, this model can be represented by a sequence of five statically indeterminate calculation schemes, which are modified and transformed into one another. So, with an increase in the external radial force, the “cantilevered beam with additional hinge support” scheme is first implemented, which, then, is transformed into the “double-sided jamming” scheme, and that, later, is transformed into the “two double hinge supports” scheme. It is also possible to implement two intermediate transition schemes. A specific example shows that in the products of aviation and space technology, determining the durability of bearings based on the traditional model is not advisable, since it can give an overestimated value with an error of 28,37 to 26663,9 times.

Keywords: shaft supports, design scheme, reactions in supports

For citation

Kirilovskiy VV, Belousov YuV. Theoretical substantiation of new features of rolling bearings operation under combined loading conditions. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):184–195. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-184-195

Введение

В изделиях авиационной и космической техники подшипниковые узлы являются не только одними из наиболее часто используемых, но в то же время одними из наиболее ответственных элементов конструкций. Это связано с тем, что нарушение работоспособности даже одного подшипника может явиться причиной прекращения работоспособности всего изделия в целом или стать причиной внезапной тяжелой аварии, например, при разрушении опор ротора турбореактивного двигателя (ТРД). В связи с этим к подшипникам предъявляются очень высокие требования по безотказной работе в течение длитель-

ного срока эксплуатации, причем часто эти требования усугубляются неблагоприятными или предельными условиями окружающей среды — высокими или низкими температурами, высоким давлением или вакуумом, высокой скоростью вращения или ударными нагрузками. Все это может способствовать ускоренному выходу подшипников из строя. Однако перечисленные условия эксплуатации сами по себе без внешней нагрузки не могут вызвать повреждение подшипников — ни каждое в отдельности, ни в совокупности друг с другом. Если же разрушение подшипников все-таки происходит, то главной причиной такого

разрушения являются высокие значения внешних сил, действующих на подшипники.

Эти силы, безопасные в обычных условиях эксплуатации, могут в неблагоприятных условиях воздействовать на подшипники следующим образом: с одной стороны, они могут сформировать в теле деталей подшипников или на поверхностях их контакта критическое напряженно-деформированное состояние, способное либо повредить поверхностные слои деталей, либо разрушить детали полностью. А с другой стороны, например, высокая температура, может существенно ухудшить свойства применяемого смазочного материала и тогда большие внешние силы, действующие на подшипники, разрушат масляные пленки на контактных поверхностях, что также может в дальнейшем привести к повреждению поверхностных слоев деталей подшипников.

Поэтому для повышения надежной работы изделий авиационной и космической техники необходимо на этапах проектирования и эксплуатации подшипниковых узлов знать состав, величину и направление сил, действующих на подшипники.

В настоящее время устоявшейся, общепринятой и общепризнанной теоретической моделью для определения сил, действующих на подшипники, является, на первый взгляд, естественная и очевидная теоретическая модель, основанная на расчетной схеме, которую мы называем «простой двухопорной балкой» [1–5] (рис. 1, а). В этой схеме вал, независимо от его конструкции, изображают в виде гладкой балки, а подшипники заменяют шарнирными опорами. Применение данной расчетной схемы основано на предположении о том, что поведение под нагрузкой подшипникового узла и двухопорной балки эквивалентно, то есть валы деформируются так же, как двухопорная балка, а подшипники ведут себя аналогично шарнирным опорам. Под действием внешней радиальной силы F_r традиционная балка прогибается, а ее свободные концы поднимаются вверх. При этом внутренние кольца подшипников вместе с посадочными участками вала должны совершать повороты на угол α (рис. 1, ж). Эти повороты мы будем называть шарнирными поворотами. Если же в реальной конструкции перемещения свободных концов вала будут отличаться от традиционно ожидаемых, двухопорную балку потребуется

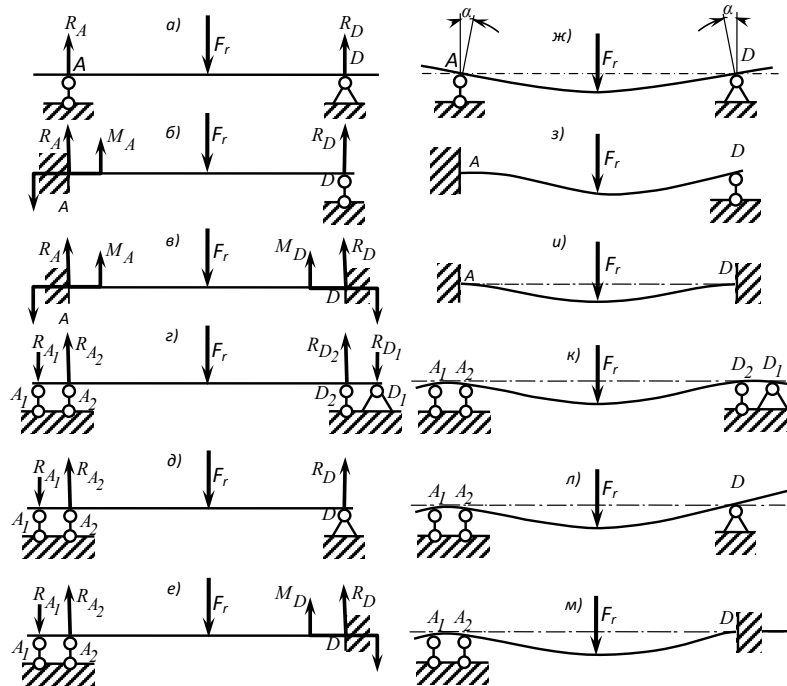


Рис. 1. Реакции в опорах и форма упругой линии балок до (а-е) и после деформации (ж-м): а – статически определяемая двухопорная балка; б-е – статически неопределимые балки

Figure 1. Reactions in the supports and the shape of the elastic line of the beams before (a-e) and after deformation (ж-м): а – statically definable double-support beam; б-е – statically indeterminate beams

заменить другой моделью, более точно отражающей поведение подшипникового узла.

При анализе любой балки наиболее важными параметрами являются реакции в опорах, поскольку именно они представляют собой силы, действующие непосредственно на подшипники и, соответственно, именно они определяют долговечность подшипников в любых условиях эксплуатации.

Детальными исследованиями [6—8] установлено, что не существует какой-либо одной теоретической модели, адекватно описывающей поведение подшипниковых узлов, установленных враспор. Так, реальное поведение шариковых радиальных однорядных подшипников наиболее полно описывает последовательность из пяти статически неопределимых схем — трех основных: «заделка с дополнительной шарнирной опорой» (рис. 1, б), «двухсторонняя заделка» (рис. 1, в), «две сдвоенные шарнирные опоры» (см. рис. 1, г) и двух промежуточных переходных схем: «слева сдвоенная шарнирная опора, справа — обычная шарнирная опора» (рис. 1, д) и «слева сдвоенная шарнирная опора, справа — заделка» (рис. 1, е).

При проведении исследований мы поставили перед собой следующие цели:

- подробно рассмотреть поведение шариковых радиальных однорядных подшипников, установленных враспор, в условиях комбинированного нагружения, включающего постоянную осевую F_a и непрерывно возрастающую радиальную F_r силы;
- дать теоретическое обоснование модели, включающей в себя пять статически неопределимых расчетных схем;
- установить, вносят ли статически неопределимые схемы существенные особенности в характер нагружения подшипников и повлияют ли эти особенности на традиционно определяемую их долговечность.

1. Материалы и методы исследования

Тип опор, изображаемых на расчетной схеме, и реакции в них отражают способность подшипникового узла противостоять прогибам вала. Внешне эта способность проявляется в том, какие перемещения в пространстве совершают под нагрузкой свободные концы вала (рис. 1).

Так, если под действием радиальной силы F_r , направленной вниз, один или оба свободных конца вала поднимаются вверх (оба конца на рис. 1, ж или же

правые концы на рис. 1, з или на рис. 1, л), такие перемещения могут обеспечить только шарнирные опоры. Поэтому подшипники, ближайšie к указанным концам вала, можно на расчетных схемах изображать шарнирными опорами. В этом случае поперечные сечения вала, расположенные на шарнирных опорах, совершают шарнирные повороты на угол α .

Если в течение определенного промежутка времени свободные концы неподвижны в пространстве, такую фиксацию может обеспечить только заделка, поэтому подшипники, ближайšie к соответствующим концам вала, выполняют функцию заделки. В заделке шарнирный поворот балки невозможен. На рис. 1, з функцию заделки выполняет левый подшипник, на рис. 1, м — правый подшипник, а на рис. 1, и — оба подшипника.

Если же один или оба свободных конца опускаются вниз (рис. 1, к, л, м), каждый из соответствующих подшипников следует представлять на расчетной схеме двумя шарнирными опорами, расположенными на расстоянии друг от друга меньше ширины подшипника. Такие сложные опоры мы называем сдвоенными шарнирными опорами.

Наличие переходных схем (рис. 1, д, е) объясняется тем, что в основных расчетных схемах преобразование одного типа опоры в другой не может происходить мгновенно и одновременно в обоих подшипниках. Эти преобразования развиваются в течение конечного отрезка времени и в правой опоре происходят с некоторым запаздыванием по времени.

Перемещения свободных концов вала зависят от того, как детали подшипников при взаимодействии друг с другом оказывают сопротивление таким перемещениям. Поэтому тип опор, функции которых выполняют подшипники в каждый момент нагружения, могут быть установлены только на основе анализа характера взаимодействия деталей подшипников под нагрузкой.

2. Результаты исследования

Рассмотрим характер взаимодействия деталей шариковых радиальных однорядных подшипников, установленных враспор (рис. 2), а также то, как видоизменяется их взаимодействие под нагрузкой.

В исходном ненагруженном состоянии (рис. 2, а) между шариками и дорожками качения наружных

и внутренних колец имеются радиальный G_r и осевой G_a зазоры (рис. 2, в), зависящие от размеров дорожек качения и шариков. Условно считаем, что эти внутренние зазоры симметрично расположены относительно контура шариков. На величину зазоров кольца могут смещаться относительно друг друга в радиальном и осевом направлениях.

Приложим к валу комбинированную нагрузку F_r и F_a и на основе принципа суперпозиции проследим за тем, какое воздействие на подшипниковый узел оказывает сначала сила F_a , а затем — сила F_r . Под действием силы F_a (рис. 2, б) вал вместе с внутренними кольцами сместится вправо на величину осевого зазора G_a . По окончании смещения все шарики левого и правого подшипников окажутся защемленными между внутренними и наружными кольцами в точках касания A_1 и A_2 , A_3 и A_4 , а также D_1 и D_2 , D_3 и D_4 .

Здесь и далее мы используем термины «правый», «левый», «вверх», «вниз», имея в виду направления относительно изображения, представленного на рис. 2. Если в реальной конструкции изменить расположение конструктивных элементов или направления действия сил, следует соответствующим образом изменить и термины.

В результате последующего приложения и внешней радиальной силы F_r (см. рис. 2, б) вал прижимается к опорным точкам A_3 , D_3 и между опорами прогибается, а свободные концы слева и справа стремятся подняться вверх. Легко видеть, что подъем левого конца невозможен, так как верхний шарик защемлен между дорожками качения наружного и внутреннего колец. Поэтому левый конец вала остается неподвижен в пространстве. Когда мы используем термины «верхний» или «нижний» шарики, мы имеем в виду не один, а группу шариков, расположенных выше или ниже оси вала.

Как известно, если, реакции в опоре исключают перемещение конца вала (или балки), такая опора называется заделкой. Следовательно, в данный момент времени левый подшипник выполняет функцию не шарнирной опоры, а заделки. И поэтому именно заделкой он должен быть представлен на расчетной схеме (см. рис. 1, б).

Теперь обратимся к правому подшипнику (см. рис. 2, б). В результате осевого смещения вала

под действием осевой силы здесь также происходит защемление шариков, но его характер имеет ряд особенностей. Между шариками и теми частями дорожек качения, которые находятся слева от точек касания D_1 и D_4 и справа от точек D_2 и D_3 , формируются клинообразные зазоры, максимальная величина которых равна G_a — величине внутреннего осевого зазора в подшипнике.

При прогибе вала между опорами правый конец вала стремится подняться вверх, а внутреннее кольцо правого подшипника стремится совершить шарнирный поворот против часовой стрелки вокруг точки D_3 . Такому повороту в пределах внутренних зазоров подшипника не препятствуют никакие конструктивные элементы подшипникового узла. Поэтому внутреннее кольцо повернется на некоторый угол. Следовательно, пока зазоры в правом подшипнике не будут выбраны, правая опора на расчетной схеме (см. рис. 1, б) может быть признана шарнирной. А сама расчетная схема станет статически неопределимой — «заделка с дополнительной шарнирной опорой» (см. рис. 1, б).

Шарнирный поворот внутреннего кольца правого подшипника завершится, когда внутренние зазоры подшипника будут полностью выбраны (рис. 3). После этого все шарики окажутся защемленными между внутренним и наружным кольцами в точках D_1^* и D_2^* , а также D_3 и D_4 .

В этой ситуации подъем правого свободного конца вала прекратится, ось вала окажется зафиксированной в каком-то пространственном положении. Поэтому правая опора может быть, по аналогии с левым подшипником, признана заделкой. Если шарики окажутся защемленными и в левом, и в правом подшипниках, текущей расчетной схемой станет «двухсторонняя заделка» (см. рис. 1, в). В такой схеме оба конца вала под нагрузкой некоторое время останутся неподвижными.

Обратим внимание на важную особенность заделки в левом подшипнике. Нижняя часть сечения внутреннего кольца (см. рис. 2, б), расположенная над клиновым зазором (справа от точки A_3), нависает над нижним шариком и не испытывает подпора снизу. Поэтому общий прогиб вала между точками A_3 и D_3 может вызвать локальную упругую деформацию («проседание») этой нависающей части. «Проседание» будет иметь следующие последствия. По мере увеличения «проседания» точка контакта дорожки качения

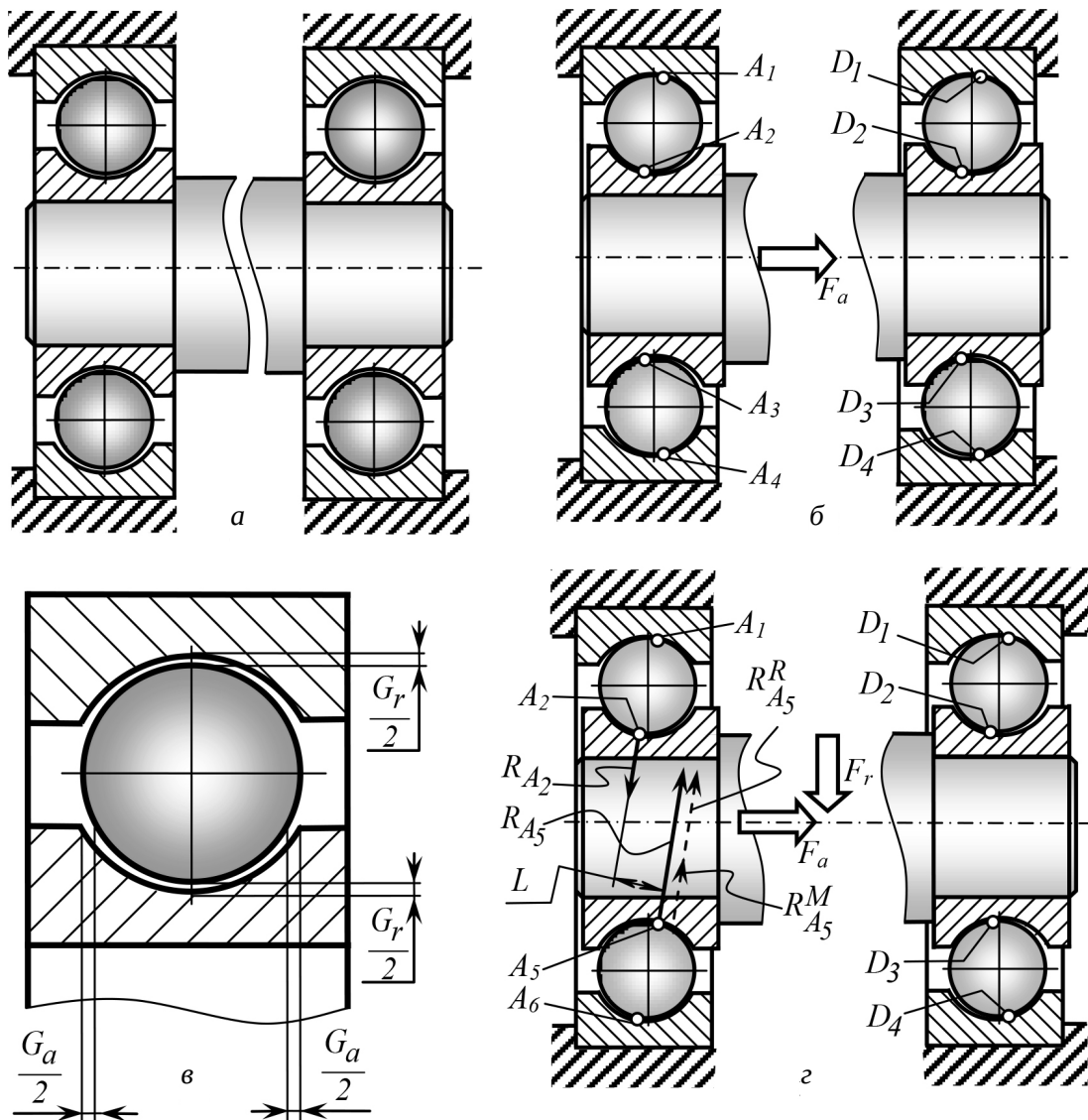


Рис. 2. Характер взаимодействия деталей подшипников в условиях комбинированного нагружения: а – внешняя нагрузка отсутствует; б – смещение вала под действием осевой силы F_a ; в – внутренние осевой G_a и радиальный G_r зазоры в подшипнике; г – «проседание» нижней части сечения внутреннего кольца левого подшипника

Figure 2. The nature of the interaction of bearing parts under combined loading conditions: а – no external load; б – displacement of the shaft under the action of axial force F_a ; в – internal axial G_a and radial G_r clearances in the bearing; г – “sagging” of the lower section of the inner ring of the left bearing

внутреннего кольца с шариком будет перемещаться по контуру шарика из точки A_3 в некоторую точку A_5 (рис. 2, г), конкретное положение которой зависит от жесткости вала и величины радиального зазора в подшипнике. При этом левый конец вала не будет изменять свое положения в пространстве. Состояние заделки слева сохранится.

Если после образования заделки справа (см. рис. 3) радиальная сила F_r будет возрастать, заделки слева

и справа преобразуются в сдвоенные шарнирные опоры. Расчетной схемой становится схема «две сдвоенные шарнирные опоры» (см. рис. 1, г).

Механизм формирования заделки и последующее ее преобразование в сдвоенную шарнирную опору поясним на примере левого подшипника. В точках A_2 и A_5 (рис. 2, г) развиваются противоположно направленные реакции R_{A_2} и R_{A_5} (изображены основными линиями), с которыми верхний и нижний шарики воздействуют

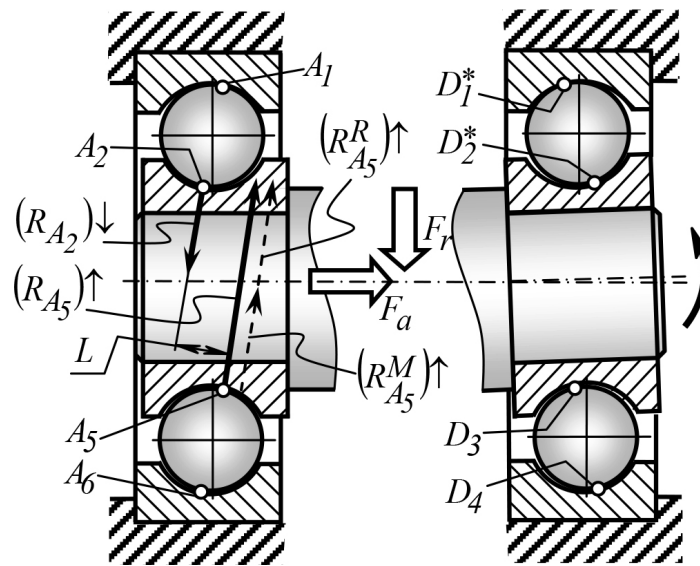


Рис. 3. Формирование схемы «две сдвоенные шарнирные опоры»
 Figure 3. Formation of the «two dual hinged support» scheme

на внутреннее кольцо и тем самым фиксируют левый конец вала, не позволяя ему подниматься. Величина реакции R_{A_5} в точке A_5 больше реакции R_{A_2} . Это объясняется тем, что внешняя радиальная сила F_r воздействует на точку A_5 непосредственно, а силовое воздействие на точку A_2 является вторичным и развивается в результате стремления левого конца вала подняться вверх. Так как $R_{A_5} > R_{A_2}$, разобьем: вектор реакции \vec{R}_{A_5} на два вектора $\vec{R}_{A_5}^R$ и $\vec{R}_{A_5}^M$ (обозначены пунктирными линиями). Поэтому $\vec{R}_{A_5} = \vec{R}_{A_5}^R + \vec{R}_{A_5}^M$. Пусть также $R_{A_2} = R_{A_5}^M$. Таким образом, векторы \vec{R}_{A_2} и $\vec{R}_{A_5}^M$ представляют собой пару сил, создающую изгибающий момент $M = R_{A_5}^M \cdot L = R_{A_2} \cdot L$, где L — плечо указанной пары сил, которая фиксирует левый конец вала и исключает его подъем. То есть в данном состоянии левый подшипник, благодаря указанной паре сил, выполняет функцию заделки. Из курса сопротивления материалов известно, что в заделке возникает изгибающий момент (в нашем случае это пара сил \vec{R}_{A_2} и $\vec{R}_{A_5}^M$) и радиальная реакция (в нашем случае это $\vec{R}_{A_5}^R$). Вектор $\vec{R}_{A_5}^R$ является радиальной реакцией,

поскольку направлен по радиусу к контуру дорожки качения внутреннего кольца. Верхний индекс R в выражении $R_{A_5}^R$ означает, что это часть полной реакции в точке A_5 , являющейся «классической» радиальной реакцией в заделке. Верхний индекс M в выражении $R_{A_5}^M$ означает, что это часть полной реакции в точке A_5 , которая является составляющей пары сил, создающей «классический» момент M в заделке.

Пока величины реакций \vec{R}_2 и \vec{R}_5 невелики, они способны только удерживать левый конец вала от подъема.

При увеличении внешней радиальной силы F_r увеличивается прогиб вала между левым и правым подшипниками и, следовательно, увеличивается силовое воздействие шариков на точки A_2 и A_5 . Соответственно, реакции в этих точках увеличиваются, а их значения обозначим $(R_{A_2}) \downarrow$ и $(R_{A_5}) \uparrow$ (стрелки, направленные вверх или вниз, означают увеличенные значения реакций) (см. рис. 3). По аналогии с предыдущим запишем

$$(R_{A_5}) \uparrow = (R_{A_5}^R) \uparrow + (R_{A_5}^M) \uparrow \quad \text{и} \quad (R_{A_2}) \downarrow = (R_{A_5}^M) \uparrow.$$

Увеличенная пара сил $(R_{A_2}) \downarrow$ и $(R_{A_5}^M) \uparrow$ стремится опустить левый конец вала вниз и, когда увеличенный изгибающий момент $M = (R_{A_5}^M) \uparrow \cdot L = (R_{A_2}) \downarrow \cdot L$, соз-

даваемый этой парой сил, преодолеет сопротивление вала, зависящее от его жесткости, левый конец опустится вниз. Следовательно, левый подшипник станет выполнять функцию двух шарнирных опор: A_2 и A_5 (мы называем это состояние сдвоенной шарнирной опорой). После образования заделки в правом подшипнике сдвоенная шарнирная опора будет сформирована аналогичным образом и там. Текущей расчетной схемой станет схема «две сдвоенные шарнирные опоры» (см. рис. 1, г), при которой оба свободных конца вала (и левый, и правый) будут стремиться опуститься вниз (рис. 1, к).

Дальнейшее увеличение радиальной силы F_r не приведет к изменению вида опор на расчетной схеме вплоть до разрушения вала или подшипников.

3. Обсуждение

1. При установке шариковых радиальных однорядных подшипников по схеме враспор и приложении к валу комбинированной нагрузки, включающей осевую F_a и непрерывно возрастающую радиальную F_r силы, подшипники не выполняют функции, предписываемые традиционной расчетной схемой двухопорной балки. А в действительности происходит преобразование вида опор, функцию которых в каждый момент времени выполняют подшипники. Так, слева исходная заделка (см. рис. 2, б) преобразуется в сдвоенную шарнирную опору (см. рис. 3), а справа — исходная шарнирная опора (см. рис. 2, г) преобразуется сначала в заделку (см. рис. 3), а затем уже — в сдвоенную шарнирную опору (см. рис. 1, г). Следовательно, развиваются три основные расчетные схемы «заделка с дополнительной шарнирной опорой» (см. рис. 1, б), «двухсторонняя заделка» (см. рис. 1, в) и «две сдвоенные шарнирные опоры» (см. рис. 1, г).

Новые расчетные схемы, отличные от традиционной схемы, очень важны для изделий авиационной и космической техники, поскольку состав, направления и величина действительных реакций в этих схемах отличаются от традиционно ожидаемых. А это, в свою очередь, означает, что силы, действующие на подшипники, а также их работоспособность и долговечность могут существенно отличаться от значений, предписываемых традиционной методикой расчета подшипников

(конкретный пример будет показан ниже). Это может быть чревато тяжелыми авариями, неожиданными и необъяснимыми с точки зрения существующей теории.

2. Принимая во внимание выявленные новые особенности, связанные со статически неопределимыми схемами, потребуется разработать новые рекомендации по проектированию подшипниковых узлов с тем, чтобы гарантировать их работу в условиях расчетной схемы, которая будет наиболее благоприятной в заданных условиях эксплуатации.

3. Потребуется внести изменения во многие традиционно сформировавшиеся представления об изготовлении, регулировке и эксплуатации подшипниковых узлов.

4. Потребуется также доработать методику расчета подшипников на долговечность, поскольку традиционная методика предполагает, что на подшипник действует либо одна радиальная сила, либо группа сил, которая может быть приведена к одной суммарной силе.

5. Необходимо будет сформулировать и ввести в научно-технический обиход новые понятия статической радиальной и динамической радиальной грузоподъемностей, вероятно, отдельно для каждой расчетной схемы, либо разработать новые аналогичные понятия, а также отразить их в новых справочниках и каталогах производителей подшипников (потребуется указывать по пять значений статической радиальной и по пять значений динамической радиальной грузоподъемностей для каждого подшипника применительно к каждой расчетной схеме). В существующих стандартах эти термины основаны на представлении о простой двухопорной балке и, соответственно, под ними понимают одну радиальную силу, действующую на подшипник, в то время как, например, в заделке таких сил три: $R_{A_2}, R_{A_5}^M, R_{A_5}^R$.

6. Необходимо будет разработать новые методики испытаний подшипников отдельно для каждой расчетной схемы, поскольку из-за того, что состав и величина реакций в них не взаимосвязаны, долговечность подшипников во всех схемах будет различной.

7. Потребуется также разработка новых методик расчета валов на статическую прочность и выносливость, так как существующие методики основаны на использовании расчетной схемы двухопорной балки.

8. Реакции R_{A_2} и R_{A_5} , возникающие в точках A_2 и A_5 (рис. 2, г), удерживают левый конец вала от подъема, вызываемого общим прогибом вала между опорами. Для осуществления такого удержания необходимо, чтобы величины R_{A_2} и R_{A_5} были больше, чем реакции в традиционной двухопорной балке. Поэтому подшипники в действительности работают в более тяжелых условиях, чем предполагалось ранее, и можно ожидать снижения их действительной долговечности по сравнению с расчетной, определяемой по традиционной методике (см. конкретный пример применения).

На этот факт обратили внимание и ведущие производители подшипников. Расхождение между расчетным и действительным ресурсом может достигать до 3...5 раз [9], а по некоторым данным — до 50...100 раз [1]. Было высказано предположение, что такое расхождение связано с особенностями состояния масляного слоя, температурными эффектами в нем [10; 11], загрязнением смазки [2; 3; 12; 13], а также особенностями контактного взаимодействия и контактного разрушения тел качения и дорожек качения [14–16]. Необходимость учета этих и других параметров при постоянных и переменных условиях нагружения нашли отражение в [12; 13], а также работах известных ученых [17–20], направленных на повышение нагрузочной способности и долговечности подшипников. Но, вероятнее всего, причина расхождений между расчетным и действительным ресурсом заключается именно в более тяжелых условиях работы подшипников, чем предполагает традиционная методика.

9. Конкретный пример применения.

Для объективного прогнозирования долговечности проектируемых подшипниковых узлов и, соответственно, ресурса их безотказной работы в изделиях авиационной и комической техники необходимо дать ответы на следующие вопросы: 1) какова величина реальных сил, действующих на подшипники (реакций в опорах статически неопределимых схем); 2) можно ли оценить степень влияния этих реакций на долговечность подшипников по сравнению с общепринятым подходом, основанным на традиционной расчетной схеме; 3) имеет ли вообще смысл учитывать в реальной практике статически неопределимые схемы.

В данном примере будут даны ответы на поставленные вопросы.

Исходные данные. Вал нагружен комбинированной нагрузкой, причем радиальная сила $F_r = 1244$ Н приложена посередине между левой опорой A и правой опорой D . Применены подшипники 305 ГОСТ 8338—75. Внутренний диаметр подшипников $d = 25$ мм, внешний диаметр $D = 62$ мм, ширина $B = 17$ мм; расстояние между серединами подшипников $l = 76$ мм; вал гладкий $\varnothing 25$ мм. Все геометрические и силовые параметры взяты из реально проведенных авторами экспериментов.

Сравним величины реакций в опорах A и D , а также оценим долговечность подшипников в двух вариантах: 1) в традиционном подходе (см. рис. 1, а) на основе двухопорной балки и 2) в наиболее мягкой статически неопределимой расчетной схеме «заделка с дополнительной шарнирной опорой» (см. рис. 1, б).

Радиальные реакции в опорах по традиционной схеме (индекс 1 после скобок):

$$(R_A)_1 = (R_D)_1 = F_r/2 = 622 \text{ Н.}$$

Схема по рис. 1, б (всем параметрам присвоен индекс 2 после скобок). Из курса сопромата известно, что в левой опоре A (заделка) возникает радиальная реакция $(R_A)_2 = (R_{A_5}^R)_2 = \frac{11}{16} \cdot F_r = 855,25$ Н

и момент $(M_A)_2 = \frac{3}{16} \cdot F_r \cdot l = 17727$ Н·мм, а в правой шарнирной опоре D — радиальная реакция $(R_D)_2 = \frac{5}{16} \cdot F_r = 388,75$ Н.

Чем дальше влево в направлении оси вала будет смещена точка A_2 (см. рис. 3) и чем дальше вправо будет смещена точка A_5 , тем больше будет величина плеча L и тем меньше будет величина сил R_{A_2} и $R_{A_5}^M$. Так как положение точек A_2 и A_5 зависит от конкретных параметров подшипникового узла и пока нам неизвестно, определим реакции в заделке для следующих пяти предполагаемых значений L : $L_1 = 1$ мм, $L_2 = 2$ мм, $L_3 = 5$ мм, $L_4 = 10$ мм и $L_5 = 17$ мм (табл. 1).

В настоящее время не существует методики для определения величины долговечности L_S подшипников на основе статически неопределимых схем. Поэтому для того, чтобы можно было сравнить долговечность L_S с традиционной долговечностью L , опираясь на традиционную методику, упростим задачу и в схеме «заделка с дополнительной шарнирной

опорой» оценку будем вести по величине реакций в заделке (наиболее нагруженная левая опора A). При этом введем следующие допущения:

а) реакции от внешней осевой силы F_a учитывать не будем;

б) в заделке влияние радиальных реакций будем оценивать только по величине полной радиальной реакции в точке A_5 (см. рис. 3): $R_{A_5} = R_{A_5}^M + R_{A_5}^R$ (это наибольшая радиальная реакция в данной опоре); влияние реакции R_{A_2} учитывать не будем.

Сравнение L_S с L будем производить в следующей последовательности. Для каждого выбранного значения плеча L определяем:

1) величину $R_{A_5}^M$ — составляющую пары сил, формирующих так момент M_A : $M = R_{A_5}^M \cdot L = 17727 \text{ Н} \cdot \text{мм}$, $R_{A_5}^M = \frac{17727}{L} \text{ Н}$;

2) полную реакцию в точке A_5 :

$$A_5: (R_{A_5})_2 = R_{A_5}^M + R_{A_5}^R = R_{A_5}^M + 855,25 \text{ Н};$$

3) величину ΔR превышения реакции $(R_{A_5})_2$ в статически неопределимой схеме над реакцией $(R_A)_1 = 622 \text{ Н}$ в двухопорной балке: $\Delta R = (R_{A_5})_2 / 622$;

4) степень снижения ΔL действительной долговечности L_S в статически неопределимой схеме

по сравнению с традиционной долговечностью L : $\Delta L = \frac{L}{L_S}$. В соответствии с традиционной методикой

$$\Delta L = (\Delta R)^3.$$

Результаты вычислений приведены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, что для подшипниковых узлов, работающих в изделиях авиационной и космической техники в условиях расчетной схемы «заделка с дополнительной шарнирной опорой», нецелесообразно определять долговечность L подшипников традиционным способом, основанным на общепринятой двухопорной балке, поскольку будут получены неоправданно оптимистичные (завышенные) результаты с ошибкой от 28,37 до 26663,9 раза. Причем такие результаты будут получены даже, если в конструкции будут учтены все общепринятые рекомендации по рациональному проектированию аналогичных узлов. Применительно к изделиям авиационной и космической техники указанное расхождение является безусловно, неприемлемым. Это указывает на настоятельную необходимость разработки новых методов расчетов, проектирования, изготовления, эксплуатации и испытаний ответственных подшипниковых узлов. Все эти методы должны быть основаны на реальных статически неопределимых расчетных схемах.

Таблица 1

Оценка степени снижения реальной долговечности L_S подшипников в статически неопределимой схеме «заделка с дополнительной шарнирной опорой» по сравнению с традиционной методикой

Table 1

Assessment of the degree of reduction in the actual durability of bearings in the statically indeterminate scheme «cantilever beam with an additional pivot bearing» in comparison with the traditional method

№ п/п	$L, \text{ мм}$	$R_{A_5}^M = 17727/L, \text{ Н}$	$(R_{A_5})_2 = R_{A_5}^M + 855,25, \text{ Н}$	$\Delta R = (R_{A_5})_2 / 622, \text{ Н}$	$\Delta L = (\Delta R)^3$
1.	$L_1 = 1$	$R_{A_5}^M = 17727$	18582,25	29,875	26663,9
2.	$L_2 = 2$	$R_{A_5}^M = 8863,5$	9718,75	15,625	3814,7
3.	$L_3 = 5$	$R_{A_5}^M = 3545,4$	4400,65	7,075	353,4
4.	$L_4 = 10$	$R_{A_5}^M = 1772,7$	2627,95	4,225	75,42
5.	$L_5 = 17$	$R_{A_5}^M = 1042,8$	1898,05	3,05	28,37

Выводы

1. Для условий комбинированного нагружения разработана теоретическая модель поведения шариковых радиальных однорядных подшипников, установленных враспор. Обоснование данной модели, получившей экспериментальное подтверждение, выполнено на основе анализа реального взаимодействия деталей подшипников под нагрузкой. Модель включает в себя пять статически неопределимых расчетных схем.

2. Полученные результаты более адекватно, чем традиционная расчетная схема, описывают характер нагружения и поведение подшипниковых узлов на шариковых радиальных однорядных подшипниках, поэтому указанные результаты могут быть применимы в изделиях авиационной и космической техники, то есть в областях, где широко применяются подшипники качения и требуется их длительная безотказная работа.

Список литературы

1. Носов В.В. Подшипниковые узлы современных машин: энциклопедический справочник. М.: Изд-во «Машиностроение», 1997. 639 с.
2. Фомин М.В. Определение коэффициентов эквивалентности для переменных режимов нагружения зубчатых передач и подшипников качения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2007. № 8. С. 39—48.
3. Фомин М.В. Расчет опор с подшипниками качения с учетом новых стандартов // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. № S3. С. 1—16. doi:10.14489/hb.supr.2017.03.pp.001-016
4. Генеральный каталог. М.: Изд-во ЕПК, 2011. 448 с.
5. Rolling bearings, PUB BU/P1 10000/36, EN August 2016, SKF group 2016. 1362 p.
6. Андропова А.Г., Майоров А.С., Талипов Т.И. Совершенствование методики расчета валов на статическую прочность // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 12. 24 с.
7. Кириловский В.В., Москвин В.А. Новый подход к выбору расчетной схемы для роликовых конических подшипников, установленных враспор // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 9. С. 24—29.
8. Полубарьев И.Н., Дворянинов И.Н., Салиев Е.Р. Экспериментальная проверка нового подхода к определению нагрузок, действующих на шариковые радиальные однорядные подшипники // Форум молодых ученых. 2017. № 9 (13). С. 591—600.

9. Орлов А.В. Определение нагруженности рабочих поверхностей опор качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 5. С. 73—79.

10. Ряховский О.А., Гончаров С.Ю., Сыромятников В.С. Экспериментальное определение температуры в подшипниках качения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. № 10. С. 3—9.

11. Сыромятников В.С., Гончаров С.Ю., Ряховский О.А. Экспериментальное исследование подшипников качения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 3. С. 11—18.

12. Международный стандарт ISO 281:2007. Dynamic load ratings and rating life.

13. ГОСТ 18855—2013. Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и номинальный ресурс. М.: Изд-во Стандартиформ, 2014. 50 с.

14. Матвиенко Ю.Г., Бубнов М.А. Контактное взаимодействие и разрушение поверхностного слоя в условиях трения качения и заклинивания // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 4. С. 43—49.

15. Нахатакян Ф.Г. Механика контактного сближения упругих тел в задаче Герца // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 5. С. 48—56.

16. Нахатакян Ф.Г. Расчетное определение упругой податливости роликовых подшипников на основе теории Герца // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 1. С. 28—32.

17. Орлов А.В. Оценка надежности шарикоподшипника по критерию стабильности сцепления // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2004. № 4. С. 77—83.

18. Орлов А.В. Влияние износа на работоспособность опор качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 5. С. 71—79.

19. Павлов В.Г. Ресурс работы радиального шарикоподшипника по условию предельно допустимого износа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 6. С. 102—111.

20. Орлов А.В. Повышение статической грузоподъемности шарикоподшипников // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 5. С. 67—70.

References

1. Nosov VV. *Podshipnikovye uzly sovremennyh mashin: Enciklopedicheskij spravochnik [Bearing units of modern machines: Encyclopedic reference book]*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1997. (In Russ.)
2. Fomin MV. *Opredelenie koefitsientov ekvivalentnosti dlya peremennyh rezhimov nagruzheniya zubchatyh peredach i podshipnikov kacheniya [Determination of equivalence coefficients for variable loading modes of gears and rolling*

bearings]. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal (Handbook. An Engineering journal with appendix)*. 2007;8:39–48. (In Russ.)

3. Fomin MV. Calculations of rolling bearings supports according to new standards. *Spravochnik. Inzhenernyi zhurnal» (Handbook. An Engineering journal with appendix)*. 2017; S3:1–16. (In Russ.) doi: 10.14489/hb.sup.2017.03.pp.001-016

4. *General'nyj katalog [General catalog]*. Moscow: EPK, 2011. (In Russ.)

5. Rolling bearings, PUB BU/P1 10000/36, EN August 2016, SKF group 2016. 1362 p.

6. Andronova AG, Mayorov AS, Talipov TI. Improvement of the method of calculating shafts for static strength. *Youth Scientific and Technical Bulletin*. 2015;12:24. (In Russ.)

7. Kirillovskiy VV, Moskvina VA. A new approach to the choice of the calculation scheme for roller tapered bearings installed by surprise. *International journal of applied and fundamental research*. 2017;9:24–29. (In Russ.)

8. Polubariyev IN, Dvoryaninov IN, Saliev ER. Experimental verification of a new approach to the determination of the loads acting on the single-row radial ball bearings. *The forum of young scientists*. 2017;9(13):591–600. (In Russ.)

9. Orlov AV. Determination of the load on the working surfaces of the rolling bearings *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine reliability]*. 2008;5:73–79. (In Russ.)

10. Riahovskiy OA, Goncharov SIy, Syromiatnikov VS. Experimental determination of temperature in rolling bearings. *News of higher educational institutions. Mechanical Engineering*. 2014;10:3–9. (In Russ.)

11. Syromiatnikov VS, Goncharov SIy, Riahovskiy OA. Experimental study of rolling bearings. *News of higher educational institutions. Mechanical Engineering*. 2013;3:11–18. (In Russ.)

12. International standard ISO 281: 2007 «Dynamic load ratings and rating life».

13. GOST 18855—2013. Rolling bearings. Dynamic design load capacity and rated service life. Moscow, Standardinform Publ; 2014. (In Russ.)

14. Matvienko IyG, Bubnov MA. Contact interaction and destruction of the surface layer under conditions of rolling friction and jamming. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine reliability]*. 2009;4:43–49. (In Russ.)

15. Nahatakiyan FG. Mechanics of contact convergence of elastic bodies in the Hertz problem. *Problems of Mechanical Engineering and Machine reliability*. 2010;5:48–56. (In Russ.)

16. Nahatakiyan FG. Numerical determination of the elastic compliance of roller bearings using the hertz theory. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2011;40(1):23–26.

17. Orlov AV. Evaluation of the reliability of a ball bearing by the criterion of coupling stability. *Problems of Mechanical Engineering and Machine Reliability*, 2004;4:77–83. (In Russ.)

18. Orlov AV. The effect of wear on the performance of rolling bearings. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine reliability]*. 2007;5:71–79. (In Russ.)

19. Pavlov VG. Service life of a deep groove ball bearing according to the condition of maximum permissible wear. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine reliability]*. 2007;6:102–111. (In Russ.)

20. Orlov AV. Povyshenie staticheskoy gruzopod emnosti sharikopodshipnikov [Increasing the static load capacity of ball bearings]. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Machine reliability]*. 2009;5:67–70. (In Russ.)

Сведения об авторах

Кириловский Валерий Владимирович, доцент кафедры основ конструирования машин, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), кандидат технических наук; eLIBRARY SPIN-код: 4512-5571; e-mail: proekt.33@yandex.ru

Белусов Юрий Вениаминович, доцент кафедры основ конструирования машин, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), кандидат технических наук; Scopus Author ID: 57192978540, eLIBRARY SPIN-код: 7102-6966; e-mail: belou.80@mail.ru

About the authors

Valeriy V. Kirilovskiy, Associate Professor of the Department of Bases of Machine, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), PhD (Technical Sciences); eLIBRARY SPIN-code: 4512-5571; Contact information: e-mail: proekt.33@yandex.ru

Yuri V. Belousov, Associate Professor of Department of Basis of Machine, Bauman Moscow State Technical University (National Research University), PhD (Technical Sciences); Scopus Author ID: 57192978540, eLIBRARY SPIN-code: 7102-6966; e-mail: belou.80@mail.ru




DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-196-204
УДК 621.4

Научная статья / Research article

Исследование эффективности использования цикла Миллера в двигателях внутреннего сгорания

С.В. Смирнов  , А.Р. Макаров , И.А. Заев , Г.Т. Худайбергенова

Российский университет дружбы народов,
Российская Федерация, 117198, Москва ул. Миклухо-Маклая, д. 6
 E-mail: smirnov-sv@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 21 декабря 2020 г.
Доработана: 02 февраля 2021 г.
Принята к публикации: 12 февраля 2021 г.

Благодарности

Публикация подготовлена при поддержке Программы РУДН «5-100»

Участие авторов

С.В. Смирнов – концепция исследования, написание текста; А.Р. Макаров – подготовка обзора, написание текста; И.А. Заев – проведение исследований, написание текста; Г.Т. Худайбергенова – подготовка исходных данных, перевод статей по теме исследования, оформление статьи.

Аннотация. Статья посвящена исследованию возможностей повышения технико-экономических показателей двигателя внутреннего сгорания за счет использования цикла Миллера с укороченным впуском. Проведен обзор научных работ использования цикла Аткинсона и цикла Миллера в ДВС. Проведен сравнительный анализ теоретических циклов: Отто, Аткинсона и Миллера. Выполнены расчетные исследования влияния степени расширения и степени повышения давления на КПД цикла Аткинсона. Представлены соотношения, позволяющие при использовании цикла Миллера с укороченным впуском получить такой же теоретический КПД цикла, что и у цикла Аткинсона. При этом реализация цикла Миллера в реальной конструкции двигателя значительно превосходит возможности использования цикла Аткинсона. Результаты исследования показали, что использование цикла Миллера с укороченным впуском предпочтительнее, но при этом обязательно увеличение степени сжатия и давления на впуске за счет использования наддува. На примере реальных данных основных параметров цикла показано, что использование теоретического цикла Миллера может обеспечить существенное до 12,2 % повышение КПД цикла по сравнению с циклом Отто. Представлены соотношения, условия и рекомендации, позволяющие эффективно использовать цикл Миллера с укороченным впуском в реальной конструкции двигателя.

Ключевые слова: цикл Аткинсона, цикл Миллера, двигатель внутреннего сгорания, наддув, укороченный впуск

Для цитирования

Смирнов С.В., Макаров А.Р., Заев И.А., Худайбергенова Г.Т. Исследование эффективности использования цикла Миллера в двигателях внутреннего сгорания // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 196–204. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-196-204

© Смирнов С.В., Макаров А.Р., Заев И.А., Худайбергенова Г.Т., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Research of the efficiency of using the Miller cycle of an internal combustion engine

Sergei V. Smirnov  , Alexander R. Makarov , Ivan A. Zaev , Gulnara T. Khudaibergenova

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

✉ E-mail: smirnov-sv@rudn.ru

Article history

Received: December 21, 2020

Revised: February 02, 2021

Accepted: February 12, 2021

Acknowledgements

The publication was prepared with the support of the RUDN Program “5-100”

Authors' participation

S.V. Smirnov — research concept, text writing; A.R. Makarov — review preparation, text writing; I.A. Zaev — research implementation, text writing; G.T. Khudaibergenova — preparation of source data, translation of articles on the research topic, article design.

Keywords: Atkinson cycle, Miller cycle, internal combustion engine, pressurization, shortened intake

For citation

Smirnov SV, Makarov AR, Zaev IA, Khudaibergenova GT. Research of the efficiency of using the Miller cycle of an internal combustion engine. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):196–204. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-196-204

Введение

В настоящее время стремление улучшить экономические и экологические показатели двигателей внутреннего сгорания заставляют ученых и специалистов ведущих моторостроительных фирм проводить поиск нетрадиционных способов решения этих проблем. Наряду с попытками использования двигателей внутреннего сгорания с переменной степенью сжатия и переменным рабочим объемом [1—4] все большее внимание исследователей привлекают двигатели, у которых степень расширения больше фактической степени сжатия, так как это приводит к увеличению полезной работы и возрастанию термодинамического КПД двигателя.

Abstract. The article is devoted to the study of the possibilities of improving the technical and economic indicators of an internal combustion engine (ICE) through the use of the Miller cycle with a shortened intake. A review of scientific works on the use of the Atkinson cycle and Miller cycle in an internal combustion engine is carried out. A comparative analysis of theoretical cycles: Otto cycle, Atkinson cycle and Miller cycle is carried out. Calculated studies of the influence of the expansion ratio and the pressure increase ratio on the efficiency of the Atkinson cycle have been carried out. The ratios are presented that allow using the Miller cycle with a short inlet to obtain the same theoretical efficiency of the cycle as that of the Atkinson cycle. At the same time, the implementation of the Miller cycle in a real engine design significantly exceeds the possibilities of using the Atkinson cycle. The results of the study showed that the use of the Miller cycle with a shortened intake is preferable, but it must necessarily increase the compression ratio and intake pressure through the use of boost. On the example of real data of the main parameters of the cycle, it is shown that the use of the theoretical Miller cycle can provide a significant up to 12.2% increase in the efficiency of the cycle compared to the Otto cycle. The ratios, conditions and recommendations are presented that allow the effective use of the Miller cycle with a shortened intake in a real engine design.

Впервые такой двигатель был предложен Аткинсоном в 1884 г. Основная идея изобретения заключалась в следующем: повысить эффективность поршневого двигателя можно за счет увеличения рабочего хода поршня (такта расширения). В результате увеличивается полезная работа при расширении. Однако реализация данного принципа достигалась за счет использования сложной кинематической схемы с кривошипно-кулисным механизмом и увеличение эффективности двигателя нивелировалось ростом механических потерь, а снижение наполнения цилиндров свежим зарядом приводило, в свою очередь,

к снижению мощности двигателя. Поэтому двигатель Аткинсона широкого распространения не получил [5].

В 1947 г. Миллером был предложен двигатель с укороченным сжатием и продолженным расширением. Реализация данного принципа осуществлялась не за счет кинематической схемы механизма, а за счет изменения фаз газораспределения. При этом рассматривалось два варианта организации рабочего процесса: со слишком ранним закрытием впускного клапана до прихода поршня в НМТ за счет сокращения процесса впуска (в дальнейшем такой цикл будем называть циклом с укороченным впуском, циклом Миллера) (рис. 1, а) и слишком поздним на такте сжатия после НМТ (цикл с укороченным сжатием) (рис. 1, б).

Раннее закрытие впускного клапана однозначно ухудшает наполнение цилиндра. При закрытии впускного клапана после НМТ в зависимости прежде всего от скоростного режима работы и величины угла запаздывания закрытия впускного клапана наполнение может улучшиться за счет дозарядки или ухудшиться за счет обратного выброса поступившей смеси во впускной трубопровод. Запаздывание закрытия

впускного клапана на 40° — 60° п.к.в. давно используется для обеспечения дозарядки на средних и высоких частотах вращения коленчатого вала. Поэтому, когда в настоящее время рассматривается цикл Миллера с укороченным тактом сжатия, то имеется в виду цикл с большими углами запаздывания наполнения, у которого степень расширения превышает фактическую степень сжатия больше чем в 1,5 раза. В этом случае наполнение будет ухудшаться за счет обратного выброса во всем диапазоне скоростных режимов. Ухудшение наполнения цилиндров двигателя приведет к потере мощности, поэтому Миллер изначально связывает предложенную им схему работы двигателя с наддувом для компенсации потери мощности [6, 7].

В последнее время в двигателестроении все большее распространение получают двигатели, в которых эффективно регулируются фазы газораспределения и высоты подъема клапана в зависимости от режима работы. Это приводит к возрождению интереса к двигателям, работающим по циклу Миллера для повышения технико-экономических показателей и

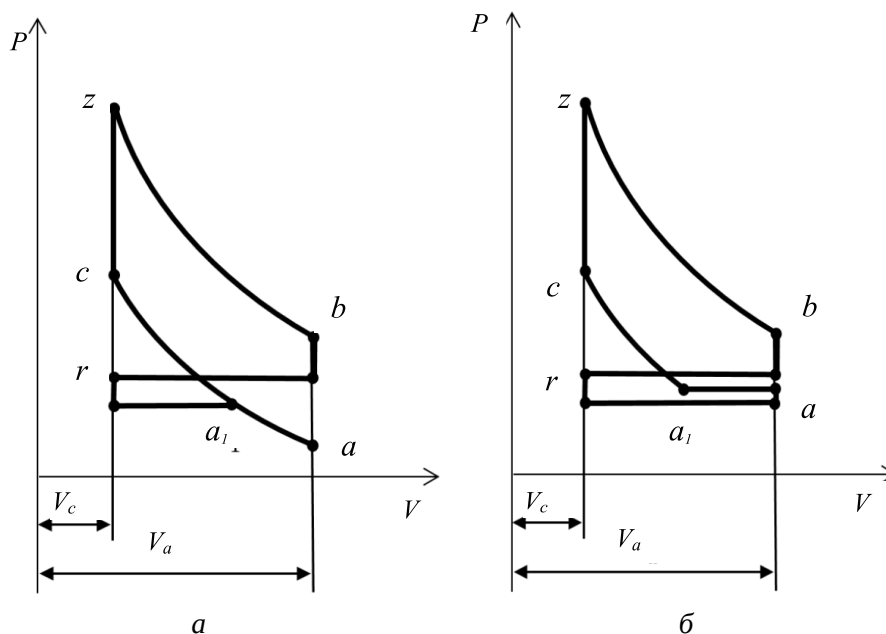


Рис. 1. Идеализированные индикаторные «p-V» диаграммы циклов с подводом теплоты при постоянном объеме:
 а – с укороченным тактом впуска, раннее закрытие впускного клапана;
 б – с укороченным тактом сжатия, позднее закрытие впускного клапана

Figure 1. Idealized indicator «p-V» diagrams of cycles with heat supply at constant volume:
 а – with a short intake stroke, early closing of the intake valve;
 б – with a shorter compression stroke, late closing of the intake valve

дополнительным возможностям регулирования мощности в соответствии с нагрузкой.

Японские гиганты двигателестроения реализовали цикл Миллера на своих гибридных автомобилях. Например, двигатель автомобиля «Toyota Prius» объемом 1,5 л имеет фактическую степень сжатия 9,0 и степень расширения (геометрическую степень сжатия) 13,5. Применяв прямой впрыск в сочетании с рециркуляцией отработавших газов, удалось значительно снизить выбросы NO_x и выбросы сажи, что подтвердили расчетные и экспериментальные исследования [8].

Наряду с укороченным сжатием в двигателестроении в настоящее время находят применение и двигатели, работающие по циклу Миллера с укороченным впуском. Так, в двигателе Audi 2.0 TFSI ultra использован метод раннего закрытия впускного клапана. За счёт оптимального подбора давления наддува продолжительность такта впуска сокращена со $190\text{--}200^\circ$ до 140° , а на высоких нагрузках этот сектор расширяется до 170° . За регулировку отвечает система, меняющая высоту подъема клапанов. Впускной клапан здесь закрывается задолго до нижней мертвой точки, снижая давление на такте сжатия и повышая КПД. В результате степень расширения более чем в 1,4 раза превышает степень сжатия, обеспечивая меньшие насосные потери и значительно более высокий термический КПД по сравнению со стандартным двигателем. При высокой же нагрузке система регулировки подъема клапанов увеличивает продолжительность такта впуска до 170 градусов, приближая цикл Миллера к циклу Отто. Метод раннего закрытия клапана использован также в новом двигателе Фольксвагена EA211 1,5 TSI evo.

Анализ работ по данной теме [9–11] показал, что использование цикла Миллера с укороченным впуском в сочетании с увеличением степени сжатия и давления на впуске за счет использования наддува позволяет достичь высоких технико-экономических показателей.

Учитывая перечисленные преимущества цикла Миллера с укороченным впуском, авторы провели специальное исследование влияния данного цикла на технико-экономические показатели ДВС.

1. Цель исследования

Целью данной научно-исследовательской работы является исследование возможностей повышения

технико-экономических показателей бензинового двигателя за счет использования цикла Миллера с укороченным впуском на основе сравнительного анализа циклов Отто, Аткинсона и Миллера.

2. Расчетные исследования

Объектом исследования являлся двигатель (базовый вариант) со степенью сжатия 10, рабочим объемом цилиндра $611 \times 10^{-6} \text{ м}^3$, диаметром цилиндра 0,092 м, ходом поршня 0,092 м, и $\lambda=R/L=0,312$.

Вначале рассматривались следующие теоретические циклы:

цикл № 1 — цикл Отто (теоретический цикл бензинового двигателя): a-c-z-b-a (рис. 2, а);

цикл № 2 — цикл Аткинсона, который моделируется теоретическим циклом с продолженным расширением и отводом теплоты как при постоянном объеме q_{2v} так и при постоянном давлении q_{2p} : a-c-z-b₂-a₂-a (рис. 2, б);

цикл № 3 — предельный цикл Аткинсона, который моделируется теоретическим циклом с продолженным расширением и отводом теплоты только при постоянном давлении q_2 : a-c-z-b₂-a (рис. 2, в). Данный вариант цикла позволяет получить максимальную работу при расширении газов.

цикл № 4 — цикл Миллера, который моделируется теоретическим циклом в заданном объеме V_a цикла Отто только с продолженным расширением и отводом теплоты как при постоянном объеме q_{2v} , так и при постоянном давлении q_{2p} : a-c-z-b₁-a₁-a (рис. 2, г), пунктиром изображен цикл № 1.

Далее проводился сравнительный анализ КПД циклов. Для анализа используются две формулы определения КПД.

Цикл № 1:

$$\eta_{t_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$.

Цикл № 2 и № 4:

$$\eta_{t_2} = 1 - \frac{\lambda + k_r^k (k-1) - k_r^{k-1} k}{k_r^{k-1} \varepsilon_f^{k-1} (\lambda-1)}. \quad (2)$$

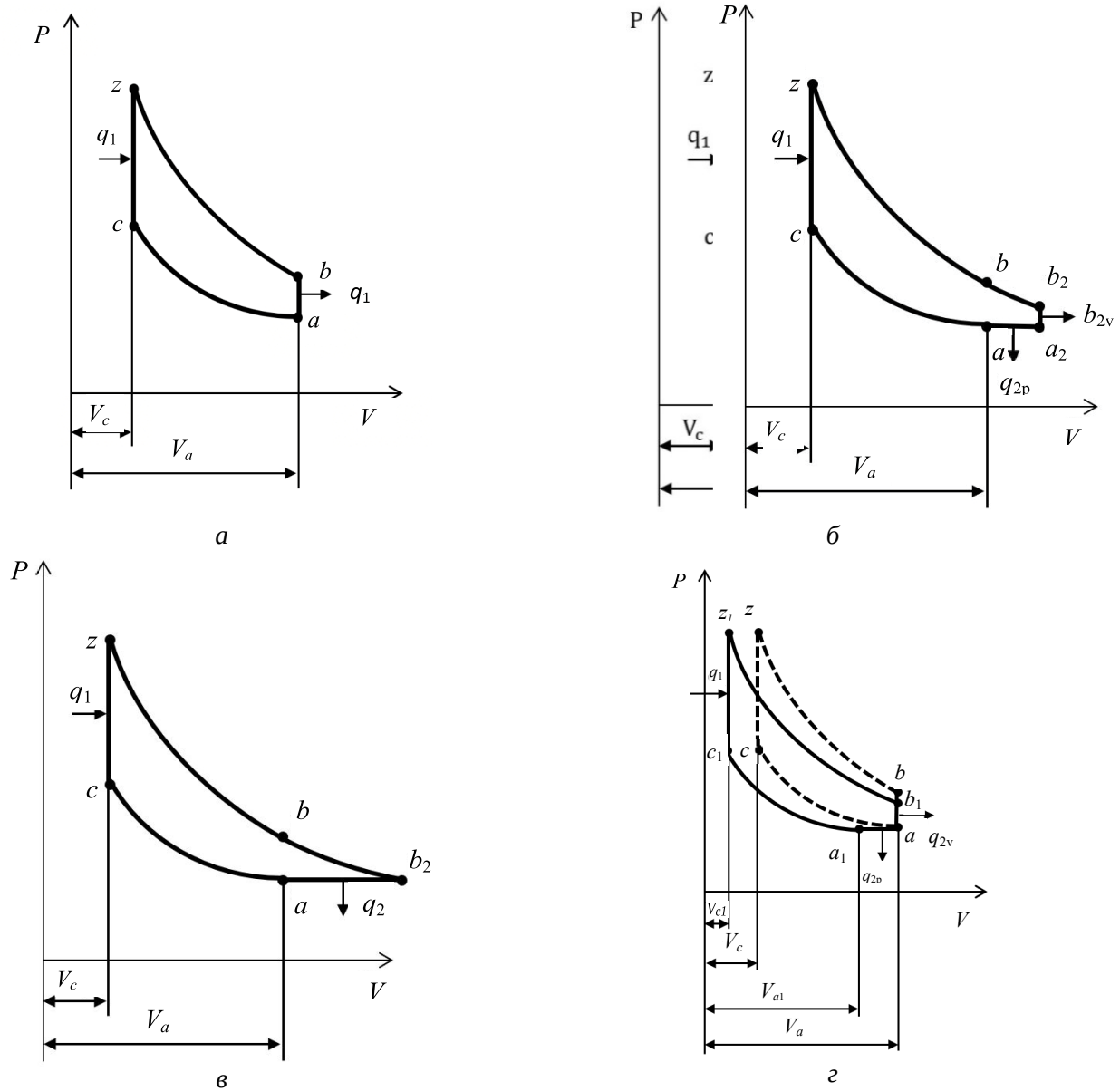


Рис. 2. Диаграммы циклов: а – Цикл Отто; б – Цикл Аткинсона; в – Цикл Аткинсона (предельный вариант); г – Цикл Миллера
 Figure 2. Cycle diagrams: a – Otto's cycle; б – Atkinson cycle; в – Atkinson cycle (limiting variant); г – Miller cycle

Цикл № 3 — предельный вариант цикла № 2, когда расширение рабочего тела продолжается до давления P_a . Степень расширения ε_r в этом варианте:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_f \cdot \lambda^{\frac{1}{k}} \quad (3)$$

или коэффициент расширения: $k_r = \frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_f} = \lambda^{\frac{1}{k}}$

$$\eta_{t3} = 1 - \frac{k \left(\lambda^{\frac{1}{k}-1} \right)}{\varepsilon^{k-1} (\lambda-1)}, \quad (5)$$

где $\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$; $\lambda = \frac{P_z}{P_c}$ — степень повышения давления; V_a — объем цилиндра с газом при начальных пара-

метрах P_a и T_a ; V_c — объем цилиндра после сжатия; P_c , P_z — давление после окончания сжатия, максимальное давление цикла; k — показатель адиабаты.

В цикле Отто фактическая степень сжатия совпадает со степенью расширения ($\varepsilon_f = \varepsilon_r = \varepsilon$), в цикле с продолженным расширением необходимо различать фактическую степень сжатия $\left(\varepsilon_f = \frac{V_a}{V_c}\right)$ и степень расширения $\left(\varepsilon_r = \frac{V_{b2}}{V_c}\right)$.

Степень расширения (ε_r) в цикле № 3 зависит от фактической степени сжатия ε_f и степени повышения давления λ (3).

Из соотношения для определения подведенной теплоты Q_1 :

$$Q_1 = m_o c_v T_a \varepsilon^{k-1} (\lambda - 1) = m_f H_u \quad (6)$$

степень повышения давления λ :

$$\lambda = 1 + \frac{H_u}{c_v T_a \varepsilon^{k-1} (\alpha l_0 + 1)}, \quad (7)$$

где m_o — масса рабочего тела, кг; m_f — масса топлива в рабочем теле, кг; H_u — низшая теплота сгорания, Дж/кг; α — коэффициент избытка воздуха; l_0 — теоретическое количество воздуха, необходимое для сгорания 1 кг топлива.

В нашем исследовании рассматривался теоретический цикл, совершаемый с рабочим телом, представляющим смесь бензина ($H_u = 44$ Дж/кг) и воздуха нормального состава ($\alpha = 1$) теплоемкостью $c_v = 687$ Дж/(кг К); $l_0 = 15$ кг воздуха/кг топлива, показатель адиабаты $k = 1,4$ (в смеси содержится преобладающее количество воздуха, состоящего из двухатомных газов).

Начальные условия: $P_a = 1,0$ Бар; $T_a = 350$ К.

Сравнение циклов № 1 — № 3 проведем при условии постоянства:

- 1) начальных параметров состояния газа (P_a ; T_a);
- 2) состава газа (H_u ; α ; k ; l_0 ; c_v);
- 3) фактической степени сжатия (ε_f);
- 4) массы рабочего тела (m_o).

При перечисленных условиях 1—4 степень повышения давления λ и количество подведенной теплоты (q_1) тоже будут постоянными (формулы 6; 7).

При фактической степени сжатия $\varepsilon_f = \varepsilon = 10$ степень повышения давления по формуле (5) $\lambda = 5,55$. При дан-

ной степени повышения давления и вышеприведенных исходных данных максимальная температура составит 4879 К, а максимальное давление — 139 Бар. Эти значения значительно превышают максимальные индикаторные показатели в реальных циклах, поэтому в теоретических циклах используются пониженные степени повышения давления. Для вышеприведенных исходных данных, фактической степени сжатия $\varepsilon_f = \varepsilon = 10$ и $\lambda = 3,5$ максимальная температура составит 3077 К, а максимальное давление — 88 Бар.

Как известно, КПД цикла Отто не зависит от степени повышения давления, а определяется только степенью сжатия и показателем адиабаты и для приведенных исходных данных составит 0,6. Оценим влияние степени повышения давления на КПД цикла Аткинсона.

На рис. 3 представлено изменение КПД цикла от соотношения степени расширения и фактической степени сжатия (коэффициент k_r) при различных степенях повышения давления λ . При $\lambda = 5,55$ максимальное значение коэффициента $k_r = 3,4$, т.е. максимальная степень расширения $\varepsilon_r = 34$, при $\lambda = 3,5$ соответственно $k_r = 2,44$ и $\varepsilon_r = 24,4$. Максимальное отличие КПД при рассматриваемых λ составляет 2,9 % ($k_r = 2,44$), при $k_r = 1,5$ отличие КПД цикла всего 0,6 %.

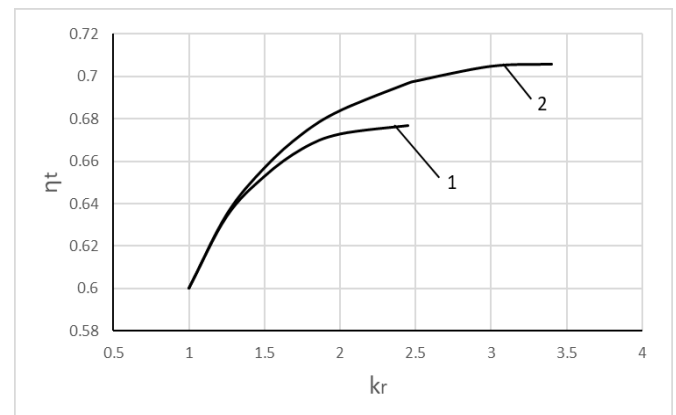


Рис. 3. Изменение КПД цикла от соотношения степени расширения и фактической степени сжатия (коэффициент k_r)
1 — $\lambda = 3,5$; 2 — $\lambda = 5,55$

Figure 3. Change in the efficiency of the cycle from the ratio of the expansion ratio and the actual compression ratio (coefficient k_r)
1 — $\lambda = 3,5$; 2 — $\lambda = 5,55$

Необходимо отметить, что при увеличении степени расширения КПД цикла Аткинсона интенсивнее растет вначале. При максимальной степени

повышения давления ($\lambda = 5,55$) увеличение степени расширения в 1,5 раза приведет к возрастанию КПД цикла на 9,5 %, а при увеличении степени расширения в 3,0 раза от базового варианта (цикла Отто) КПД возрастает на 17,5 %, дальнейшее увеличение степени расширения до предельного — в 3,4 раза приведет к увеличению лишь до 17,67 %. При уменьшении степени повышения давления до увеличения степени расширения в 1,5 раза произойдет возрастание КПД цикла на 8,8 %, а при увеличении степени расширения до максимальной — в 2,45 раза от базового варианта (цикла Отто) — КПД возрастает на 12,8 %.

Принимая во внимание, что обеспечить высокие степени расширения может быть затруднительно в реальной конструкции, имеет смысл ограничиться превышением степени расширения над степенью сжатия в 1,5—2,0 раза при этом КПД цикла Аткинсона составит 0,653—0,673, по сравнению с циклом Отто увеличение на 8,8—12,2 %.

При заданных исходных данных и $\lambda = 3,5$ КПД цикла Аткинсона максимально составит 0,677, по сравнению с циклом Отто — увеличение на 12,8 %.

Перейдем к рассмотрению цикла Миллера. В обзоре подчеркивалось, что в отличие от цикла Аткинсона, в котором увеличение степени расширения обеспечивалось за счет изменения конструкции кривошипно-шатунного механизма, в цикле Миллера превышение степени расширения над фактической степенью сжатия обеспечивается с помощью изменения момента закрытия впускного клапана, т.е. полный объем цилиндра не меняется. Следовательно, чтобы добиться аналогичных результатов, что и в цикле Аткинсона, необходимо по условиям подбора обеспечить следующие соотношения (см. рис 2):

$$\varepsilon_f = \frac{V_{a1}}{V_{c1}} = \frac{V_a}{V_c}; \quad \varepsilon_r = \frac{V_a}{V_{c1}} = \frac{V_{b2}}{V_c}; \quad \lambda = \frac{P_{z1}}{P_{c1}} = \frac{P_z}{P_c}; \quad (8)$$

и условия:

$$P_{a1} = P_a; \quad T_{a1} = T_a. \quad (9)$$

В реальном цикле при раннем закрытии впускного клапана до прихода поршня в НМТ значительно уменьшается P_{a1} , уменьшается и T_{a1} и выполнить условия (9) можно с помощью использования наддува, варьируя

степень наддува и степень охлаждения свежего заряда вне цилиндра.

Как видно из представленных соотношений (8), при переходе на работу по циклу Миллера необходимо уменьшить объем камеры сгорания до V_{c1} и сохранить полный объем V_a . Это можно выполнить только за счет увеличения рабочего объема $V_h = V_a - V_{c1}$ и, соответственно, $V_{h1} = V_a - V_{c1}$.

В реальном двигателе увеличение рабочего объема при уменьшении объема камеры сгорания возможно, за счет увеличения хода поршня и, соответственно, радиуса кривошипа, т.е. изменения размеров коленчатого вала. Это существенное изменение конструкции. Более рациональный вариант — сохранение рабочего объема постоянным, и уменьшение объема камеры сгорания до $V_{c1н}$ и, соответственно, полного объема до $V_{aн}$, таким образом, чтобы выполнялись следующие соотношения:

$$\varepsilon_f = \frac{V_{a1}}{V_{c1н}} = \frac{V_a}{V_c}; \quad \varepsilon_r = \frac{V_{aн}}{V_{c1н}} = \frac{V_{b2}}{V_c}, \quad (10)$$

где $V_{aн} = V_h + V_{c1н}$,

$$V_h = V_a - V_c$$

Уменьшение объема камеры сгорания возможно следующим образом:

1. Уменьшение высоты блока цилиндров за счет фрезеровки поверхности, на которой устанавливается головка блока.
2. Увеличение расстояния от оси поршневого пальца до днища поршня. Это потребует изготовления новых поршней.
3. Изменение длины шатуна. Это предполагает изготовление новых шатунов.

Первое мероприятие наименее затратно.

Уменьшение объема камеры сгорания ограничено особенностями конструкции камеры сгорания и расположением клапанов.

Раннее закрытие впускного клапана приводит к существенному ухудшению наполнения, поэтому при исследованиях реального термодинамического цикла необходимо учитывать эти обстоятельства.

С учетом перечисленных особенностей при использовании цикла Миллера с укороченным впуском степень расширения будет ограничиваться.

Используя известные формулы, описывающие кинематику движения поршня в цилиндре, установлено, что при отношении радиуса кривошипа к длине шатуна, равного 0,3, закрытии впускного клапана за 90 градусов поворота коленчатого вала и обеспечении фактической степени сжатия 10,0 степень расширения составит 16,65.

Полученные результаты исследования теоретических циклов позволят более эффективно провести исследования реальных термодинамических циклов.

Выводы

Проведенный обзор показал преимущества использования цикла Миллера с укороченным впуском. Проведен сравнительный анализ теоретических циклов: Отто, Аткинсона и Миллера. Выполнены расчетные исследования влияния степени расширения и степени повышения давления на КПД цикла Аткинсона. Представлены соотношения, позволяющие при использовании цикла Миллера с укороченным впуском получить такой же теоретический КПД цикла, что и у цикла Аткинсона. При этом реализация цикла Миллера в реальной конструкции двигателя значительно превосходит возможности использования цикла Аткинсона.

По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1) использование цикла Миллера с укороченным впуском должно обязательно проходить в сочетании с увеличением степени сжатия и давления на впуске за счет использования наддува;

2) использование теоретического цикла Миллера может обеспечить существенное, до 12,2 %, повышение КПД цикла по сравнению с циклом Отто при рассмотренных исходных данных;

3) Представлены соотношения, условия и рекомендации, позволяющие эффективно использовать цикл Миллера с укороченным впуском в реальной конструкции двигателя.

Список литературы

1. Зленко М.А., Кутенев В.Ф., Тер-Мкртчян Г.Г. Некоторые вопросы создания бензинового двигателя с регулируемой степенью сжатия // Проблемы конструкции двигателей и экология: сб. науч. тр. НАМИ. 1999. Вып. 224.

2. Кутенев В.Ф., Яманин А.И., Зленко М.А. Аксиально-поршневые двигатели с переменными степенью сжатия и рабочим объемом. М.: Изд-во ГНЦ НАМИ, 2000. С. 302.

3. Марков В.А., Чайнов Н.Д., Гуртовой А.В. Системы регулирования степени сжатия двигателей внутреннего сгорания (часть 1) // Грузовик. 2016. № 7. С. 3–12.

4. Марков В.А., Чайнов Н.Д., Гуртовой А.В. Системы регулирования степени сжатия двигателей внутреннего сгорания (часть 2) // Грузовик. 2016. № 8. С. 3–11.

5. Хрипач Н.А., Лежнев Л.Ю., Папкин Б.А., Шустров Ф.А., Татарников А.П., Тингаев Н.В. Анализ конструкций, обеспечивающих максимальную термодинамическую эффективность поршневых двигателей // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. № 2 (14). Т. 1. С. 360–367.

6. Miller R.H. Supercharging and internally cooling for high output // ASME Transactions. 1947. Vol. 69. No. 4. P. 453–464.

7. Циннер К. Наддув двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение. 1978. С. 184–192.

8. Лукио В.А. Конвертация дизеля в газовый двигатель с регулируемым термодинамическим циклом // Транспорт на альтернативных видах топлива. 2010. № 6 (18). С. 44–50.

9. Мищенко Н.И., Юрченко Ю.В., Колесникова Т.Н., Дятлов В.В. Регулирование нагрузки четырехтактного бензинового двигателя нетрадиционными способами Аткинсона и Миллера // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: сб. трудов конференции. 2019. С. 423–435

10. Zmudka Z., Postrzednik S., Przybyła G. Realization of the Atkinson-Miller cycle in spark-ignition engine by means of the fully variable inlet valve control system // Archives of thermodynamics. 2014. Vol. 35. No. 3. P. 191–205. doi: 10.2478/aoter-2014-0029

11. Zhao J., Xu F. Finite-Time Thermodynamic Modeling and a Comparative Performance Analysis for Irreversible Otto, Miller and Atkinson Cycles // Entropy. 2018. Vol. 20 (1). P. 75. doi: 10.3390/e20010075

References

1. Zlenko MA, Kutenev VF, Ter-Mkrtychyan GG. Some issues of creating a gasoline engine with a variable compression ratio. *Problemy konstrukcii dvigatelej i ekologiya: Sb. nauch. tr. NAMI*. 1999. Vol. 224. (In Russ.)

2. Kutenev VF, Yamanin AI, Zlenko MA. *Aksial'no-porshnevye dvigateli s peremennymi stepen'yu szhatiya i rabochim ob'emom [Axial piston motors with variable compression ratio and displacement]*. Moscow: Publishing house of the State Scientific Center NAMI; 2000. (In Russ.)

3. Markov VA, Chaynov ND, Gurtovoy AV. Compression ratio control systems for internal combustion engines (part 1). *Gruzovik*. 2016;7:3–12. (In Russ.)
4. Markov VA, Chainov ND, Gurtovoy AV Compression ratio control systems for internal combustion engines (part 2). *Gruzovik*. 2016;8:3–11. (In Russ.)
5. Khripach NA, Lezhnev LYu, Papkin BA, Shustrov FA, Tatarnikov AP, Tingaev NV. Analysis of structures that ensure the maximum thermodynamic efficiency of piston engines. *Izvestiya MGTU "MAMI"*. 2012;2(14). Vol.1:360–367. (In Russ.)
6. Miller RH. Superchargind and internally cooling for hing output. *ASME Transactions*. 1947;69:453-464. (In Russ.)
7. Zinner K. Pressurization of internal combustion engines. *Leningrad: Mashinostroenie, Leningradskoe otdelenie*. 1978;3:184-192. (In Russ.)
8. Luksho VA. Conversion of a diesel engine into a gas engine with a controlled thermodynamic cycle. *Transport na alternativnyh vidah topliva*. 2010;6(18):44-50. (In Russ.)
9. Mishchenko NI, Yurchenko YV, Kolesnikova TN, Dyatlov VV. Load regulation of a four-stroke gasoline engine by unconventional methods of Atkenson and Miller. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya «8-e Lukaninskie chteniya»*. (In Russ.)
10. Zmudka Z, Postrzednik S, Przybyła G. Realization of the Atkinson-Miller cycle in spark-ignition engine by means of the fully variable inlet valve control system. *Archives of thermodynamics*. 2014;35(3):191–205. doi: 10.2478/aoter-2014-0029
11. Zhao J, Xu F. Finite-Time Thermodynamic Modeling and a Comparative Performance Analysis for Irreversible Otto, Miller and Atkinson Cycles. *Entropy*. 2018;20(1):75. doi: 10.3390/e20010075

Сведения об авторах

Смирнов Сергей Владимирович, доцент департамента машиностроения и приборостроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, кандидат технических наук; ORCID: 0000-0002-8887-1745, eLIBRARI SPIN-код: 7133-5956; e-mail: smirnov-sv@rudn.ru

Макаров Александр Романович, профессор департамента машиностроения и приборостроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, кандидат технических наук; ORCID: 0000-0001-6895-3076, eLIBRARI SPIN-код: 9195-4544; e-mail: makarov-ar@rudn.ru

Заев Иван Александрович, ведущий научный сотрудник, инженерная академия Российский университет дружбы народов, кандидат физико-математических наук; ORCID: 0000-0002-2498-9197, eLIBRARI AuthorID: 205547; e-mail: i_zaev@mail.ru

Худайбергенова Гульнара Тимуровна, магистрант департамента машиностроения и приборостроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов; e-mail: 1032155550@rudn.ru

About the authors

Sergei V. Smirnov, Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Candidate of Technical Sciences; ORCID: 0000-0002-8887-1745, eLIBRARI SPIN-code: 7133-5956; e-mail: smirnov-sv@rudn.ru

Alexander R. Makarov, Professor at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Candidate of Technical Sciences; ORCID: 0000-0001-6895-3076, eLIBRARI SPIN-code: 9195-4544; e-mail: makarov-ar@rudn.ru

Ivan A. Zaev, Leading Scientist at Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Candidate of Physical and Mathematical Sciences; ORCID: 0000-0002-2498-9197, eLIBRARI AuthorID: 205547; e-mail: i_zaev@mail.ru

Gulnara T. Khudaibergenova, Master's student at the Department of Mechanical Engineering and Instrument Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); e-mail: 1032155550@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-205-216

УДК 624.21.037.001.5:629.73

Research article / Научная статья


Development of the structure, survey and design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle

Anatoli E. Unitsky^{a, b} , Dmitriy I. Bochkaryov^{b, c} , Sergey V. Artyushevsky^{b, c}  

^aAstroengineering Technologies LLC, 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus

^bUnitsky String Technologies, Inc., 33 Zheleznodorozhnaya St, Minsk, 220089, Republic of Belarus

^cBelarusian State University of Transport, 34 Kirov St, Gomel, 246653, Republic of Belarus

 E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

Article history

Received: March 26, 2021

Revised: May 14, 2021

Accepted: May 22, 2021

Keywords: space exploration, General Planetary Vehicle, equatorial overpass, floating tunnel, space industrialization, hypersonic transport

Abstract. The runway for the General Planetary Vehicle is a unique in scale and complexity infrastructural construction — an overpass with a length of 40 000 km, covering the planet along the equator and combined with a string-rail transport of the “second level”. This high-tech structure is a supporting structure for the General Planetary Vehicle and a communication artery that ensures the movement of passengers and goods, as well as the transfer of large amounts of energy and information. The article discusses the location of the overpass in the plan, indicates the most difficult sections and ways to overcome them. The options for the layout of the General Planetary Vehicle overpass are proposed, the main functional areas and structural elements are described. Significant factors affecting the implementation of the project, the problems inevitable in the development of the main elements, as well as solutions to optimize this transport and infrastructure complex have been identified. Solutions were proposed to optimize the overpass routing to overcome mountainous areas of the earth’s surface, considering the required takeoff and landing characteristics of the General Planetary Vehicle.

For citation

Unitsky AE, Bochkaryov DI, Artyushevsky SV. Development of the structure, survey and design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):205–216. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-205-216


© Unitsky A.E., Bochkaryov D.I., Artyushevsky S.V., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Разработка конструкции, изыскания и проектирование экваториальной эстакады общепланетарного транспортного средства

А.Э. Юницкий^{a, b} , Д.И. Бочкарев^{b, c} , С.В. Артюшевский^{b, c}  

^aОбщество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии»,
Республика Беларусь, 220089, Минск, ул. Железнодорожная, д. 33

^bЗакрытое акционерное общество «Струнные технологии», Республика Беларусь, 220089, Минск, ул. Железнодорожная, д. 33

^cБелорусский государственный университет транспорта, Республика Беларусь, 246653, г. Гомель, ул. Кирова, д. 34

✉ E-mail: s.artushevskiy@unitsky.com

История статьи

Поступила в редакцию: 26 марта 2021 г.

Доработана: 14 мая 2021 г.

Принята к публикации: 22 мая 2021 г.

Аннотация. Взлетно-посадочной полосой для общепланетарного транспортного средства служит уникальное по масштабам и сложности инфраструктурное сооружение – эстакада протяженностью 40 тыс. км, охватывающая планету по экватору и совмещенная с рельсопутьным транспортом «второго уровня». Данное сооружение является опорной конструкцией для общепланетарного транспортного средства и коммуникационной артерией, обеспечивающей перемещение пассажиров и грузов, а также передачу больших объемов энергии и информации. Для обеспечения равномерного старта общепланетарного транспортного средства необходимо минимизировать возмущения, вызванные вертикальными и горизонтальными кривыми эстакады. При этом проектирование данного сооружения должно быть выполнено с учетом географических и природно-климатических особенностей тропиков как на сухопутных, так и морских участках. В статье рассмотрено расположение эстакады общепланетарного транспортного средства в плане, обозначены наиболее сложные участки и способы их преодоления. Предложены варианты компоновки эстакады общепланетарного транспортного средства, описаны основные функциональные зоны и конструктивные элементы. Определены факторы, влияющие на реализацию проекта, проблемы, неизбежные при разработке основных элементов, а также решения по оптимизации транспортно-инфраструктурного комплекса. Кроме того, предложены решения по оптимизации трассировки эстакады для преодоления горных участков земной поверхности с учетом требуемых взлетно-посадочных характеристик общепланетарного транспортного средства. Также проведена оценка влияния подвижного состава рельсопутьного транспорта «второго уровня» на волновые колебания погруженного в воду транспортного тоннеля-поплавка, с целью обеспечения стабильной ровности пути для перемещения гиперскоростного транспорта и ленточных маховиков общепланетарного транспортного средства, имеющих космические скорости движения.

Ключевые слова: освоение космоса, общепланетарное транспортное средство, экваториальная эстакада, плавающий тоннель, индустриализация космоса, гиперскоростной транспорт

Для цитирования

Unitsky A.E., Bochkaryov D.I., Artyushevsky S.V. Development of the structure, survey and design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 205–216. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-205-216

Introduction

One of the fundamental trends in modern world development is the globalization of economic, political, and social processes, affecting almost all spheres of public life. In these conditions, the economy of any country is closely connected with the world economy; therefore, economic development within the national framework and foreign economic relations become links in one chain.

Further stable economic development of the world's countries is characterized by an increase in its

dependence on sources of energy and raw materials due to their limitedness and strong influence on world price dynamics. Based on the main trends in effective development, transport and infrastructure complexes can be considered one of the most important factors of the world economy, as well as the foundation of the economic and industrial prosperity of the regions. Currently, a unified transport system is being intensively formed, based on the geographical location and resource potential of countries with the unification of networks of transport

flows connecting different continents to ensure trade and international transit. Based on the foregoing, we can conclude that transport systems at the same level as financial, political, and social issues are becoming one of the most important bases that guarantee and ensure sustainable development of the world community.

At the same time, despite the fact that the history of transport development clearly demonstrates its key role in the development of society and formation of our technogenic civilization [1], according to the authors, the moment has come when it is necessary to give the word “transport” a new meaning — the savior of the Earth’s biosphere. This is possible if it becomes geocosmic and separates the technosphere and the biosphere in space, moving dangerous and harmful industries into near space. The solution to how to do this was developed by the inventor and engineer A. Unitsky [2], who proposed to create the General Planetary Vehicle (GPV), the first publications about which appeared back in 1982 in the all-Union popular science magazines *Inventor and Rationalizer* No. 4 and *Technics for Youth* No. 6. The carrying capacity of such a system (10 million tons), encircling the planet along the equator, makes it possible to raise entire factories in one start, in contrast to modern rocket technology, the low carrying capacity of which, along with the extremely high cost of geospace transportation, are the main constraining factors for the industrialization of space.

An overpass structure located along the equator line acts as a launching pad for the GPV. It combines various functions, the main of which are passenger and cargo distribution, the creation of a take-off and landing site, arrival/departure stations, as well as transport and logistics hubs. In a global sense, the equatorial overpass is a world road communication and infrastructure complex that unites states, continents and islands located in the equator zone.

Roads at all times have been connecting arteries between cities, along which new settlements were formed. When they were erected, at the dawn of time, humans adjusted to the existing relief, and later learned to change it. Such works have been carried out for many thousands of years. The equatorial overpass is no exception. The equator crosses plains, mountains and oceans. The complexity and uniqueness of this object lies in its extremely large length (40 075 km) and the alternation along the length of

the solutions of land overpasses and oceanic sections of floating tunnels. The main obstacles on land are mountains: The East African Highlands (Kilimanjaro) in Africa and the Andes (Chimborazo) in South America. In water areas, it is possible to conventionally accept a constant surface level and a horizon line, but many kilometers of the depth of the bottom act as an encumbrance.

Since the placement of such a structure on the surface of the earth and water will divide the planet by an obstacle into two hemispheres, almost completely cutting off all existing communications (except air), a requirement arises to place a structure on supports above ground level on land and deepen below water level in the oceans.

The ideal trajectory of the overpass is a regular circle centered at the center of mass of Earth. Unfortunately, this is impossible to implement. But, due to the correct selection of the geometric parameters of the supporting elements, it is possible to get as close as possible to such an arrangement. The characteristics of the trajectory of the passage of mountainous sections affect the height of the supports and the depth of the overpass foundations, and the shape affects the operating conditions of the linear rotors inside the hull. Any deviation of the longitudinal axis of the GPV from the ideal circle leads to a complication of the design of this grandiose in size self-supporting aircraft and requires additional measures to stabilize it after takeoff. Vertical and horizontal curves create an additional load from centrifugal forces when the belt flywheels move at speeds of up to 12 km/s, upsetting the balance and exceeding the nominal forces per each running meter of the system in dynamic equilibrium.

1. Overpass Location Trajectory

Initial data for choosing the trajectory of the overpass

The following are taken as geometric boundary conditions:

- the minimum vertical radius of the route is 100 km;
- the optimal vertical radius of the route is 6371 km (the radius of the Earth);
- the optimum height of the overpass is 20—25 m (provides a minimum impact on the growth of forests and the migration of animals);
- the optimal depth for floating tunnels is 40—50 m.

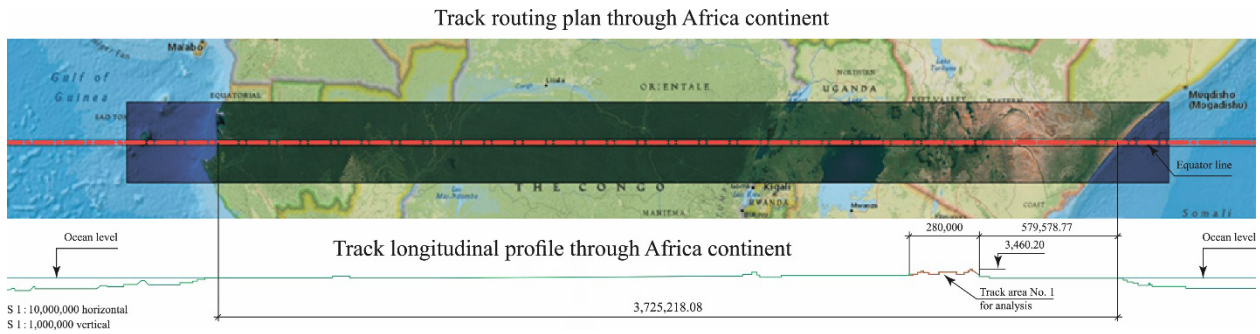


Figure 1. Scheme of the passage of the GPV overpass across the continent of Africa

Location of the overpass in the plan

The longitudinal profile is built according to the heights of the relief along the equator line¹. The reference point is taken from the Greenwich meridian. Typical sections of the route in the profile across Africa are mountains up to 3.5 km in height, in front of and behind Lake Victoria (Figure 1).

At about 43° east longitude, the track runs through the Indian Ocean. The maximum ocean depth is 5.5 km, a decrease in depth to 50 m is observed in the Maldives (73° east longitude), off the coast and east of Sumatra, about 420 km long, where the depths are 9–50 m. Further, 109° east longitude, the western coast of Kalimantan Island, then the Makassar Strait 180 km wide, having an average depth of 2.2 km with 60 km of continental shallows (12 m depth) east of Kalimantan Island. Further, the route crosses the island of Sulawesi (120° east longitude), Tomini Bay, the Moluccan Sea, Halmahera Island and goes to the Pacific Ocean. The maximum ocean depth along the route is about 6 km (147° east longitude). There are 3 outlets of the continental bottom:

- the Gilbert Islands, 173° east longitude;

- Line Islands, 160° west longitude;
 - the island of the Galapagos, 92° west longitude.
- Mainland South America begins at 80° west longitude (Figure 2).

The highest point of the mainland profile, the Cordillera Mountains, 5 km high, rises at about 77° west longitude. Further along the mainland, the profile is calm up to the Atlantic Ocean — 47° west longitude. The maximum ocean depth is 7.6 km — 17° west longitude.

- The total length of the route is 40,075 km, including:
- by water (oceans, seas, bays, lakes, rivers) — 31,170 km;
 - by land (continents, islands) — 8,905 km.

2. Specifics of Passage of the Equatorial Overpass Overland

The most difficult sections of the route in the profile of Africa are mountains east of Lake Victoria within 36–38° east longitude. In South America, the most difficult area is the Cordillera Mountains — 77–78° west longitude.

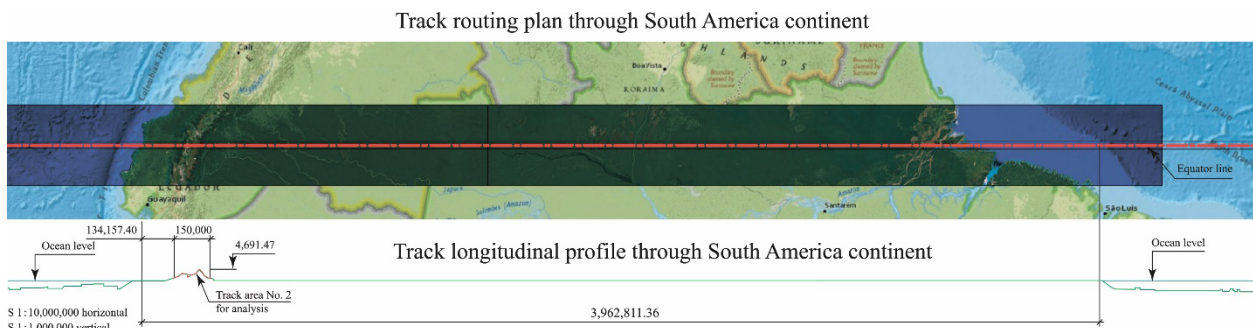


Figure 2. Scheme of the passage of the GPV overpass across the continent of South America

¹ Google Earth [Electronic resource]. Mode of access: <https://earth.google.com> (accessed: 06.04.2021).

When designing the trajectory of the overpass location through these sections, it is required to determine the parameters for constructing the radius and transition curves, based on the limitation of the magnitude of centrifugal forces with the following characteristics of the GPV:

- the linear speed of the rotor along the vacuum channel is up to 12 km/s with a dead weight of up to 450 kg/lin m;
- the mass of a running meter of the GPV together with the load is up to 1,150 kg/lin m.

The smaller the permissible radius of curvature of the overpass, the better it repeats the ground relief and the lower the maximum height of the supports will be. At the same time, the passage of Kilimanjaro with large radii (1,000 km and more) will require more work than when laying through the Andes, which are much higher than the African mountains, but have a more gentle relief.

The overpass supports are proposed to be made of reinforced concrete, with a height of up to 300 m (an indicator of the highest supports of modern bridges). If it is necessary to use a greater height, the required size can be compensated by using local embankments from the rock extracted during the excavation (Figure 3).

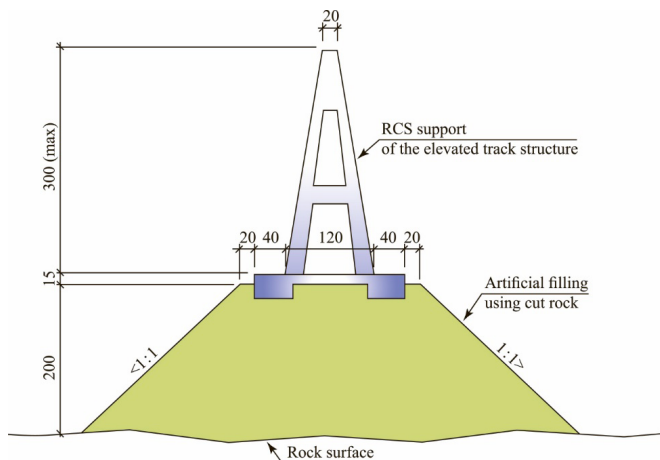


Figure 3. An example of a reinforced concrete support (option)

With an average pitch of 100 m supports, their number will be:

$$N = 8905000/100 = 89,050 \text{ pcs.}$$

In this case, we obtain the percentage distribution of the categories of supports by height as follows:

up to 15 m — 50 % — 44,525 pcs.;

15 to 30 m — 25 % — 22,262 pcs.;

30 to 50 m — 15 % — 13 358 pcs.;

50 to 100 m — 10 % — 8,905 pcs.

The highest peaks, characterized by sharp changes in heights, are more profitable to go through. At the same time, a feature of the construction of the equatorial launch platform is the need for an open space above the structure for lifting the GPV, which excludes the passage of mountain ranges through tunnels. This leads to the use of recesses, an example of such a design is shown in Figure 4.

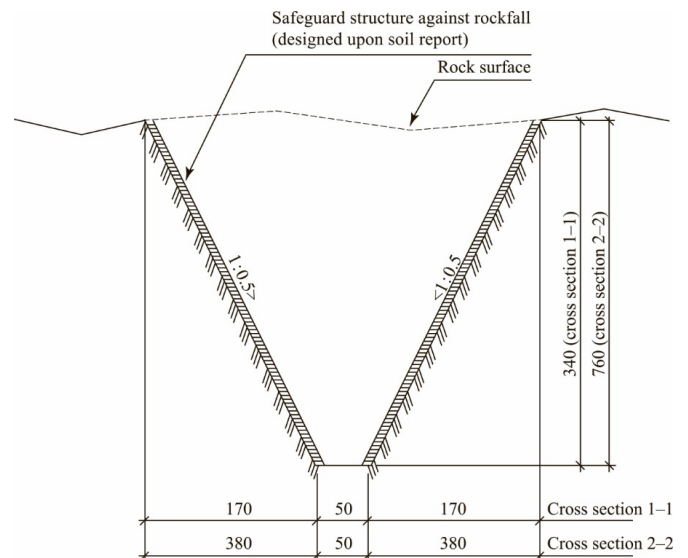


Figure 4. Cutting scheme (option) (all dimensions are given in meters)

Such characteristics of excavations, such as depth, minimum slope, protective and safety elements, are calculated individually for each mountain area, depending on the composition and strength of the rock, seismic activity, amount of precipitation, etc.

3. Specifics of Passage of the Equatorial Overpass Through Water Areas

As shown by previous studies, it can be concluded that the underwater location of the oceanic sections of the GPV take-off and landing structure is less material-intensive, more technologically advanced and, as a result, more economically profitable. Consequently, a floating overpass is the best option for the design of spans when passing deep-water sections. It is a tunnel submerged to a depth of 50 m. This concept, proposed by the author of the GPV

more than 40 years ago [3], is currently being developed by scientists from Norway, Italy, and China [4]. A floating overpass must be designed to withstand external influences, operational and accidental loads, with sufficient strength and longitudinal bending stiffness. Given the length of the structure, a versatile and economical design is required.

The main components of the floating overpass are:

- anchoring elements — anchors, pontoons, supports;
- fastening and tensioning elements;
- vacuum cargo-passenger transport tunnels;
- pick-up/drop-off zones for passengers and service personnel;
- industrial and utility tunnels;
- freight transport tunnels to ensure cargo distribution;
- passenger and freight vehicles;
- supporting elements of the General Planetary Vehicle.

Due to the longitudinal direction of currents at the equator and the provision of zero buoyancy of the tunnel, the structure of the overpass ensures the maximum span length — the inter-support distances reach 500—800 m. These gaps will provide the required rigidity and strength of the load-bearing part of the structure.

Since the tunnel is located at a depth of about 50 m, it is important that it is absolutely waterproof and resistant to the effects of salt sea water. In addition, the tunnel must be reliably protected from hydrostatic and hydrodynamic forces directed at it.

Layout solutions for the floating tunnel

For maximum unification, the profile of the overpass itself, passing on land, corresponds to the profile of the oceanic sections with lower requirements for tightness and taking into account thermal deformation from temperature

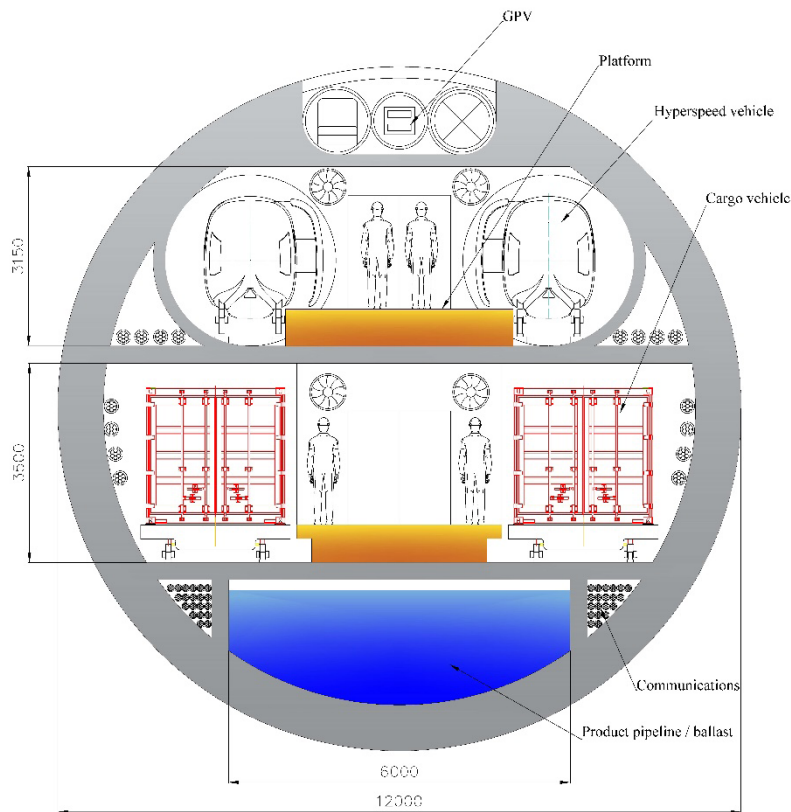


Figure 5. Option of the layout solution for the oceanic section of the floating overpass in the area of the landing station

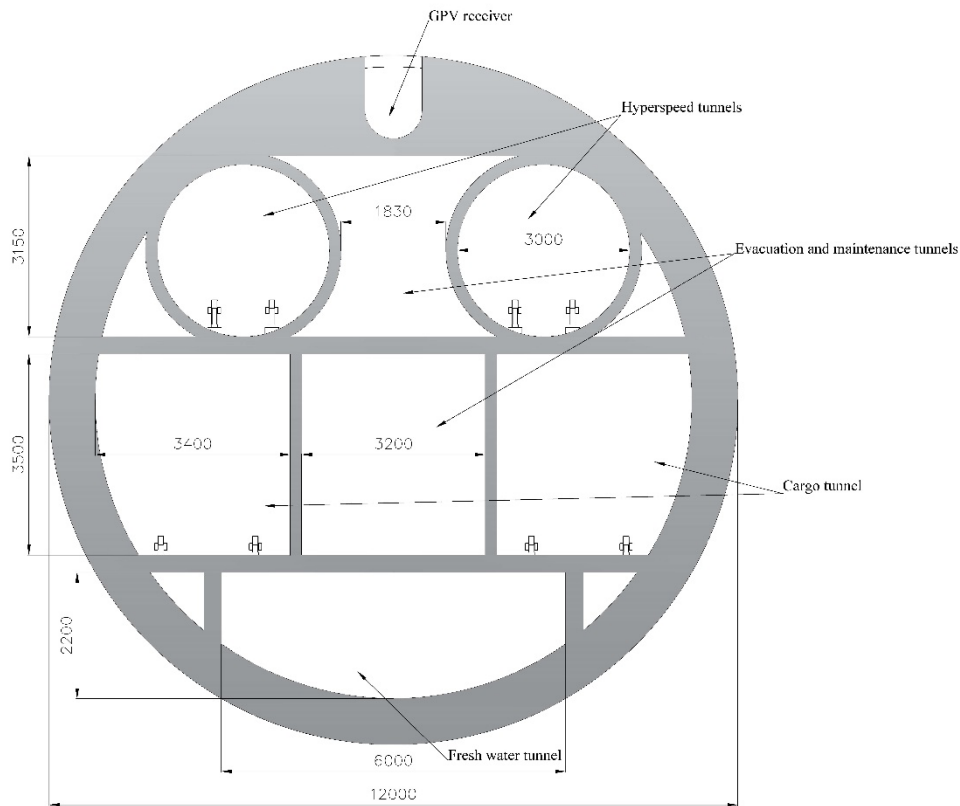


Figure 6. Option of the layout solution for the oceanic section of the floating overpass in the inter-span section

fluctuations. Figure 5 shows the recommended layout in the area of the landing station.

Geometrically, it is divided into four functional zones — in the central lower zone there is a product pipeline-ballast to regulate the buoyancy of the structure and deliver fresh water from the mouth of the river Amazon along the equator (including Africa and the Malay Archipelago), the cross-section has an area of 11 m² across. There are communication compartments along the edges of the ballast compartment. Above is the area of cargo vehicles with loading/unloading terminals. Above the cargo compartments, tunnels are based for the movement of vacuum hyperspeed vehicles in different directions, and underwater stations for the embarkation/disembarkation of passengers. In the upper part there is a cradle for receiving and launching the GPV with a landing and loading area for transport compartments.

The outer concrete pipe has an outer diameter of 12 m and a total wall thickness of 0,6 m (Figure 6). Inside, the pipe is divided by concrete partitions. The space behind the aprons and boarding areas, in the longitudinal direction, is used as a corridor for evacuation and maintenance of the structure. Free spaces at the edges of hyperspeed tunnels can be used for ventilation ducts and power supply.

The depicted option, with an average density of seawater in the equatorial zone (1,020 kg/m³), has a mass of 1 lin m of the structure of 115,3 tons. When used as the main structural material of concrete, with a density of 2,500 kg/m³, its reduced area, to ensure zero buoyancy, will be 46 m² (excluding compensation by liquid ballast).

Reinforced concrete is the main structural element of the internal components, which gives the required strength and weight to the tunnel. A diagram of the tunnel body is shown in Figure 7. To protect the concrete from external influences, the shell is supplemented with three layers.

The outer layer is made of corrosion-resistant copper alloys [5] to resist salt water and shellfish fouling. The second and third layers are made of foam materials that provide an elastic deformation zone of the tunnel from external shock loads.

For pipes, it is proposed to use a special high-strength concrete with a fibrous filler, having a Young’s modulus of 30 GPa. The shell should be crimped with longitudinal reinforcement to prevent cracking, while the structure as a whole should be stretched to ensure stability and resistance to transverse loads and bending moments. This is achieved by segmenting the pipe and using string elements of different functionality in the structure.

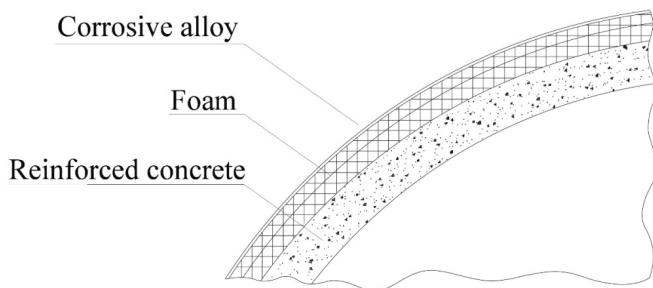


Figure 7. Tunnel body diagram

Excess buoyancy must be ensured at the points of attachment of the fixation (anchoring) systems of the

floating overpass to the seabed. The design is based on the principle of an inverted pendulum — the pipe in such places has a special float that tends to float, but is held in place by rods; with such anchoring, the weakening of these rods is not allowed (Figure 8). Bindings can be placed vertically or combined vertically and/or obliquely.

Periodically, in order to provide the tunnels with fresh air and the possibility of evacuation, it is necessary to include vertical shafts, exits to the ocean surface, in the design (Figure 9) [7].

Pontoons are proposed as floating elements. They are susceptible to collisions with floating objects and vessels, therefore, to prevent the transfer of shock loads from the pontoon to the tunnel in the event of an accidental collision of the vessel, the following preventive measures are taken:

- the floating overpass is structurally independent, has a separate anchoring, the loss of the pontoon does not affect its geometry and structural integrity;
- the air chambers of the pontoons have a cellular structure — even if the tightness of half of the chambers is damaged, it will stay afloat;
- the use of multilayer sandwich structures — if the outer layers are damaged, the overall tightness will not be broken;
- dividing the pontoon into two elements to ensure the takeoff/landing of the GPV in the center of the pipe —

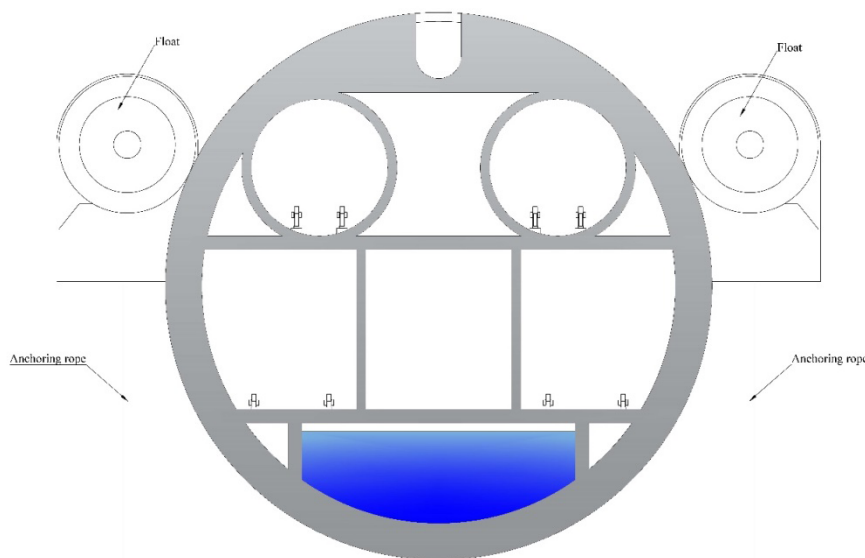


Figure 8. Option of the layout solution for the oceanic section of the floating overpass, section at the point of anchoring systems fastening

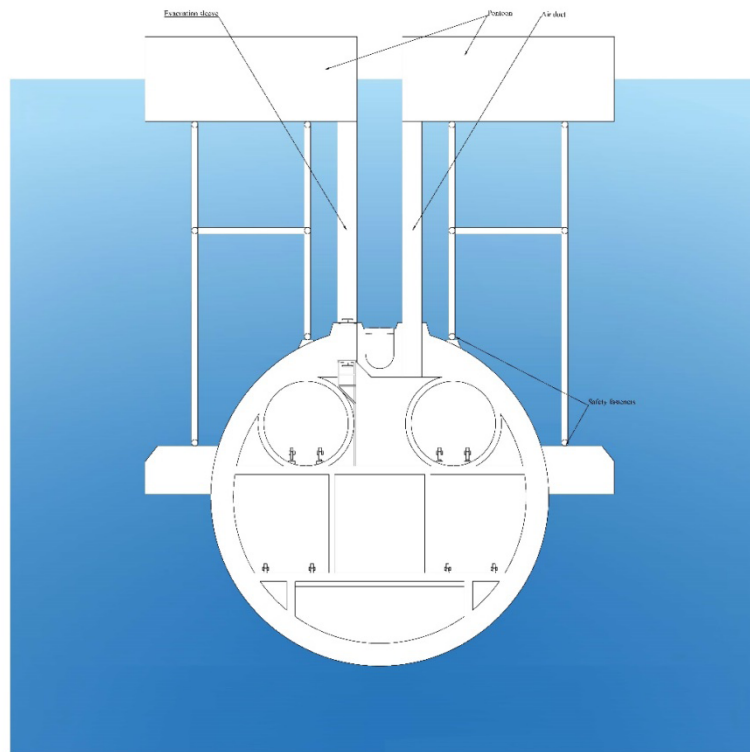


Figure 9. Option of the layout solution for the oceanic section of the floating overpass, section at the pontoon fastening point

acts as a duplication of the evacuation and air intake system, reducing the risk of losses;

- introduction of fuses into the structure of fastening the pontoon to the overpass, which are destroyed in case of exceeding the shock or wave load;

- the use of streamlined pontoons, which reduce the hydro- and aerodynamic drag coefficient and deflect the ship's hull as a result of tangential sliding impacts.

As preventive measures in order to prevent collisions, signal sound and light beacons are installed on the pontoons.

4. Analysis of the Impact of a Moving Vehicle on the Tunnel

To ensure comfortable conditions for the movement of hypersonic vehicles, it is necessary to guarantee high evenness and stability of the track in the tunnel, and given the presence of external and internal disturbing factors in the form of currents, waves, passing ships and moving inside cargo vehicles, this becomes a difficult task. Each of the listed disturbances requires deep analysis, both

separately and together to take into account synergy. In this article, the authors propose to briefly consider a predictable and controllable factor — the influence of a passing vehicle on a floating tunnel.

Initial data:

- the concrete used has a Young's modulus of 30 GPa;
- tunnel with a diameter of 12 m;
- wall thickness is 0.6 m;
- fixed section length is 800 m;
- estimated weight is 115,300 kg/lin m;
- density of the aquatic environment is 1.020 kg/m³;
- design bending stiffness is 1.50×10^{10} kN×m;
- submersion depth of the tunnel is 50 m;
- form resistance coefficient is 0.55 (long cylinder);
- weight of a single loaded cargo vehicle is 25,000 kg;
- length of a single cargo vehicle is 22 m;
- frequency of traffic is 90 s;
- design speeds is 10 m/s, 30 m/s, 50 m/s.

Assumptions:

- the bending properties of the tunnel are the same in all directions;

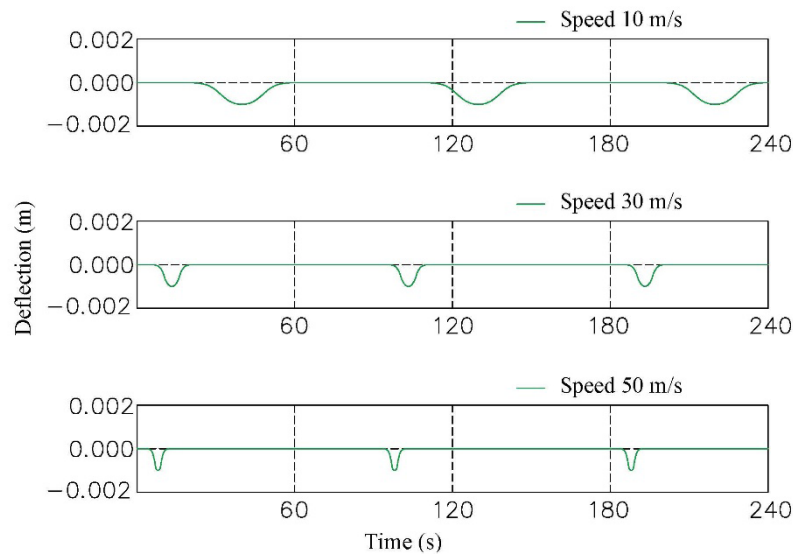


Figure 11. Graphs of the dependence of the vertical displacement of the tunnel on the speed in case of cargo transport passage

the same regardless of the speed of movement (within 3 % of the error).

Conclusions

The main technical solutions given in the article, taken in the design of the equatorial overpass of the General Planetary Vehicle, can be implemented at the modern technological level of transport construction. This indicates the technical feasibility of this project. At the same time, full consideration of all factors that affect the equatorial overpass throughout its life cycle is possible using mathematical modeling at the stages of construction, operation, modernization, and disposal. This model will allow for a more detailed study of both individual elements and the entire overpass in interaction with transport, natural and man-made loads, which will make it possible to develop the most optimal technical and technological solutions for its creation.

An option of the layout of the GPV overpass with a description of the functionality of individual zones and structural elements has been put forward. All solutions require continued technical and economic analysis.

The influence of a passing cargo vehicle on wave oscillations of a tunnel immersed in water was also calculated to ensure a smooth and comfortable movement of hypersonic vehicles. This study requires a deeper

research, taking into account all external and internal disturbing factors and mutual synergy.

References

1. Malykh GI. Brief History of the Development of Transport Technology. *Modern Technologies. System Analysis. Simulation*. 2009;(21):169—172. (In Russ.)
Малых Г.И. Краткая история развития транспортной техники // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2009. № 1 (21). С. 169—172.
2. Unitsky A. *String Transport Systems: On Earth and in Space*. Minsk, Belarus. SkyWay Technologies Publ.; 2019.
3. Unitsky AE. *Engineer*. Moscow: Eksmo Publishing House, LLC; 2020. (In Russ.)
Юницкий А.Э. Инженер. М.: Изд-во Эксмо, 2020. 404 с.
4. Simovic M, Krasic S, Nikolic M. Floating Solutions: The New Meaning of Mobility. In: Wang C., Lim S., Tay Z. (eds.). *WCFS2019. Lecture Notes in Civil Engineering* (vol. 41). Springer, Singapore. doi: 10.1007/978-981-13-8743-2_23
5. Palraj S, Venkatachari G, Subramanian G. Bio-fouling and Corrosion Characteristics of 60/40 brass in Mandapam Waters. *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 2002;43(9):194—198. doi: 10.1108/00035590210426445.
6. Jin C, Kim M. Dynamic Responses of a Moored Submerged Floating Tunnel under Moving Loads and Wave Excitations. *The 28th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers*. 2018.

7. Yuan Z. et al. Displacement Response of Submerged Floating Tunnel Tube Due to Single Moving Load. *Procedia engineering*. 2016;166:143—151. doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.577.

About the authors

Anatoli E. Unitsky, General Design Engineer, Astroengineering Technologies LLC; General Design Engineer, Unitsky String Technologies, Inc., Ph.D.; ORCID: 0000-0003-1574-3539; e-mail: a@unitsky.com

Dmitriy I. Bochkaryov, Dean of the Faculty of Construction, Belarusian State University of Transport; Lead Engineer, Unitsky String Technologies, Inc., Associate Professor, Ph.D.; ORCID: 0000-0002-9165-3634, eLIBRARI SPIN-code: 4100-5709; e-mail: bochk_dmitr@mail.ru

Sergey V. Artyushevsky, Deputy General Designer for Science, Unitsky String Technologies, Inc; Master's student, Belarusian State University of Transport; ORCID: 0000-0003-0838-9228, eLIBRARI SPIN-code: 4458-0179; e-mail: s.artyushevskiy@unitsky.com

Сведения об авторах

Юницкий Анатолий Эдуардович, генеральный конструктор, Общество с ограниченной ответственностью «Астроинженерные технологии»; генеральный конструктор, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», кандидат философских наук; ORCID: 0000-0003-1574-3539; e-mail: a@unitsky.com

Бочкарев Дмитрий Игоревич, декан строительного факультета, Белорусский государственный университет транспорта; ведущий инженер, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии», кандидат технических наук; ORCID: 0000-0002-9165-3634, eLIBRARI SPIN-код: 4100-5709; e-mail: bochk_dmitr@mail.ru

Артюшевский Сергей Владимирович, заместитель генерального конструктора по науке, Закрытое акционерное общество «Струнные технологии»; магистрант, Белорусский государственный университет транспорта; ORCID: 0000-0003-0838-9228, eLIBRARI SPIN-код: 4458-0179; e-mail: s.artyushevskiy@unitsky.com




DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-217-224

УДК 656.072.52

Научная статья / Research article

Метод биоконтроля усталости водителя транспортного средства

К.А. Иванов, Н.В. Камардина, И.К. Данилов , В.Н. Коноплев  

Российский университет дружбы народов,
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6
 E-mail: konoplev-vn@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 15 января 2021 г.

Доработана: 12 апреля 2021 г.

Принята к публикации: 22 мая 2021 г.

Аннотация. В статье описывается пример халатности водителей, перевозящих пассажиров, и методы его решения с помощью современных изобретений. Одной из таких бед является управление автомобилем и перемещение в нем пассажиров таксистом в усталом состоянии. Так как не каждый водитель может грамотно оценить свое психофизическое состояние, ученые и стали создавать устройства для отслеживания поведения человека при управлении транспортным средством. Целями внедрения систем контроля за усталостью водителя являются обеспечение безопасности на дорогах, сохранение жизней и имущества граждан. Применение данных систем облегчит работу экстренным службам, владельцам таксопарков, самим таксистам и их пассажирам. В статье внимание уделено проблеме переутомления конкретно водителей такси потому, что их трудовая деятельность является общественно значимой и несоблюдение норм продолжительности труда и отдыха может привести к трагическим последствиям. Современные водители такси стали чаще надеяться на крепкий кузов и электронные гаджеты при возникновении внезапной ситуации на дороге. Поэтому за рулем автомобиля, несмотря на переутомление, они позволяют себе продолжать движение и могут вовремя не среагировать на аварийную ситуацию. Нами изучены варианты внедрения систем контроля за усталостью водителя и предложена их установка на автомобили такси.

Ключевые слова: пассажирские перевозки, безопасность, автомобильное оборудование

Для цитирования

Иванов К.А., Камардина Н.В., Данилов И.К., Коноплев В.Н. Метод биоконтроля усталости водителя транспортного средства // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 217–224. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-217-224


© Иванов К.А., Камардина Н.В., Данилов И.К., Коноплев В.Н., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Method of biocontrol of vehicle driver fatigue

Kirill A. Ivanov, Natalia V. Kamardina, Igor K. Danilov , Vladimir N. Konoplev  

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University),
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation
 E-mail: konoplev-vn@rudn.ru

Article history

Received: January 15, 2021

Revised: April 12, 2021

Accepted: May 22, 2021

Keywords: passenger transportation, security, automotive equipment

Abstract. This article describes an example of negligence of drivers transporting passengers and methods of solving it using modern inventions. One of these troubles is driving a car and moving passengers by taxi driver in a tired state. Since not every driver can correctly assess their psycho-physical condition, so to do this, scientists began to create devices for tracking human behavior when he drives vehicle. The purpose of implementing driver fatigue monitoring systems is to ensure road safety and preserve lives and property of citizens. The use of these systems is to facilitate the work of emergency services and taxi company owners, taxi drivers and their passengers. In our article we want to touch on the problem of overwork, specifically taxi drivers, since their work activity is socially significant and non-compliance with the norms of work and rest periods can lead to tragic consequences. Modern taxi drivers often rely on a strong body of car and electronic gadgets in an unexpected situation on the road. Therefore, when driving a car, despite being overworked, they allow themselves to relax beyond the limit and don't react in time if an emergency occurs. We have studied options for implementing driver fatigue monitoring systems and offer to install them on a taxi car.

For citation

Ivanov KA, Kamardina NV, Danilov IK, Konoplev VN. Method of biocontrol of vehicle driver fatigue. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):217–224. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-217-224

Введение

В настоящее время люди стали чаще задумываться над безопасностью передвижения в таком общественном транспорте, как такси. У всех горожан нашей страны на слуху такие вопиющие истории, как ситуации с уставшим водителем, который провел за рулем 14—16 часов, были случаи летальных исходов в дорожно-транспортных происшествиях с заснувшим водителем такси за рулем. В настоящее время в сфере пассажироперевозок есть варианты почасовой оплаты труда, как у водителей автобусов, водителей скорой помощи и т.д., а также сдельной, как у водителей такси. Следовательно, они и «гонятся» за большим количеством заказов. Стоимость заказа для клиента определена заранее и не зависит от скорости прибытия на место [1]. Это значит, что чем быстрее водитель

завершит один заказ, тем быстрее есть шанс получить следующий и больше заработать. Тем более время нахождения водителя на линии сложно контролировать. Если это делать в одном конкретном приложении, то таксист будет брать заказы в другом приложении или «от руки». Соответственно, появилась необходимость осуществления контроля за этой сферой услуг, потому что фраза «Не нравится или боишься — не пользуйся», здесь не подходит [2]. Это создает прямую угрозу жизни других участников дорожного движения, пассажиров и самого водителя такси.

Различают следующие виды утомления:

- естественное, когда благодаря отдыху работоспособность восстанавливается на следующий день;
- длительное, когда восстановление работоспособности требует более продолжительного отдыха.

— переутомление, когда интенсивность труда и нагрузки не компенсируется отдыхом, а последствия накапливаются, вызывая физиологические и психоэмоциональные нарушения.

1. Постановка задачи

Переутомление является одной из частых причин дорожно-транспортных происшествий, в таком случае нарушение ПДД не становится следствием небрежности или недисциплинированности водителя.

В результате переутомления истощается нервная система, что приводит к нарушению сложных психических процессов, то есть ухудшается скорость проведения нервных импульсов, что приводит к снижению внимания и восприятия, а также реакции организма в целом. Мыслительный процесс водителя при этом ограничивается простыми решениями вместо полного анализа вероятностной модели дорожной ситуации, человек реагирует ограниченным числом возможных разрешений ожидаемых событий [3—4]. То есть, когда на дороге сложится непредвиденная ситуация, отличная от упрощенной, которую предполагает водитель, вероятность дорожно-транспортного происшествия значительно возрастает.

На начальной стадии утомления водитель еще волевым образом, сосредоточившись, способен поддерживать работоспособность и уберечься от неверных шагов. В случае нарушения режима труда и отдыха, когда даже после ночного сна чувство усталости не исчезает, мы можем наблюдать признаки хронического утомления, то есть переутомления.

Основными причинами переутомления могут быть длительная, выше физиологических возможностей организма работа, тяжесть труда, ненормированная нагрузка на организм в совокупности с непродолжительным отдыхом и суровыми бытовыми условиями. Когда человек чувствует, что устал, тело реагирует на истощение от повышенной трудовой деятельности, переходя к скорейшему уменьшению расхода сил для последующего необходимого организму отдыха. Вместе с тем уверенность в надежном и сохранном поведении человека на дороге полностью зависит от его работоспособности [5].

Признаками переутомления являются сонливость днем и бессонница ночью, общая слабость, головные

боли, повышение артериального давления, ухудшение памяти, снижение аппетита, психоэмоциональная нестабильность. Само утомление или его синоним усталость — есть физиологическая реакция организма, вследствие потери энергии, при обеспечении трудовой деятельности. В норме усталость должна проходить после грамотно организованного отдыха.

Ученые, занимающиеся мониторингом состояния здоровья водителей, выявили, что если водитель долго находится за рулем без отдыха, — то шансы попасть в аварию увеличиваются в разы в зависимости от времени на линии сверх положенной нормы в 8 часов.

За рулем человек много думает и устает физически и эмоционально. Особенно водители эмоционально напрягаются из-за непрерывного наблюдения за дорожной ситуацией, чтобы постоянно контролировать возможность аварий, иногда на максимуме своих психоэмоциональных возможностей. Этот процесс приводит к скорому утомлению. Однообразная поза человека за рулем и монотонные действия вызывают физическое переутомление. Подвижность на рабочем месте или смена деятельности помогают мышцам расслабиться, так как волокна мышц приходят в норму при разнообразных нагрузках. У водителя работа сопровождается постоянной напряженностью в области поясницы и конечностей, появляется физическая боль в этих местах. Каждые 2 часа необходимы перерывы, включающие в себя зарядку или разминку. Моральное утомление проявляется в умственных процессах по оценке дорожной ситуации.

Факторы, которые вызывают переутомление человека за рулем:

- продолжительность нахождения на линии;
- моральное состояние водителя;
- поездки в ночное время;
- монотонность труда;
- условия труда.

Признаки раннего утомления:

- зевота;
- заторможенность.

Признаки развившегося состояния переутомления:

- кивки головой («клюет носом»);
- засыпание за рулем с открытыми глазами.

Поэтому нами предложены варианты контроля за состоянием водителя, работающего на линии. Самые известные из существующих: камера видеофикса-

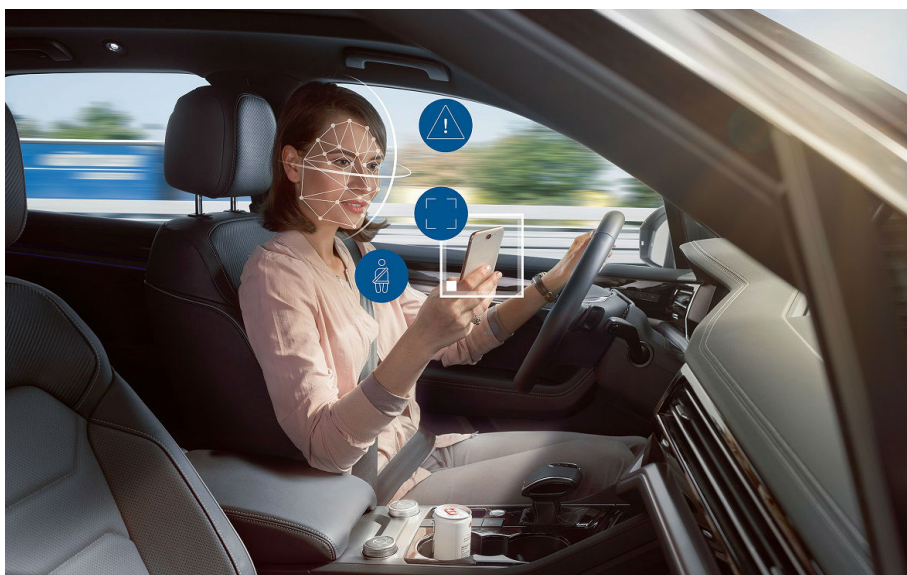


Рис. 1. Обзор изображения с камеры

Figure 1. Overview of the camera image

Источник / Source: Bosch Mobility Solutions. URL: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/solutions/interior/interior-monitoring-systems/> (accessed: 25.04.2020).

ции на приборной панели; акселерометр — отвечает за ускорения и замедления, мониторинг кровяного давления с помощью электронных наручных часов; контроль времени нахождения транспортного средства на смене с помощью бортового компьютера (рис. 1). Понятно, что человеку неприятен постоянный контроль за его действиями, но это необходимо в условиях современного трафика, особенно на дорогах крупных городов [6—8]. Идеальный вариант — это разрешение работать в приложении службы такси только специально переоборудованным автомобилям. Сейчас, чтобы работать в этом агрегаторе, необходимо иметь лицензию на право управления такси, хорошо знать русский язык, регулярно заполнять путевой лист и каждый день осуществлять фотофиксацию автомобиля и документов в освещенном месте. Также бывает, что медицинский контроль водителя перед выходом на смену осуществляется в недостаточном объеме или в спешке. Все это возможно фиксировать в приложении, даже тест на алкоголь, с помощью электронного алкотестера в режиме видеофиксации. Это сократит время перед началом выхода на линию. Тем более, что многие таксисты сейчас снимают на ви-

деорегистратор не только происходящее на дороге, но и фиксируют поведение пассажиров в салоне.

2. Материалы и методы

Дополнительно возможно внедрение и использование систем контроля удержания полосы и установки автомобильных радаров спереди и сзади автомобиля такси под бампером. Эти системы используются на более премиальных моделях автомобилей для контроля «слепых зон» позади автомобилей и использования «адаптивного круиз-контроля». Комплекс систем по поиску местоположения, времени за рулем и пройденному пути уже давно используются на грузоперевозках: тахографы и система «Платон» [9].

Помимо систем, установленных внутри и снаружи автомобиля, в Москве начинает действовать умная система фото-видеофиксации движения автомобилей по городу «Умный город». Уже 4-й год на все автомобили, выпущенные на территории нашей страны или завезенные в Россию, устанавливается система Эра-Глонасс, отвечающая за передачу данных о положении автомобиля и дающая возможность связаться с оператором для вызова экстренных служб [10]. С осени следующего года



Рис. 2. План работы системы

Figure 2. The plan of operation of the system

Источник / Source: Аналитический центр при Правительстве РФ. Исследование рынка такси. URL: <https://ac.gov.ru/files/content/24166/gynok-taksi-2019-pdf.pdf> (дата обращения / accessed: 29.04.2020).

все автомобили, выпущенные в России, предлагается дополнить видекамерами и датчиками, которые будут следить за мимикой лица и жестами водителя, состоянием транспортного средства и соблюдением ПДД. Система будет реагировать на частое зевание человека, пользование мобильным устройством и положением век глаз. Если есть подозрение, что водитель засыпает, то раздается звуковой сигнал и водитель должен проснуться и подтвердить, что он бодрствует [11].

На мобильном устройстве существует возможность передачи данных о результатах прохождения теста на алкоголь и замерах артериального давления в единую систему. Необходимо совместить эти системы в один комплекс по онлайн-мониторингу состояния водителей в диспетчерских (рис. 2). Если программа считает, что водитель устал или засыпает, то она должна информировать об этом водителя и экстренно отправить соответствующий сигнал диспетчеру таксопарка, а он уже должен разобраться в сложившейся ситуации¹.

3. Расчет капиталовложений

Мы провели анализ рынка, предлагаемых товаров по контролю/помощи водителю, и приводим данные

средних цен на устройства и их установку в табл. 1, чтобы не рекламировать определенных производителей систем, программного обеспечения (ПО) и услуги различных предприятий по установке и настройке этого оборудования.

Таблица 1
Средние цены оборудования
Table 1
Average equipment prices

Наименование Name	Цена устройства, руб. Price of the device, RUB	Цена установки, руб. Price of the installation, RUB
Камера контроля разметки Marking control camera	12000	4000
Дополнительное ПО в бортовой компьютер автомобиля Additional software in the vehicle's on-Board computer	11000	8000
Радары за бамперами Radars behind the bumpers	4x5000=20000	10000
Наручные часы с функцией тонометра Hand watch with blood pressure measuring device	10000	0

¹ Автомотопроф. Спутниковые системы навигации GPS и ГЛОНАСС. URL: <https://avtomotoprof.ru> (дата обращения: 27.04.2020).

Окончание табл. 1 / End of the table 1

Наименование Name	Цена устройства, руб. Price of the device, RUB	Цена установки, руб. Price of the installation, RUB
Камера в салоне автомобиля / Camera in the car interior	8000	1000
«Алкозамок» / Breathalyzer locking engine of car	18000	3000
Итого Total price	79000	26000

Из данных таблицы видно, что дооборудование современного автомобиля данными системами обойдётся в среднем в 105 000 рублей. В динамике продаж просматривается постепенное снижение цен на эти устройства. Все больше и больше производителей предлагают данные товары, соответственно повышается качество изделия и снижается стоимость. Конкуренция в данной сфере неизбежна, что радует [13].

Выводы

Системы, разработанные различными автопроизводителями, похожи между собой. Необходимо на законодательном уровне обеспечить автомобили такси данными устройствами. Таким образом сократится количество опасных ситуаций на дорогах общего пользования из-за усталости водителя. Системы с каждым годом становятся все доступнее, надежнее и проще в установке. Также с помощью этих систем будет возможно отслеживать техническое состояние автопарков в онлайн-режиме. Это поможет обеспечить оперативный ремонт и более эффективно использовать машины на линии, вести отчеты и прогнозировать прибыль².

Утомление и переутомление — обратимые процессы, но в особо запущенных случаях пренебрегать помощью врачей преступно. Строгое соблюдение правил режима труда и отдыха водителя является гарантированным средством в борьбе с утомлением и переутомлением. Также не стоит забывать, что работоспособность снижается в случае заболевания водителя, стрессов, низкого качества жизни. Употре-

бление алкоголя или наркотических средств должно быть исключено.

Мы предлагаем соединить уже установленные на автомобилях системы помощи водителю с исследуемыми нами дополнительными устройствами. Цены на эти устройства несопоставимы с ценой жизни человека. Компания «Яндекс» и ГУП «Мосгортранс» продолжают тестировать комплексы по контролю за усталостью водителя на добровольцах и добились сбора огромного количества данных. Анализируя результаты этих тестов, сотрудники предприятий говорят о том, что они уже помогают уменьшить количество происшествий на дорогах. Поэтому необходимо скорейшее появление этих комплексов на автомобилях такси.

Список литературы

1. Акимов В.А., Владимиров В.А. Катастрофы и безопасность МЧС России. М.: Деловой экспресс, 2006. 392 с.
2. Демьянушко И.В., Трофимов Ю.В. Разработка технологий снижения риска и уменьшения последствий техногенных аварий и катастроф за счет прогнозирования поведения объектов системы водитель-автомобиль-дорога-среда. М.: МАДИ, 2011. 161 с. № 02.740.11.0036.
3. Каплин Н.В. Выработка перспективных требований по функциональным возможностям к новому поколению систем контроля усталости водителя // Материалы IX Международной молодежной научно-практической конференции «Научные стремления», Минск, Республика Беларусь, 04—05 декабря 2018. Минск: Лаборатория интеллекта, 2018. С. 72—73.
4. Каплин Н.В. Эволюция систем автоматического управления автомобилем // Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук». Тольятти, Российская Федерация, 23—25 апреля 2018 г. Тольятти, 2018. С. 135—138.
5. Комарова Н.А. Мотивация труда и повышение эффективности работы // Человек и труд, 2011. № 10. С. 17.
6. Лашков И.Б. Анализ поведения водителя при управлении транспортным средством с использованием фронтальной камеры смартфона // Информационно-управляющие системы. 2017. № 4 (89). С. 7—17.
7. Лашков И.Б., Смирнов А.В., Кашевник А.М. Исследование и разработка подхода к построению интеллектуального мобильного сервиса для автоматизированной поддержки водителя транспортного средства // Научно-тех-

² См.: Всемирная организация здравоохранения. Дорожно-транспортные травмы. URL: <http://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries> (дата обращения: 20.04.2020); Аналитический центр при Правительстве РФ. Исследование рынка такси. URL: <https://ac.gov.ru/files/content/24166/rynok-taksi-2019-pdf.pdf> (дата обращения: 29.04.2020).

нический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 6 (100). С. 1130—1138.

8. Махутов Н.А. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Том 2: Безопасность и защищенность критически важных объектов. Ч. 1 и 2. М.: Знание, 2012.

9. Приходько В.М. Интеллектуальные транспортные системы в автомобильно-дорожном комплексе. М.: ООО «МЭЙЛЕР», 2011. 487 с.

10. Родионов В.Г. Новые технологии снижения ДТП по вине человеческого фактора // Автотранспортное предприятие. 2008. № 6. С. 15—18.

11. Lashkov I., Kashevnik A., Shilov N. Dangerous state detection in vehicle cabin based on audiovisual analysis with smartphone sensors // *Advances in intelligent systems and computing*. 2021. Т. 1250 AISC. P. 789—799. doi: 10.1007/978-3-030-55180-3_60

12. Соломатин Н.С., Исаев Е.У. Метод компоновки рабочего места водителя легкового автомобиля с применением пространственной геометрической модели человека. Тольятти: Издательство ТГУ, 2014. 98 с.

13. Kashevnik A., Lashkov I., Gurtov A. Methodology and mobile application for driver behavior analysis and accident prevention // *IEEE transactions on intelligent transportation systems*. 2020. Vol. 21. № 6. P. 2427—2436.

References

1. Akimov VA, Vladimirov VA. *Katastrofy i bezopasnost' MCHS Rossii [Disasters and security. Ministry of emergencies in Russia]*. Delovoj ekspress Publ.; 2006. (In Russ.)

2. Demianushko IV, Trofimov YV. *Razrabotka tekhnologij snizheniya riska i umen'sheniya posledstvij tekhnogennyh avarij i katastrof za schet prognozirovaniya povedeniya ob'ektov sistemy voditel'-avtomobil'-doroga-sreda [Development of technology about risk reduction and reducing of man-made accidents and disasters by predicting the behavior of system objects: driver-car-road-situation. Report about research work]*. Moscow: MAD Publ.; 2011. № 02.740.11.0036. (In Russ.)

3. Kaplin NV. Development of perspective requirements for functionality for a new generation of driver tiring monitoring system. *Materials of the international youth scientific and practical conference «Scientific aspiration»*. Minsk, Belarus. 2018:72—73. (In Russ.)

4. Kaplin NV. The evolution of systems of automatic control of the vehicle. *Materials of the IV International Scientific and Practical Conference Of Young Scientists «Applied mathematics and computer science, modern research in the field of natural and technical Science»*. Tolyatti, Russian Federation, 23—25 of April 2018. Tolyatti State University. 2018:135—138. (In Russ.)

5. Komarova NA. Motivation of work and increase of work efficiency. *Man and labor*. 2010;10:17. (In Russ.)

6. Lashkov IB. Driver's behavior analysis with smartphone front camera. *Information and control systems*. 2017;4(89):7—17. (In Russ.)

7. Lashkov IB., Smirnov AV, Kashevnik AM. Smartphone-based approach to advanced driver assistance system (ADAS) research and development. *Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2015;15,6(100):1130—1138. (In Russ.)

8. Mahutov NA. *Bezopasnost' Rossii. Pravovye, social'no-ekonomicheskie i nauchno-tekhicheskie aspekty. Tom 2: Bezopasnost' i zashchishchennost' kriticheski vazhnyh ob'ektov [Security of Russia. Legal, socio — economic scientific and technical aspects. Part 2. Security and safety of critical objects]*. Moscow: Znanie Publ.; 2012. (In Russ.)

9. Prihodko VM. *Intelligent transport systems in the automobile road complex*. Moscow: MEILER Publ.; 2011. (In Russ.)

10. Rodionov VG. Novye tekhnologii snizheniya DTP po vine chelovecheskogo faktora [New technologies for reducing accidents caused by the human factor]. *Avtotransportnoe predpriyatие [Motor transport enterprise]*. 2008;6:15—18. (In Russ.)

11. Lashkov I, Kashevnik A, Shilov N. Dangerous state detection in vehicle cabin based on audiovisual analysis with smartphone sensors. *Advances in intelligent systems and computing*. 2021;1250 AISC:789—799. doi: 10.1007/978-3-030-55180-3_60

12. Solomatin NS, Isaev EU. *A method for constructing a driver's workplace using a spatial geometric model of a person*. Tolyatti State University Publ.; 2014. (In Russ.)

13. Kashevnik A, Lashkov I, Gurtov A. Methodology and mobile application for driver behavior analysis and accident prevention. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*. 2020;6:2427—2436.

Сведения об авторах

Иванов Кирилл Аркадьевич, аспирант департамента машиностроения и приборостроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов; e-mail: 1042200034@rudn.ru

Камардина Наталья Валерьевна, аспирантка департамента машиностроения и приборостроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов; e-mail: 1042200025@rudn.ru

Данилов Игорь Кеворкович, директор департамента машиностроения и приборостроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук; ORCID: 0000-0002-7142-7461, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARI SPIN-код: 1633-2700; e-mail: danilov-ik@rudn.ru

Коноплев Владимир Николаевич, доцент департамента машиностроения и приборостроения, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, доктор технических наук; ORCID: 0000-0003-1662-6254, Scopus Author ID: 57206670076, eLIBRARI SPIN-код: 3876-1534; e-mail: konoplev-vn@rudn.ru

About the authors

Kirill A. Ivanov, Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); e-mail: 1042200034@rudn.ru

Natalia V. Kamardina, Graduate Student of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); e-mail: 1042200025@rudn.ru

Igor K. Danilov, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Doctor of Technical Sciences; ORCID: 0000-0002-7142-7461, Scopus Author ID: 57210770802, eLIBRARI SPIN-code: 1633-2700; e-mail: danilov-ik@rudn.ru

Vladimir N. Konoplev, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Doctor of Technical Sciences; ORCID: 0000-0003-1662-6254, Scopus Author ID: 57206670076, eLIBRARI SPIN-code: 3876-1534; e-mail: konoplev-vn@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-225-233

УДК 553.068.24

Научная статья / Research article

Особенности формирования лимногенных полезных ископаемых

А.А. Рассказов^a , Е.С. Горбатов^b, А.Е. Котельников^a  

^aРоссийский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

^bИнститут физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Российская Федерация, 123242, Москва, ул. Б. Грузинская д. 10, стр. 1

 E-mail: kotelnikov-ae@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 03 марта 2021 г.

Доработана: 22 мая 2021 г.

Принята к публикации: 03 июня 2021 г.

Ключевые слова: озерные комплексы, нерудные и рудные полезные ископаемые, строительные материалы, диатомиты, углеводороды, бокситы, цеолиты, генетические особенности, эволюция континентального литогенеза, осадочные месторождения

Аннотация. Рассмотрены условия образования нерудных и рудных полезных ископаемых в лимногенных структурах. Установлено, что озера являются природными обогатителями широкого спектра полезных компонентов – силикатных, карбонатных, водорастворимых, рудных, органоминеральных. Наиболее значимыми полезными ископаемыми современных озер, кроме воды, являются: сапропель, диатомит, известь и минеральные соли. С разновозрастными лимногенными комплексами связаны месторождения песков и глин, горючих сланцев, нефти и газа, углей, фосфоритов, цеолитов, эвапоритов, бокситов, железомарганцевых, медных руд, россыпных минералов, некоторых редких и рассеянных элементов. Показано, что большее разнообразие полезных ископаемых древних озерных комплексов по сравнению с современными связано, как с вариациями озерного литогенеза в прошлом, так и с постседиментационными преобразованиями осадочного вещества. В частности, отмечается эпигенетическое обогащение первых рудными компонентами. Выявлено, что лимногенные углеводороды и диатомиты имеют более высокое качество по сравнению с аналогичными полезными ископаемыми морского генезиса. Отмечено, что эволюционные изменения в процессах накопления лимногенных полезных ископаемых затронули в наибольшей степени их биогенные и хемогенные разновидности. Примером этого может служить прогрессирующее накопление каустобиолитов и сульфатная эволюция эвапоритов в озерных структурах на протяжении фанерозоя. Анализ генетических особенностей лимногенных полезных ископаемых дает возможность разработки новых поисковых признаков ряда осадочных месторождений.

Для цитирования

Рассказов А.А., Горбатов Е.С., Котельников А.Е. Особенности формирования лимногенных полезных ископаемых // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 225–233. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-225-233

© Рассказов А.А., Горбатов Е.С., Котельников А.Е., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Features of formation of lacustrine mineral resources

Andrey A. Rasskazov^a , Evgeniy S. Gorbatov^b, Alexander E. Kotelnikov^a  

^aPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

^bSchmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences

10, build. 1, Bolshaya Gruzinskaya St, Moscow, 123242, Russian Federation

✉ E-mail: kotelnikov-ae@rudn.ru

Article history

Received: March 03, 2021

Revised: May 22, 2021

Accepted: June 03, 2021

Keywords: Lacustrine complexes, non-metallic and ore minerals, building materials, diatomites, hydrocarbons, bauxites, zeolites, genetic features, evolution of continental lithogenesis, sedimentary deposits

Abstract. The conditions of the formation of nonmetallic and ore minerals in limnogenic structures are considered. It has been established that lakes are natural enriches of a wide range of useful components – silicate, carbonate, water-soluble, ore, organomineral. The most significant minerals of modern lakes, in addition to water, are: sapropel, diatomite, lime and mineral salts. Deposits of sand, clay, oil shale, oil and gas, coal, phosphorites, zeolites, evaporites, bauxites, ferromanganese, copper ores, placer minerals, and some rare and dispersed elements are associated with limnogenic complexes of different ages. It is shown that a greater variety of minerals of ancient lacustrine complexes compared to modern ones is associated both with variations of lacustrine lithogenesis in the past and with post-sedimentation transformations of sedimentary matter. In particular, epigenetic enrichment of ancient lacustrine complexes with ore components is noted. It was revealed that hydrocarbons and diatomites of lacustrine genesis are of a higher quality compared to similar minerals of marine genesis. It is noted that evolutionary changes in the processes of accumulation of limnogenic minerals have affected to the greatest degree biogenic and chemogenic components. An example of this is the progressive accumulation of caustobiolites and the sulfate evolution of evaporites in lacustrine structures during the Phanerozoic. An analysis of the genetic characteristics of lacustrine minerals makes it possible to develop new exploratory traits of a number of sedimentary deposits.

For citation

Rasskazov AA, Gorbatov ES, Kotelnikov AE. Features of formation of lacustrine mineral resources. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):225–233. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-225-233

Введение

Проблемы формирования осадочного вещества лимногенного (озерного, озерно-болотного, озерно-аллювиального и т.д.) происхождения, его роли в континентальном литогенезе и формировании месторождений полезных ископаемых исследовались долгое время сравнительно мало, но сегодня именно с ним связывают образование широкого спектра осадочных полезных ископаемых, некоторые из которых практически не формируется в иных фациальных обстановках [1]. Целью данной работы является характеристика основных видов лимногенных полезных ископаемых, как современных, так и древних, выявление их генетических особенностей, сравнение с аналогичными видами минеральных ресурсов осадочного происхождения, накопившихся в других фациальных условиях.

1. Полезные ископаемые современных озер

Озера являются важнейшим источником пресной воды на планете, которая является наиболее ценным полезным ископаемым современных озер. В пресных озерах мира сосредоточено около 90 тыс. км³ воды, что в 40 раз больше, чем единовременный объем воды во всех реках планеты. Запасы пресной воды в озерах потенциально велики, однако интенсивность ее изъятия и загрязнения в отдельных районах планеты столь высока, что качество озерных вод непрерывно ухудшается. Озерным водам посвящена обширная литература, анализ которой требует отдельного рассмотрения. В настоящем разделе остановимся на твердых полезных ископаемых, добываемых из современных озер.

Диатомит — легкая тонкопористая горная порода, состоящая из кремнистых скелетов диатомовых водорослей. Диатомиты имеют очень малую плотность, низкую тепло- и звукопроводность, обладают тугоплавкостью и химической стойкостью и используются в качестве строительных и теплозвукоизоляционных материалов, фильтровальных порошков и адсорбентов.

Современные и древние озерные диатомиты встречаются на планете реже, чем морские, образуют меньшие по запасам залежи, но выгодно отличаются от них более высокой чистотой, поскольку в меньшей степени загрязнены терригенными осадками. Континентальные (озерные) диатомиты являются отложениями областей холодного гумидного типа литогнеза и формируются в зонах выхода кристаллических пород на щитах и в областях развития кислого вулканизма. Хорошо изучены и разведаны голоценовые диатомиты малых озер Северо-Запада России, однако значительная конкуренция сапропелевого и диатомового типа седиментации в озерах региона определяет их относительно локальное развитие. В частности, для накопления диатомитов необходимо повышенное содержание доступного для растворения кремнезема, что возможно при достаточно ограниченном сочетании геолого-геоморфологических и ландшафтных условий на водосборах (рис. 1).

Сапропель представляет собой коллоидный осадок пресноводных водоемов, состоящий из остатков планктона и бентоса, а также отмерших частей макрофитов и гумусовых частиц почвы. Сапропелевые отложения образуются в условиях гумидного типа литогнеза и преобладают в лесной зоне с моренным типом рельефа (см. рис. 1). Сапропелевые отложения выполняют дно современных озер или залегают на месте исчезнувших озер в виде горизонтов и линз, перекрытых торфяниками. Мощность сапропелевых залежей обычно не превышает 10 м, но в отдельных случаях может достигать 40 м. Все промышленные месторождения сапропеля образовались в голоцене на протяжении последних 10 тыс. лет. Сапропель используется как органоминеральное удобрение, при приготовлении питательных смесей, в качестве витаминно-кормовых добавок, лечебных грязей для терапии, как сорбент.

Озерная известь представляет собой рыхлый осадок, состоящий из биогенного и хемогенного CaCO_3 . Карбонат кальция может осаждаться непосредственно из растворенного в озерной воде гидрокарбоната

кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ при удалении из нее CO_2 , или при помощи водных растений и водорослей, например *Potamogeton* и *Chara*. Мировые запасы озерной извести сосредоточены в озерных отложениях лесной зоны Евразии, накопившихся в раннем голоцене. В настоящее время осаждение карбонатов в озерах этой зоны практически не происходит.

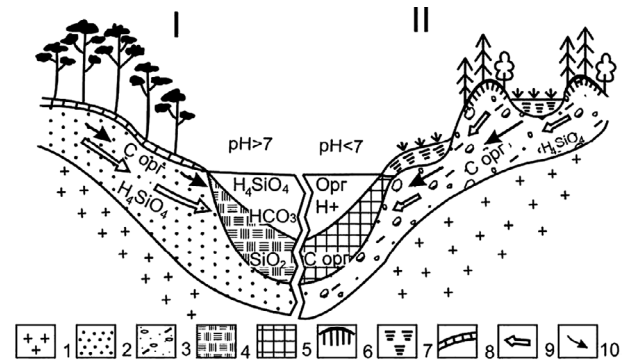


Рис. 1. Схема формирования залежей диатомитов и сапропелей в малых озерах Карелии: I — зандровые равнины на мощных песчаных толщах; II — моренная равнина; 1 — коренные породы, 2 — пески, 3 — морена, валунная супесь, 4 — диатомиты, 5 — сапропели, 6 — подзолы, 7 — торф, 8 — поверхностно-подзолистые почвы, 9 — грунтовые воды с низким содержанием органического вещества, переносящие растворенный кремнезем, 10 — обедненные кремнеземом кислые гумусированные грунтовые воды. По И.Н. Демидову, Т.С. Шелеховой [2]

Figure 1. Diatomite and sapropel deposits formation scheme in small lakes of Karelia: I — outwash plains on thick sandy strata; II — moraine plain; 1 — bedrocks, 2 — sands, 3 — moraine, boulder sandy loam, 4 — diatomites, 5 — sapropels, 6 — podzols, 7 — peat, 8 — surface-podzolic soils, 9 — groundwater with a low content of organic matter, carrying dissolved silica, 10 — silica-depleted acidic humus groundwater. According to I.N. Demidov, T.S. Shelekhova [2]

Рассолы и осадок (рапа) соленых озер аридных областей являются ценным источником *минеральных солей*, Br, I, B, Li, Rb. По мере роста засушливости климата формируются сначала карбонатные (степи), затем сульфатные (полупустыни) и, наконец, хлоридные озера (пустыни), при этом катионный состав рассолов и осадка переходит из кальциевой группы в магниевую и натриевую. В соленых озерах каждой группы выпадение минеральных фаз в осадок происходит в определенной последовательности, связанной с физико-химическими законами растворимости. Содовые эвапориты используются для извлечения каустической и кальцинированной соды, буры, лития. Из озер сульфатного класса добываются гипс, мирабилит, тенардит, астраханит, галит. Основным полезным продуктом

хлоридных озер является галит, а на завершающих стадиях галогенеза в них откладываются бишофит, а иногда калийные соли (сильвинит, карналлит).

Железомарганцевая руда — разновидность бурожелезняковых (лимонитовых) руд осадочного происхождения. Гидроксиды железа и марганца, поступающие в озера с грунтовыми водами, откладываются на их дне в виде оолитов округлой или бобовидной формы. Скопления железомарганцевых бобовин (гидрогетит, псиломелан и др.) образуют на дне ряда северных озер залежи так называемой озерной бобовой железной руды. Рудные тела представляют собой линзы и пласты, состоящие из зимних прослоев гидрооксидов и летних песчано-глинистых слоев. В прошлом бедные лимонитовые руды являлись практически единственным источником железа, так как залегают они неглубоко и могут добываться кустарным способом. В настоящее время их залежи практически не разрабатываются.

2. Полезные ископаемые современных озер

Залежи строительных материалов, главным образом, песков и глин, очень часто формируются в современных озерных обстановках, однако их промышленно значимые месторождения, как правило, связаны со слаболитифицированными комплексами древних (чаще четвертичных) озер. Поэтому эти полезные ископаемые мы относим к категории древних.

Пески озерного происхождения по сравнению с континентальными песками аллювиального и флювиогляциального генезиса отличаются средней и хорошей сортировкой песчаной фракции и присутствием заметного количества загрязняющих алевритовых и глинистых частиц. Озерные пески, в отличие от морских, не содержат глауконита, однако их минералогические составы сильно различаются и во многом определяются тектоническим режимом территории в период осадконакопления. Пески озерного генезиса обладают хорошими качествами не только строительных смесей, заполнителей бетонов и формовочных материалов, но и сырья для производства керамики и стекла (кварцевые пески) [3].

Глины в озерах формируются в результате перетложения тонкодисперсных продуктов выветривания кристаллических пород или выпадения аутигенных

коллоидных частиц. Минеральный состав глин определяется типом выветривания горных пород и рН водной среды. В озерах гумидных областей формируются каолинистые или гидрослюдистые глины, которые сохраняются благодаря кислой реакции пресных вод. Каолинистые глины используются в керамической, огнеупорной, бумажной промышленности. Образование гидрослюдистых глин происходило преимущественно в озерах холодного и умеренного климата. Их пластичные и однородные разности применяются для изготовления неогнеупорной керамики. В озерах аридных областей с щелочной реакцией среды формируются монтмориллонитовые (сметкитовые) и палыгорскит-сепиолитовые глины, область применения которых определяется их хорошими абсорбционными и ионообменными свойствами.

Мергели и известняки в ископаемых лимногенных комплексах встречаются относительно редко и не образуют крупных месторождений. Они залегают обычно в виде маломощных линз, вложенных в песчано-глинистые терригенные отложения.

В озерных обстановках формируются также *фосфориты*, однако по экономическому значению они значительно уступают фосфатным рудам морского генезиса. Фосфатность, связанная с озерными диатомитовыми илами в вулканических областях, выявлена в Закавказье а также в Танзании. Практически единственное крупное месторождение лимногенных фосфоритов приурочено к плейстоценовым озерным осадкам, залегающим в южной части котловины озера Маньяра, расположенного недалеко от вулкана Килиманджаро. Кроме того, в верхнемеловых отложениях Амуро-Зейской впадины описаны фосфориты, связанные с микробной и фитогенной компонентой осадков пойменных и старичных озер, существовавших в условиях умеренно теплого гумидного климата [4].

Лимногенные сапропели являются исходным органическим материалом для формирования *сапропелитовых углей*, которые слагают линзы в пластах гумулитовых углей. Последние формируются не только из остатков наземной автохтонной древесной растительности, но и из переотложенного в озерных водоемах гумуса. Сапропелиты, претерпевшие буругольную либо начальные этапы каменноугольной стадии метаморфизма, представляют ценное химиче-

ское сырье, но отдельно от гумолитов, как правило, не добываются. Поэтому угли правильнее считать не собственно полезными ископаемыми древних озер, а накоплениями озерно-болотных комплексов, т.е. они являются лимногенными в широком смысле этого термина.

Горючие сланцы — твердые высокозольные каустобиолиты, содержащие битуминоидные вещества из водорослевого детрита с участием гумуса. Для накопления горючих сланцев необходимо сочетание высокой биопродуктивности водоемов с низкой хемогенной и терригенной седиментацией, поэтому горючие сланцы ассоциируются с карбонатными и глинистыми породами. Литологические особенности месторождений горючих сланцев позволяют сделать вывод, что их накопление происходило не только в глубоких стратифицированных озерах, но и в мелководных водоемах плейевого типа. В первом случае литификации органического вещества способствовала восстановительная (бескислородная) среда статичных придонных вод, а во втором — регулярное (сезонное) высыхание и обезвоживание органических илов, препятствующее их разложению.

С эоценовой формацией Грин-Ривер на западе США связаны крупнейшие мировые запасы горючих сланцев и троны (содовый эвапорит). Отложения этой формации накапливались в нескольких самостоятельных озерных бассейнах, возникших во впадинах палеорельефа (рис. 2). Их фациальная структура связана с изменениями климата, в ходе которых озера из мелководных пересыхающих (в аридные эпохи) становились глубоководными стратифицированными (в плювиальные эпохи), и наоборот. Битуминоидный карбонатно-глинистый материал накапливался в центральной части палеоозер обоих типов.

Залежи **углеводородов**, связанные с ископаемыми озерными комплексами, представляют собой отдельную генетическую группу месторождений и имеют весьма высокое экономическое значение, обеспечивая порядка 20 % мировой добычи углеводородов [6]. Генетической особенностью нефтегенного органического вещества озерного генезиса является его высокая геохимическая гетерогенность по сравнению с морскими и аллювиально-болотными фациями, при этом общее высокое содержание в нем планктоногенного вещества способствует образованию качественных углеводородов с высоким содержанием водорода.

В озерных бассейнах накапливаются преимущественно нефтематеринские отложения, реже газоматеринские, причем последние формируются в пресноводных водоемах в сочетании с аллювиально-болотными угленосными фациями. Нефтематеринские породы и резервуары озерного происхождения играют значительную роль в формировании месторождений углеводородов платформенных рифтогенных бассейнов, нижних (синрифтовых) комплексов пассивных окраин, межгорных и предгорных впадин. Нефти озерного генезиса по сравнению с углеводородами морского и дельтового генезиса имеют улучшенные физико-химические свойства — меньшую сернистость и большую парафинистость, однако их скопления отличаются глубоким залеганием (особенно в рифтогенных осадочных бассейнах), что осложняет эксплуатацию месторождений этого сырья.

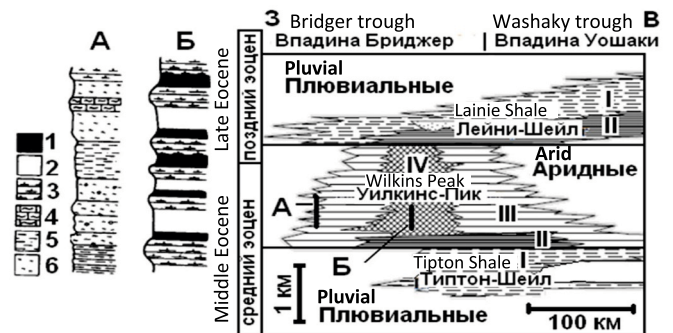


Рис. 2. Схематический разрез лимногенной формации горючих сланцев и троны Грин-Ривер. I–IV — фации: I — битуминоидные мергели, отложенные в пресноводном озере; II — фации солоноватоводного озера; III — битуминоидные сланцы (фации сублиторали содового бассейна); IV — эвапориты (фации пелагиали содового бассейна). Литологический состав толщи Уилкинс-Пик: 1 — битуминоидные сланцы; 2 — трона; 3 — доломиты; 4 — строматолитовые известняки; 5 — алевролиты; 6 — песчаники. По Х. Редингу [5], с дополнениями

Figure 2. Schematic section of the limnogenic oil shale formation and the Green River Thrones. I–IV — facies: I — bituminous marls deposited in a freshwater lake; II — facies of a brackish water lake; III — bituminous shales (facies of the sublittoral zone of the soda basin); IV — evaporites (facies of the pelagic zone of the soda basin). Lithological composition of the Wilkins Peak sequence: 1 — bituminous shales; 2 — throne; 3 — dolomites; 4 — stromatolite limestone; 5 — siltstones; 6 — sandstones.

According to H. Reading [5], with additions

В процессах накопления лимногенных каустобиолитов на протяжении фанерозоя четко прослеживаются эволюционные трансформации, которые отражают изменение физико-химических условий на поверхности

суши, развитие растительности и почв на водосборах, увеличение продуктивности и сложности организации озерных экосистем. Так, в озерах раннего палеозоя накапливались планктоногенные осадки, продуцирующие только горючие сланцы и жидкие углеводороды с общей тенденцией к росту интенсивности накопления сапропелевого вещества на протяжении всего фанерозоя. В позднем палеозое с развитие макрофитной растительности на водосборах озер стало возможным прогрессирующее накопление гумусового вещества и широкое углеобразование в аллювиально-озерных и озерно-болотных системах.

Древние *эвапориты*, как и минеральные соли современных озер, можно разделить на карбонатный, сульфатный и хлоридный типы, однако их соотношение на протяжении фанерозоя заметно менялось. Докайнозойские эвапориты формировались чаще в условиях галогенеза хлоридного типа с отчетливо выраженной калийной фазой и были связаны в большей степени с водами морского генезиса и приморскими озерами. Накопление молодых эвапоритов происходило все чаще во внутриконтинентальных соленых озерах, причем в кайнозойе в них начал преобладать сульфатный галогенез. Сульфатовая эволюция озерных эвапоритов является результатом возрастания роли окислительных процессов в корях выветривания, продуцирующих оксиды серы.

Цеолиты — большая группа водных алюмосиликатов из подкласса каркасных силикатов. Кристаллическая решетка цеолитов отличается наличием полостной структуры $[AlSi]O_4^-$ с отрицательным зарядом, компенсируемым катионами, что определяет наличие у них ряда полезных физико-химических свойств, позволяющих использовать цеолиты в качестве адсорбентов, ионообменников, молекулярных сит [7; 8]. Обычно цеолитовые отложения формировались в соленых и солоноватых озерах карбонатного типа при взаимодействии их щелочных вод или рассолов ($pH=9-10$) с кислым (трахитовым) вулканическим стеклом. Подробно изучены обстановки озерного цеолитообразования в Монголии, а также Индокитае, где был сделан прогноз новых месторождений этого сырья [9].

3. Рудные

Ископаемые **железомарганцевые образования** известны в лимногенных комплексах Урала, однако

большого практического применения они не имеют. Большинство месторождений бурого железняка раннемелового возраста (Средний Урал), кайнозойских оолитовых руд и части олигоценых железомарганцевых отложений (Южный Урал) принадлежат озерным комплексам посторогенного этапа развития Урала. Их образование относится к периоду разрушения толстого слоя элювиальных пород (ранний мел) с последующим отложением этих пород в узких грабенообразных озерных структурах [10; 11].

Бокситы являются основной алюминиевой рудой, состоящей из смеси гидрооксидов и оксидов алюминия, железа и глинистых минералов. Бокситы в озерных обстановках накапливаются в результате переотложения продуктов латеритовых кор выветривания, образующихся в результате глубокого физико-химического выветривания алюмосиликатных пород в условиях влажного тропического климата. На посторогенном этапе развития Урала сформировалось Южно-Уральское месторождение бокситов, в котором линзообразные рудные тела связаны с древними карстовыми озерами, развитыми в кровле девонских отложений. Относительно небольшие залежи бокситов воронкообразной морфологии распространены в Средиземноморье и развиты в кровле закарстованных морских известняков (рис. 3). Рудные месторождения формировались в приморских карстовых озерах, в которых концентрировались алюмосиликатные продукты растворения карбонатных пород.

В озерных обстановках формируются **медные руды** медистых песчаников и сланцев. Например, в Джеккаганском стратиформном месторождении в Центральном Казахстане сульфидная медь накапливалась в сероцветных фациях подводных дельт средне-верхнекаменноугольного возраста, переходящих в линзовидные слои озерных песков и алевроитов, причем рудные тела выдержаны по простиранию и приурочены к определенным стратиграфическим горизонтам [13]. Каждый цикл осадконакопления продуктивной толщи начинается с накопления более крупнозернистых пород и заканчивается мелкообломочными. Озера, на литорали которых накапливались рудные компоненты, по-видимому, были мелководными и периодическими.

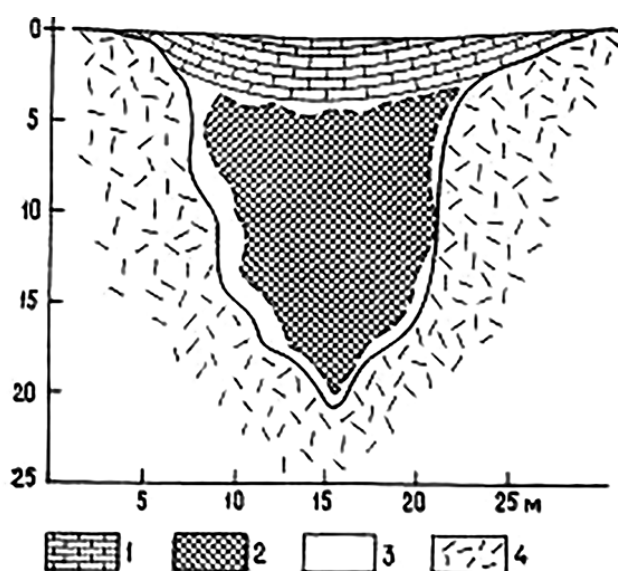


Рис. 3. Залежь бокситов в приморской карстовой воронке, образовавшейся при морской регрессии в интервале «верхний мел – нижний эоцен». Район г. Вишняна, п-ов Истрия, Хорватия: 1 – известняк, нижний эоцен; 2 – боксит; 3 – бокситовая глина и глинистый боксит; 4 – вмещающий бокситы известняк, сенон. По Д. Бардошши [12]

Figure 3. Bauxite deposit in a coastal sinkhole formed during marine regression in the Upper Cretaceous – Lower Eocene interval. Region of Vishnjana, Istria Peninsula, Croatia: 1 – limestone, Lower Eocene; 2 – bauxite; 3 – bauxite clay and clayey bauxite; 4 – enclosing bauxite limestone, Senonian. According to D. Bardoshshi [12]

С озерными обстановками связаны **россыпные залежи**, образующие небольшие месторождения регионального значения. Дифференциация россыпных минералов в озерах сравнительно мала, поэтому появление озерных россыпей промышленного значения происходит сравнительно редко. В озерах россыпные минералы (высокоплотные и стойкие к истиранию) накапливаются при разгрузке потоков речных наносов; в результате размыва прибором коренных месторождений или древних россыпей. Известны промышленные пляжевые озерные россыпи золота, шеелита, касситерита и тантало-ниобатов, алмазов, а также янтаря, причем последние связаны не с пляжевыми, а с глубоководными озерными фациями.

При разработке черносланцевых лимногенных толщ попутно извлекаются такие цветные, рассеянные и радиоактивные металлы, как молибден, свинец, цинк, ванадий, рений, германий, уран.

Заключение

В современных и древних озерных обстановках формируются многие виды нерудных и рудных полезных ископаемых, имеющих важное практическое значение. С озерными отложениями связаны месторождения строительных песков, россыпных руд, цементных и керамических (в том числе огнеупорных) глин, мергелей, диатомитов, эвапоритов (трона, тенардит, гипс, эпсонит, галит, карналлит, сильвин, бишофит и др.) и каустобиолитов. Биогенный осадок, который накапливался в древних озерах, может преобразовываться в битуминоидные (горючие) сланцы, которые при катагенезе способны генерировать нефть и газ. Анализ эволюции процессов озерного литогенеза позволяет сделать вывод об увеличении интенсивности накопления каустобиолитов на протяжении фанерозоя. Также отмечена тенденция большего образования сульфатных минералов в озерных структурах кайнозойского возраста по сравнению с более древними формациями, в которых преобладают мощные толщи хлоридных эвапоритов. Таким образом, наиболее значительные трансформации затронули процессы накопления лимногенных полезных ископаемых биогенного и хемогенного происхождения. Что касается формирования рудных полезных ископаемых в лимногенных структурах, то для этих процессов характерна схема рудогенеза, при которой озерные комплексы играют роль концентраторов и обогатителей рудного вещества. Вода, сапропель, озерная известь, диатомит и минеральные соли являются основными полезными ископаемыми, добываемыми из современных озер. Меньшее разнообразие полезных ископаемых современных озер по сравнению с древними озерными комплексами объясняется незавершенностью процессов их образования в современных областях континентального осадконакопления.

Особенностью исследований на современном уровне изученности процессов озерного литогенеза является возможность анализа и прогноза большого количества как нерудных, так и рудных полезных ископаемых, что особенно актуально в связи с большим ресурсным значением лимногенного типа осадочных полезных ископаемых.

Список литературы

1. Рассказов А.А., Горбатов Е.С. Лимногеология и эволюция озерного литогенеза. М.: ИФЗ РАН, 2019. 192 с.
2. Демидов И.Н., Шелехова Т.С. Диатомиты Карелии (особенности формирования, распространения, перспективы использования). Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 89 с.
3. Кац М.Я., Кац М.М., Рассказов А.А. Динамика изменения плотностных свойств кварца в процессе минералогического вызревания пород. Математическое и экспериментальное моделирование процессов // Эпигенез и его минеральные индикаторы. Тр. ГИН АН СССР. М.: Наука, 1971. Вып. 221. С. 128—144.
4. Жегалло Е.А., Школьник Э.Л. Изучение в сканирующем электронном микроскопе континентальных фосфоритов из Амурской области // Эволюция биосферы и биоразнообразие. М.: КМК, 2006. С. 129—133.
5. Обстановки осадконакопления и фации: в 2 т. Под ред. Х. Рединга. М.: Мир, 1990. Т. 1. 351 с.
6. Bohacs K.M., Carroll A.R., Neal J.E., Mankiewicz P.J. Lake-Basin Type, Source Potential, and Hydrocarbon Character: an Integrated Sequence Stratigraphic–Geochemical Framework // Gierlowski-Kordesch E.H., Kelts K.R. (eds.) Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology. 2000. P. 3—34. doi: 10.1306/St46706C1
7. Chmielewska E. Natural Zeolites as Sustainable and Environmental Inorganic Resources over the History to Present. *General Chemistry* 2019. Vol. 5. № 3. P. 190001. doi: 10.21127/yaoyigc20190001
8. Mastinu A., Kumar A., Maccarinelli, Bonini S., Premoli M., Aria F., Gianoncelli A. Zeolite Clinoptilolite: Therapeutic Virtues of an Ancient Mineral. *Molecules*. 2019. Vol. 24. N. 8. P. 1517. doi: 10.3390/molecules24081517.
9. Рассказов А.А. Limnogenic zeolites in the Indochina Mesozoic deposits // Clay mineralogy and petrology. Banská Stianica, Slovakia, 1996. P. 17.
10. Рассказов А.А., Скобелев С.Ф., Стукалова И.Е. Эволюция процессов континентального литогенеза в лимногенных комплексах Урала // Седиментогенез и литогенез осадочных образований. Екатеринбург: УГГА, 1996. С. 104—105.
11. Рассказов А.А., Горбатов Е.С., Васильева Е.Ю. Месторождения лимногенных углеводородов и геоэкологические аспекты, связанные с их генезисом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2017. Т. 25. № 3. С. 366—379. doi: 10.22363/2313-2310-2017-25-3-366-379
12. Бардошши Д. Карстовые бокситы / под. ред. В.П. Петрова. М.: Мир, 1981. 454 с.
13. Baibatsha A.B., Bekbotayeva A.A. Relationship of copper mineralization with the conditions of sandstone

formations in stratiform deposits in Kazakhstan. 6th International Limnology Congress. Reno, Nevada, USA. 2015.

References

1. Rasskazov AA, Gorbатов ES. *Limnogeologiya i evolyutsiya ozerного litogeneza [Limnogeology and evolution of lacustrine lithogenesis]*. Moscow: IFZ RAN [Institute of Physics of the Earth RAS]; 2019. (In Russ.)
2. Demidov IN, Shelekhova TS. *Diatomity Karelii (osobennosti formirovaniya, rasprostraneniya, perspektivy ispol'zovaniya) [Diatomites of Karelia (features of formation, distribution, prospects of use)]*. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2006. (In Russ.)
3. Kats MYa, Kats MM, Rasskazov AA. Dinamika izmeneniya plotnostnykh svoystv kvartsa v protsesse mineralogicheskogo vyzrevaniya porod. Matematicheskoe i eksperimental'noe modelirovanie protsessov [Dynamics of changes in the density properties of quartz in the process of mineralogical maturation of rocks. Mathematical and experimental modeling of processes]. *Epigenez i ego mineral'nye indikator [Epigenesis and its mineral indicators]*. Moscow: Nauka Publ. (In Russ.)
4. Zhegallo EA, Shkolnik EL. Izuchenie v skaniruyushchem elektronnom miksokope kontinental'nykh fosforitov iz Amurskoy oblasti [Study in a scanning electron microscope of continental phosphorites from the Amur region]. In: *Evolutsiya biosfery i bioraznoobrazie [Evolution of biosphere and biodiversity]*. Moscow: KMK Publ.; 2006. p. 129—133. (In Russ.)
5. Reading H. (ed.). *Obstanovki osadkonakopleniya i fatsia [Sedimentary environments and facies]*. Vol. 1. (In Russ.)
6. Bohacs KM, Carroll AR, Neal JE, Mankiewicz PJ. Lake-Basin Type, Source Potential, and Hydrocarbon Character: an Integrated Sequence Stratigraphic–Geochemical Framework. In: Gierlowski-Kordesch E.H., Kelts K.R. (eds.) *Lake basins through space and time: AAPG Studies in Geology*. 2000. p. 3—34. doi: 10.1306/St46706C1
7. Chmielewska E. Natural Zeolites as Sustainable and Environmental Inorganic Resources over the History to Present. *General Chemistry*. 2019;5(3):190001. doi: 10.21127/yaoyigc20190001
8. Mastinu A, Kumar A, Maccarinelli G, Bonini S, Premoli M, Aria F, Gianoncelli A. Zeolite Clinoptilolite: Therapeutic Virtues of an Ancient Mineral. *Molecules*. 2019;24(8):1517. doi: 10.3390/molecules24081517
9. Rasskazov AA. Limnogenic zeolites in the Indochina Mesozoic deposits. *Clay mineralogy and petrology*. Banská Stianica, Slovakia. 1996:17.
10. Rasskazov AA, Skobelev SF, Stukalova IE. Evolyutsiya protsessov kontinental'nogo litogeneza v limnogennykh kompleksakh Urala [Evolution of the processes of continental

lithogenesis in the limnogenic complexes of the Urals]. *Sedimentogenez i litogenez osadochnykh obrazovaniy [Sedimentogenesis and lithogenesis of sedimentary formations]*. 1996:104—105. (In Russ.)

11. Rasskazov AA, Gorbatov ES, Vasilieva EU. Deposits of lacustrine hydrocarbons and geocological aspects related to their genesis. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2017;25(3):366—379. doi: 10.22363/2313-2310-2017-25-3-366-379. (In Russ.)

12. Bardoshshi D. *Karstovye boksity [Karst bauxites]*. V.P. Petrova (ed.). Moscow: Mir Publ.; 1981. (In Russ.)

13. Baibatsha AB, Bekbotayeva AA. Relationship of copper mineralization with the conditions of sandstone formations in stratiform deposits in Kazakhstan. *6th International Limnology Congress*. Reno, Nevada, USA; 2015.

Сведения об авторах

Рассказов Андрей Андреевич, профессор департамента недропользования и нефтегазового дела, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, доктор геолого-минералогических наук; ORCID: 0000-0001-9508-1576, Scopus Author ID: 57221540598, eLIBRARI AuthorID: 59545; e-mail: rasskazo@yandex.ru

Горбатов Евгений Сергеевич, старший научный сотрудник лаборатории палеосейсмологии и палеогеодинамики, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, кандидат геолого-минералогических наук; Scopus Author ID: 57200762403, eLIBRARI SPIN-код: 7474-4881; e-mail: e.s.gor@mail.ru

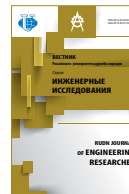
Котельников Александр Евгеньевич, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, кандидат геолого-минералогических наук; ORCID: 0000-0003-0622-8391, Scopus Author ID: 57205586833, eLIBRARI SPIN-код: 6280-5070; e-mail: kotelnikov-ae@rudn.ru

About the authors

Andrey A. Rasskazov, Professor, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Doctor of Geology; ORCID: 0000-0001-9508-1576, Scopus Author ID: 57221540598, eLIBRARI AuthorID: 59545; e-mail: rasskazo@yandex.ru

Evgeniy S. Gorbatov, Senior Researcher, Laboratory of Paleoseismology and Paleogeodynamics, Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, PhD in Geology; Scopus Author ID: 57200762403, eLIBRARI SPIN-code: 7474-4881; e-mail: es.gor@mail.ru

Alexander E. Kotelnikov, Associate Professor, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), PhD in Geology; ORCID: 0000-0003-0622-8391, Scopus Author ID: 57205586833, eLIBRARI SPIN-code: 6280-5070; e-mail: kotelnikov-ae@rudn.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-234-240

УДК 550.84.09

Научная статья / Research article

Построение карты геохимических аномалий по предсказанному значению золота на Лидинском рудном поле острова Уруп

Ю.М. Панасенко, В.Е. Марков, Е.В. Карелина

Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

E-mail: karelina_ev@pfur.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 января 2021 г.

Доработана: 23 марта 2021 г.

Принята к публикации: 12 мая 2021 г.

Ключевые слова: геология, геохимические аномалии, геостатистический анализ в ArcGis, геохимические аномалии золота, золото-серебряные рудопроявления острова Уруп

Аннотация. Целью данной статьи является изучение способов построения карт геохимических аномалий методами геостатистики. На представленном в статье примере показана возможность вероятностного определения золота, образующего ореолы рассеяния закрытого типа по данным литогеохимического опробования Лидинской площади (о. Уруп, Курильские острова). На участке Коленчатом Лидинского рудного поля известно золотое рудопроявление Коленчатое. Оно приурочено к врезу реки и за пределами его пропадает. Это связано с мощным перекрытием участка четвертичными отложениями. Вкупе с неравномерным распределением золота данные обстоятельства осложняют построение карт геохимических аномалий и выделение перспективных участков. Для решения поставленной задачи была использована программа Statistica. С ее помощью была построена матрица корреляций, определены элементы спутники золота и составлено уравнение множественной регрессии для золота. Данное уравнение было использовано для вероятностного расчета значений золота в каждой точке опробования. В программе ArcGis в модуле Geostatistical Analyst была построена карта геохимических аномалий по предсказанному значению золота методом кригинга, выделены перспективные участки. Выявленные аномалии вытянуты в северо-западном направлении и пространственно приурочены к основной системе разломов.

Для цитирования

Панасенко Ю.М., Марков В.Е., Карелина Е.В. Построение карты геохимических аномалий по предсказанному значению золота на Лидинском рудном поле острова Уруп // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2021. Т. 22. № 2. С. 234–240. doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-234-240

© Панасенко Ю.М., Марков В.Е., Карелина Е.В., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Construction a map of geochemical anomalies for the predicted value of gold in the Lidin ore field of Urup Island

Yuri M. Panasenko, Vladimir E. Markov, Elena V. Karelina ✉

Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation
✉ E-mail: karelina_ev@pfur.ru

Article history

Received: January 14, 2021

Revised: March 23, 2021

Accepted: May 12, 2021

Keywords: geology, geochemical anomalies, geostatistical analysis in ArcGis, geochemical anomalies of gold, gold-silver ore occurrences of the island of Urup

Abstract. The purpose of this article is to study the methods of constructing maps of geochemical anomalies using geostatistical methods. The example presented in the article shows the possibility of probabilistic determination of gold in strongly overlapped areas (Urup Island, Kuril Islands). On the site of the Kolenchaty Lidinskoye ore field, the gold ore occurrence of the Kolenchaty is known. It is timed to the incision of the river and disappears outside of it. This is due to the strong overlap of the area by Quaternary sediments. Together with the uneven distribution of gold, these circumstances complicate the construction of maps of geochemical anomalies and the identification of promising areas. To solve this problem, the Statistica program was used. With its help, a matrix of correlations was built, elements of the satellites of gold were selected, and a multiple regression equation for gold was drawn up. This equation was used to probabilistically calculate gold values at each sampling point. In ArcGis, Geostatistical Analyst, geochemical anomalies were mapped from the predicted gold value by kriging, and promising areas were highlighted.

For citation

Panasenko YuM, Markov VE, Karelina EV. Construction a map of geochemical anomalies for the predicted value of gold in the Lidin ore field of Urup Island. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2021;22(2):234–240. (In Russ.) doi: 10.22363/2312-8143-2021-22-2-234-240

Введение

Остров Уруп — четвертый от Японии остров, на котором с 2015 года работает золотодобывающая компания «КурилГео» (рис. 1). Остров Уруп является частью Большекурильской структурно-фациальной зоны в строении которой принимают участие стратифицированные вулканические и вулканогенно-осадочные образования неогенового и четвертичного возраста, которые инъецированы многочисленными экстрозивными, интрузивными, субвулканическими телами и дайками различного состава. Рыхлые осадки четвертичного возраста играют резко подчиненную роль [1].

Месторождение золото-серебряной формации находится на юге острова, там же располагается и горно-обогачительный комбинат. На данный момент добыча Курильского золота ведется только на нем. Для открытия дополнительных ресурсов драгоценных металлов в середине острова, на Лидинском рудном поле (рис. 2), в 2019 году была проведена литогеохимическая съемка.

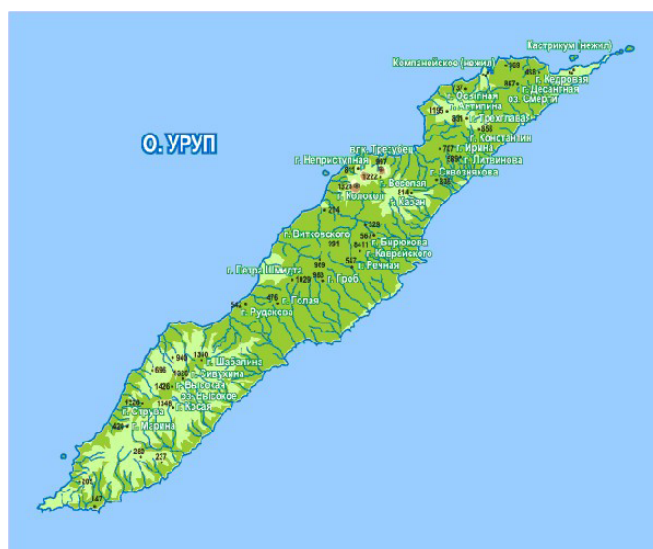


Рис. 1. Физическая карта о. Уруп, 1:200 000 (из отчета Гайнетдинова Р.Г.)

Figure 1. Physical map of i. Urup, 1: 200 000 (from the report of Gaynetdinov R.G.)

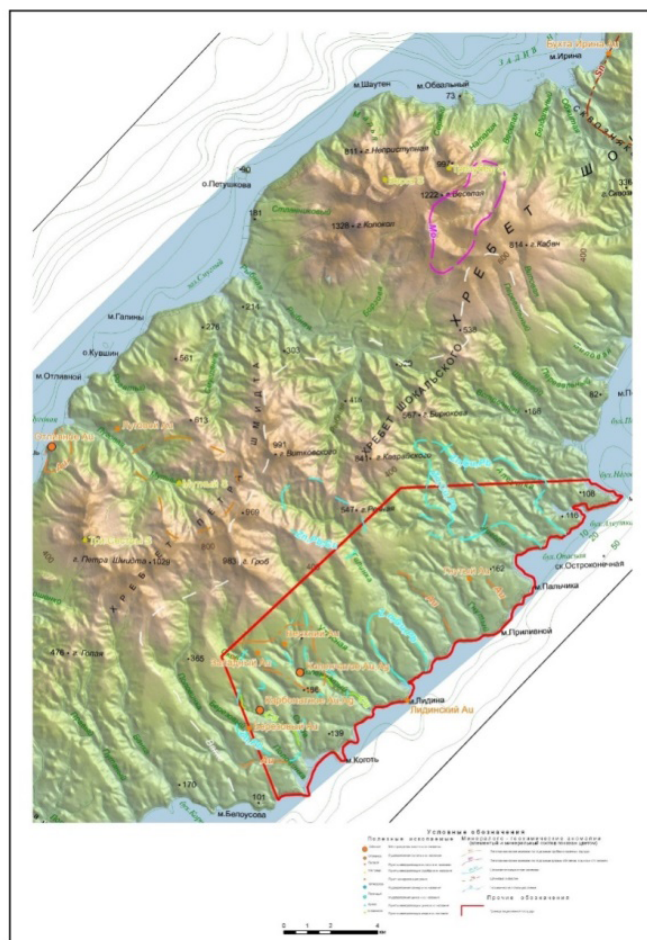


Рис. 2. Фрагмент физической карты о. Уруп (из отчета Гайнетдинова Р.Г.) красный контур – Лидинское рудное поле, 1:100 000

Figure 2. Fragment of a physical map i. Urup (from the report of Gainetdinov R.G.) red outline – Lidinskoye ore field, 1: 100 000

1. Ранее проведенные работы

На ранних этапах по выявленным благоприятным структурным критериям были локализованы наиболее перспективные участки. Именно на них были проведены литогеохимические работы (26 профилей с расстоянием между профилями — 200 м, между точками опробования — 50 м) с одновременной геологической съемкой. Проведенные до 2006 г. геофизические исследования носили региональный характер, охватывая всю Курильскую дугу и, в основном, прилегающую к островам акваторию. Наземные специализированные комплексные геофизические работы на рудное

золото на острове были проведены в 2004 и 2007 годах в рамках поисково-оценочных работ на южной части острова (электроразведка, магниторазведка, измерение физических свойств горных пород) [2]. По причине низких содержаний сульфидов в золотоносных породах, недостаточного знания литологического состава рудовмещающих пород и руд (отсутствие контрастной литологии и ясного литологического контроля оруденения) геофизические работы на Лидинском не проводились. Так же в 2007 году было пройдено 19 канав по всему участку. Многообещающие результаты дало Коленчатое рудопоявление и, в 2019 году, там были пройдены еще 7 канав.

2. Геохимические особенности Коленчатой рудоносной зоны

Коленчатая рудоносная зона приурочена к крутопадающему на север 50–70° разлому западно-северо-западного 260–300° простирания в миоцен-плиоценовых псефитовых туффитах и лавах дацитоандезитов. 2 рудных тела, вскрытых канавой, локализованы в зоне разлома с падение под углом 60°, прослежено по простиранию на 80 м. Представлены золотосодержащими вторичными кварцитами с отчетливой первичной текстурой гравелитов с тонковкрапленными сульфидами (Fe, Cu, Pb, Zn) и их шлировыми скоплениями. Рудные минералы составляют до 20 % объема породы и представлены пиритом (30 % от всех рудных минералов), халькопиритом (до 60 %), марказитом (7 %), гетитом (2 %), сфалеритом (1 %), а также единичными зернами барита. [3]

Полученные результаты анализов спектрометрии по канавам и закопушкам показали содержания золота до 6 г/т, однако при выведении значений опробования на карту они не давали объективной картины распределения и приуроченности к структурным элементам рудного поля. Ситуация осложнена наличием геохимического экрана надрудных отложений представленных зонами гидротермальных глин и маломощных безрудных кварцевых и кварц-карбонатных прожилков (рис. 3), которые препятствуют попаданию значимого количества Au в пробы [4]. Для повышения качества опробования на геохимических работах использовались ручные буры, позволяющие отбирать материал с глубины до 3м. Тем не менее резко аномальные

значения золота были обнаружены только в точках оруденения, где каньон ручья Коленчатый прорезал покрывку геохимического экрана до рудного уровня.

Как видно из рис. 3, зоны минерализации и ореолы рассеяния на рудопроявлении относятся к закрытому типу, а их поиски традиционными методами (построение мономинеральных карт и карт элементов-спутников) на данной площади оказались малоинформативными [5]. В связи с этим была предпринята попытка построения прогнозных карт с помощью статистических методов. В настоящее время имеется множество исследований по применению геостатистики в самых различных областях (от технических до народнохозяйственных), в том числе геологии, экологии, геофизики и др. [6–9].

3. Построение карты геохимических аномалий по предсказанным значениям золота

В отчетах предшественников указывались элементы-спутники золотого оруденения на данном участке — это серебро, висмут, сурьма, ртуть [10]. В программе Statistica с помощью функции кластерного анализа¹ нами были рассчитаны корреляции 36 элементов с золотом, из которых только Ag, As, Co, Hg, Sb, S имели коэффициент корреляции больше 0,5.

Дендрограмма в качестве связанного с золотом элемента предлагала Mo, но связь это была ненадежна, поэтому в итоговом списке индикаторов золота он не фигурирует. В блоке описательной статистики

были определены мода, среднее арифметическое, дисперсия, стандартное отклонение, квартильный размах этих элементов и Au. Далее был проведен анализ множественной регрессии²: значения выше геохимического фона золота, но ниже ураганных значений сравнивались с элементами индикаторами. Такая выборка позволила установить связь между аномальными значениями Au и другими элементами (рис. 5). Из полученного уравнения регрессии было выведено предсказанное значение золота в каждой точке опробования

В программе ArcGis 10.4.1³ была построена карта геохимических аномалий (рис. 6) в модуле Geostatistical Analyst/мастер операций геостатистики методом кригинга⁴ по предсказанным значениям⁵ [11]. При наложении на геологическую карту данного участка прослеживается линейная вытянутость полученных аномалий, их приуроченность к линии разломов и жилам вторичных (вагги) кварцитов, с которыми связано оруденение на острове.

Выявленные аномалии вытянуты в северо-западном направлении и имеют длину от 1 км до 2,85 км, ширина варьируется от 280 м до 770 м. Можно предположить пространственную связь с кольцевыми структурами, так как именно с ними связано золото-серебряное оруденение на юге острова, но точно ее установить на данный момент не представляется возможным. Наибольшая концентрация полезного компонента находится в центре исследуемой площади, в окрестностях рудопроявления Коленчатого.

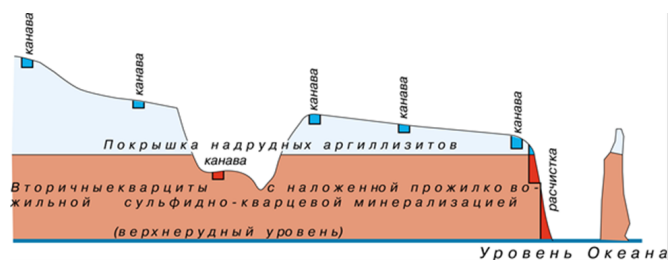


Рис. 3. Принципиальная схема строения рудных зон Лидинского золоторудного поля (Гайнетдинов Р.Г.)

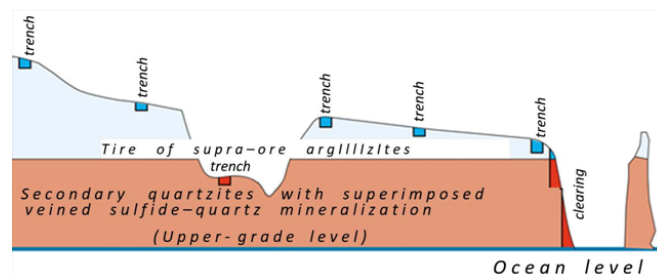


Figure 3. Schematic diagram of the structure of the ore zones of the Lidinsky gold ore field (Gaynetdinov R.G.)

¹ Кластерный анализ в Statistica. Ч. 2: Иерархическая кластеризация. URL: <http://sosninep.blogspot.com/2013/11/statistica-2> (дата обращения: 25.02.2021).

² Множественная регрессия в Statistica. URL: http://statsoft.ru/products/STATISTICA_Base/multiple-regression.php (дата обращения: 25.02.2021).

³ 13. ArcGIS10.4.1. Geostatistical Analyst. Руководство пользователя. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/10.3/guide-books/extensions/geostatistical-analyst/introduction-to-the-arcgis-geostatistical-analyst-tutorial.htm> (дата обращения: 25.02.2021).

⁴ Построение карты аномалий методом кригинга. URL: <http://geoglobesoft.blogspot.com> (дата обращения: 25.02.2021).

⁵ Краткий обзор geostatistical analyst. URL: <https://desktop.arcgis.com/ru/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/a-quick-tour-of-geostatistical-analyst.htm> (дата обращения: 25.02.2021).

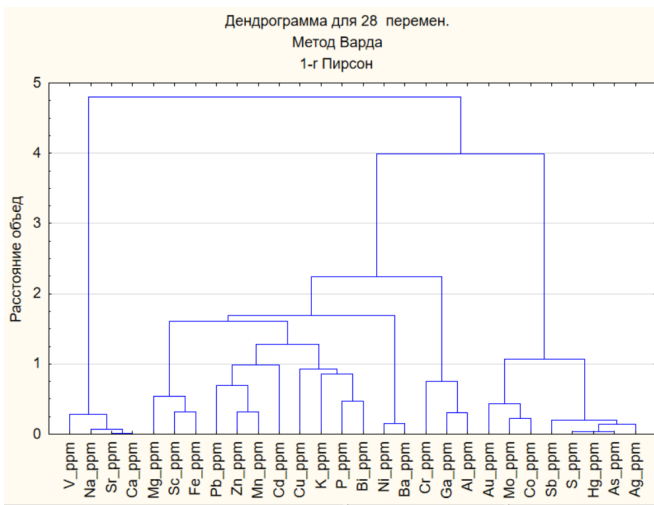


Рис. 4. Дендрограмма кластерного анализа

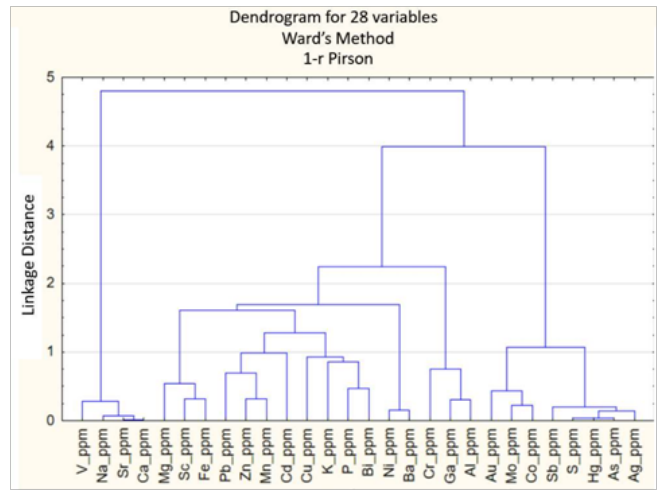


Figure 4. Cluster Analysis Dendrogram

Итоги регрессии для зависимой переменной: Au_ppm (bd_koleno в bd_ko)						
R= ,99559576 R2= ,99121092 Скоррект. R2= ,99115718						
F(7,1145)=18447, p<0,0000 Станд. ошибка оценки: ,01643						
	БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	B	Ст.Ош. B	t(1145)	p-знач.
N=1153						
Св.член			0,029327	0,001193	24,5914	0,000000
Ag_ppm	0,835778	0,018584	0,165143	0,003672	44,9741	0,000000
As_ppm	0,142282	0,021220	0,000350	0,000052	6,7052	0,000000
Co_ppm	-0,040346	0,004006	-0,001018	0,000101	-10,0704	0,000000
Hg_ppm	0,043246	0,011570	0,015798	0,004227	3,7377	0,000195
S_ppm	-0,136840	0,005475	-0,310864	0,012439	-24,9920	0,000000
Sb_ppm	0,044974	0,008864	0,002978	0,000587	5,0740	0,000000
Mo_ppm	0,010940	0,008257	0,000203	0,000153	1,3249	0,185474

Рис. 5. Итоги множественной регрессии для зависимой переменной Au

Regression Summary for Depended Variable Au_ppm (bd_koleno)						
R= ,99559576 R2= ,99121092 Adjusted R2= ,99115718						
F(7,1145)=18447, p<0,0000 Std.Error of estimate:0,1643						
	BETA	Std.Err. of BETA	B	Std.Err. of B	t(1145)	P-level
N=1153						
Intercept			0,029327	0,001193	24,5914	0,000000
Ag_ppm	0,835778	0,018584	0,165143	0,003672	44,9741	0,000000
As_ppm	0,142282	0,021220	0,000350	0,000052	6,7052	0,000000
Co_ppm	-0,040346	0,004006	-0,001018	0,000101	-10,0704	0,000000
Hg_ppm	0,043246	0,011570	0,015798	0,004227	3,7377	0,000195
S_ppm	-0,136840	0,005475	-0,310864	0,012439	-24,9920	0,000000
Sb_ppm	0,044974	0,008864	0,002978	0,000587	5,0740	0,000000
Mo_ppm	0,010940	0,008257	0,000203	0,000153	1,3249	0,185474

Figure 5. Results of multiple regression for the dependent variable Au

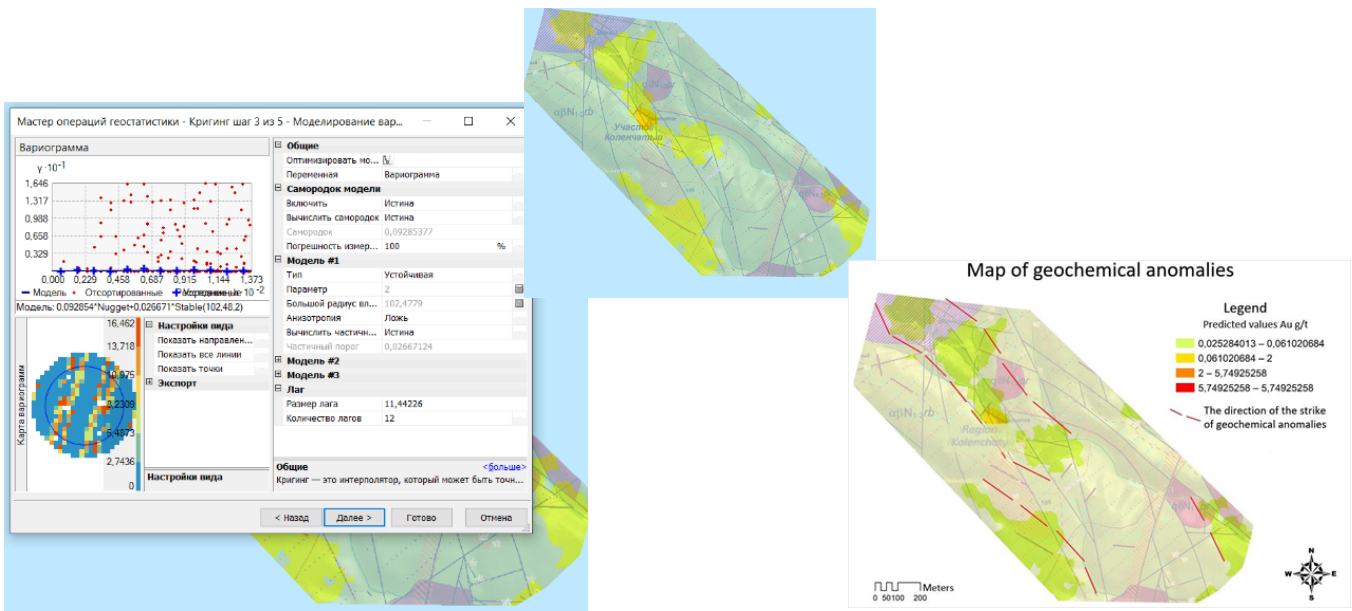


Рис. 6. Построение карты аномалий методом кригинга

Figure 6. Kriging anomaly mapping

Заклучение

Таким образом, была получена модель распределения золота на Лидинском рудном поле. Стоит отметить, что использование косвенных признаков (связь содержания элементов спутников с содержаниями золота), в данном случае, надежнее чем действительные концентрации Au в пробах, так как распределение золота крайне неравномерное. В результате исследования были выделены перспективные участки: 1-й очереди — центральная аномалия, проходящая через рудопроявление коленчатое; 2-й и 3-ей — аномалии по краям исследуемой территории. Данная модель позволит спроектировать новый этап геологоразведочных работ, включающих в себя бурение разведочных скважин, подсчет запасов и ресурсов с меньшими рисками.

Список литературы

1. Пачин А.Г., Гайнетдинов Р.Г. Прогнозно-поисковые работы на золото в пределах острова Уруп (Курильские острова). Отчет фонда ФГУГП «СахГРЭ». Ю.-Сахалинск, 2006.
2. Рудаков С.И. Отчет о результатах геологического изучения на золото и серебро Западно-Тетяевского участка Тетяевского рудного поля (Курильские острова, о. Уруп). Отчет фонда ФГУГП «СахГРЭ» по состоянию на 01.06.2008 г. Ю.-Сахалинск, 2008.
3. Кириллов В.Е., Горошков М.В. Золотоносность острова Уруп большекурильской гряды // Региональные проблемы. 2008. № 9. С. 50—55.
4. Калько И.А. Геохимические критерии выявления и прогнозирования золото-серебряного оруденения в чукотском сегменте Охотско-Чукотского вулканогенного пояса: дис. ... к.г.-м.н. М., 2009.
5. Трофимов Н.Н., Рычков А.И. Геохимические поиски рудных месторождений: учебник для вузов. М.: ПАИМС, 1984.
6. Долгаль А.С., Христенко Л.А. Результаты и перспективы геофизических исследований при поисках рудного золота на восточном склоне Кузнецкого Алатау // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. 12. С. 57—69.
7. Демьянов В.В., Савельева Е.А. Геостатистика: теория и практика. Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН / под ред. Арутюняна Р.В. М.: Наука, 2010. 327 с.
8. Бараш И.Г., Буланов В.А., Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Иванов А.В., Летникова Е.Ф., Миронов А.Г.,

Сизых А.И., Складов Е.В. Интерпретация геохимических данных. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.

9. Каневский М., Демьянов В., Савельева Е. и др. Элементарное введение в геостатистику. Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. М.: ВИНТИ, 1999. № 11. 136 с.

10. Удодов В.В. О результатах поисковых работ на золото на Тетяевском рудном поле (о.Уруп, Курильские острова) по состоянию на 01.01.2002. Промежуточный отчет. Фонды ФГУ ГП «СахГРЭ». Ю.-Сахалинск, 2002, с. 20.

11. Марков В.Е., Георгиевский А.Ф., Фролов Л.В. Применение геостатистического модуля ArcGIS для изучения геохимического поля (на примере Понпельшорского участка, Полярный Урал) // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2010. № 1. С. 24—28.

References

1. Pachin AG, Gajnetdinov R.G. *Prognozno-poiskovye raboty na zoloto v predelah ostrova Urup (Kuril'skie ostrova). Final report of FGUGP «SahGRJe» [Forecasting and prospecting for gold within the island of Urup (Kuril Islands). Report of the foundation of the FGUGP «Sahgre»]*. Y.-Sahalinsk; 2006. (In Russ.)
2. Rudakov SI. *Otchjot o rezul'tatah geologicheskogo izuchenija na zoloto i srebro Zapadno-Tetjaevskogo uchastka Tetjaevskogo rudnogo polja (Kuril'skie ostrova, o. Urup). Report of FGUGP «SahGRJe» on date 01.06.2008 [Report on the results of the geological study for gold and silver of the Zapadno-Tetyaevsky section of the Tetyaevsky ore field (Kuril Islands, Urup Island). The report of the fund of FGUGP «SAKHGRE» as of 01.06.2008]*. Y.-Sahalinsk; 2008. (In Russ.)
3. Kirillov VE, Goroshko MV. Gold of the Urup island belonging to the bolshekurilsk arc islands. *Regional'nye problem*. 2008. (In Russ.)
4. Kalko IA. *Geohimicheskie kriterii vyjavlenija i prognozirovanija zoloto-serebrjanogo orudnenija v chukotskom segmente ohotsko-chukotskogo vulkanogennogo pojasa [Geochemical criteria for identifying and predicting gold-silver mineralization in the Chukchi segment of the Okhotsk-Chukchi volcanic belt: diss. for the degree of Ph. D.-M. Sc.]*. [dissertation]. Moscow; 2009. (In Russ.)
5. Trofimov NN, Rychkov AI. *Geochemical prospecting for ore deposits [Geochemical searches of ore deposits]*. Moscow: PAIMS Publ.; 1984. (In Russ.)
6. Dolgal AS, Khristenko LA. *Rezul'taty i perspektivy geofizicheskikh issledovanij pri poiskah rudnogo zolota na vostochnom sklone Kuzneckogo Alatau [Results and*

development of geophysical researches for prospecting of ore gold into the eastern flank of Kuznetsk Ala-Tau.] *Bulletin of Kamchatka regional association «Educational-scientific center». Earth sciences.* 2008;2(12):57—69. (In Russ.)

7. Demyanov VV, Savel'eva EA. *Geostatistika: teoriya i praktika. In-t problem bezopasnogo razvitiya atomnoj energetiki RAN [Geostatistics: theory and practice.* In: Arutyunyan RV. (ed.) *Institute of Problems of Safe Development of Atomic Energy of the Russian Academy of Sciences*. Moscow: Nauka Publ.; 2010. (In Russ.)

8. Barash IG, Bulanov VA, Gladkohub DP, Donskaya TV, Ivanov AV, Letnikova EF, Mironov AG, Sizykh AI, Sklyarov EV. *Interpretaciya geohimicheskikh dannyh [Interpretation of geochemical data]*. Moscow: Intermet Engineering Publ., 2001. (In Russ.)

9. Kanevsky M, Demyanov V, Savel'eva E, et al. *Elementarnoe vvedenie v geostatistiku. Problemy okruzhayushchej*

sredy i prirodnyh resursov [Elementary introduction to geostatistics Problems of the environment and natural resources] (vol. 11). Moscow: VINITI Publ.; 1999. (In Russ.)

10. Udodov VV. *About the results of prospecting for gold at the Tetyaevsky ore field (Urup Island, Kuril Islands) as of 01.01.2002. Interim report. Funds of the FSU SE «SAKHGRE».* [O rezul'tatah poiskovyh rabot na zoloto na Tetjaevskom rudnom pole (o.Urup, Kuril'skie ostrova) on date 01.01.2002. Final report of FGUGP «SahGRJe»]. Y.-Sahalinsk; 2002. (In Russ.)

11. Markov VE, Georgievsky AF, Frolov LV. Application of the geostatistical module of ArcGIS for the study of the geochemical field (on the example of the Pohnpelshorsky site, Polar Urals). *RUDN Journal of Engineering Researches.* 2010; 1:24—28. (In Russ.)

Сведения об авторах

Панасенко Юрий Михайлович, аспирант департамента недропользования и нефтегазового дела, инженерная академия, Российский университет дружбы народов; e-mail: panasenko1997.97@mail.ru

Марков Владимир Евгеньевич, старший преподаватель департамента недропользования и нефтегазового дела, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, руководитель полевых практик студентов-геологов; eLIBRARI SPIN-код: 5882-5663; e-mail: markov_ve@pfur.ru

Карелина Елена Викторовна, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, инженерная академия, Российский университет дружбы народов, кандидат геолого-минералогических наук; Scopus Author ID: 57215413670, eLIBRARI SPIN-код: 4919-8300; e-mail: karelina_ev@pfur.ru

About the authors

Yuri M. Panasenko, Postgraduate student of the Department of Subsoil Use and Oil and Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); e-mail: panasenko1997.97@mail.ru

Vladimir E. Markov, Senior lecturer of the Department of Subsurface Use and Oil and Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University); eLIBRARI SPIN-code: 5882-5663; e-mail: markov_ve@pfur.ru

Elena V. Karelina, Associate Professor of the Department of Subsoil Use and Oil and Gas Engineering, Engineering Academy, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Candidate of Geological and Mineralogical Sciences; Scopus Author ID: 57215413670, eLIBRARI SPIN-code: 4919-8300; e-mail: karelina_ev@pfur.ru