



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

2023 Том 24 № 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1

<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 имени Патриса Лумумбы»

Главный редактор

Разумный Юрий Николаевич – доктор технических наук, профессор, директор Инженерной академии, директор департамента механики и мехатроники 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», факультет «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, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

Члены редакционной коллегии

Азравал 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 Ванвигелли», Неаполь, Италия

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

Герман Анна – профессор, Университет Бейра-Интеритор, Ковильян, Португалия

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

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

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

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

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

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

Кадугин 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

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

Матюшин Максим Михайлович – доктор технических наук, Центр управления полетами 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 А&М, Колледж-Стейшн, США

Мохамад 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, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

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

Редько Иван Яковлевич – доктор технических наук, профессор, 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

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

Ясика 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 (ежеквартально).

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.

Цель и тематика

Журнал «Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования» – периодическое международное рецензируемое научное издание в области авиационной и ракетно-космической техники, машиностроения, геологии, горного и нефтегазового дела. 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 входит в перечень изданий, публикации которых учитываются Высшей аттестационной комиссией России (ВАК РФ) при защите диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук по специальностям: 1.6.10. Геология, поиски и разведка твердых полезных ископаемых, минерагения (геолого-минералогические, технические науки); 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (геолого-минералогические науки); 1.6.19. Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия (геолого-минералогические, технические, физико-математические науки); 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки); 2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки); 2.5.4. Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки); 2.5.6. Технология машиностроения (технические науки); 2.5.11. Наземные транспортно-технологические средства и комплексы (технические науки); 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов (технические науки); 2.5.13. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов (технические науки); 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов (технические науки); 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов (технические науки); 2.5.16. Динамика, баллистика, управление движением летательных аппаратов (технические науки). Журнал адресован научным работникам, инженерам, аспирантам.

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

Редколлегия журнала строго придерживается международных стандартов публикационной этики, сформулированных в документе COPE (Committee on Publication Ethics): <http://publicationethics.org>

Редактор *Ю.А. Заикина*
Компьютерная верстка: *Ю.А. Заикина*

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 Российского университета дружбы народов. 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 12.05.2023. Выход в свет 19.05.2023. Формат 60×84/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура «Times New Roman».
Усл. печ. л. 12,09. Тираж 500 экз. Заказ № 20. Цена свободная.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»
Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6
Отпечатано в типографии ИПК РУДН им. Патриса Лумумбы
Российская Федерация, 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3
Тел.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: publishing@rudn.ru



RUDN JOURNAL OF ENGINEERING RESEARCH

2023 Volume 24 Number 1

DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1

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

Founded in 2000

Founder: Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Editor-in-Chief

Yury N. Razumny – Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Academy of Engineering, Director of the Department of Mechanics and Mechatronics of the Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

Associate Editor-in-Chief

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

Assistant to the Editor-in-Chief

Svetlana V. Agasieva – Ph.D. (Technical Sciences), Associate Professor of the Department of Nanotechnology and Microsystem Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia

Editorial Board

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

Oleg M. Alifanov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

Fabio Celani – Professor, Sapienza 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 – Dr. (Technical Sciences), Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Vladimir M. Kapustin – Dr. (Technical Sciences), Professor, National University of Oil and Gas “Gubkin University” (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), Mission Control Center (TSUP), Central Research Institute for Machine Building (TsNIMash), State Space Corporation “Roscosmos”, 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 of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 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, Dr. (Technical Sciences), Professor, Institute for Systems Analysis, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Harri A. Popov – Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. (Technical Sciences), Professor, Director of the Research Institute of Applied Mechanics and Electrodynamics, Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

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

Ivan Y. Redko – Dr. (Technical Sciences), Professor, Krzhizhanovsky 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. Vasile – 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 RESEARCH

Published by the Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba (RUDN University)

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

Publication frequency: quarterly.

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.

Aims and Scope

The RUDN Journal of Engineering Research – is a peer-reviewed international academic journal publishing research in the field of aviation and space technology, mechanical engineering, geology. 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).

Editorial Board strictly adheres to the international standards of publication ethics of the COPE: <http://publicationethics.org>

Copy Editor *Iu.A. Zaikina*
Layout Designer *Iu.A. Zaikina*

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 Research:

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 named after Patrice Lumumba
6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation

Printed at RUDN Publishing House:

3 Ordzhonikidze St, Moscow, 115419, Russian Federation
Ph.: +7 (495) 955-08-74; e-mail: publishing@rudn.ru

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Konstantinov M.S., Thant A.M. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method (Проектирование низкоэнергетических лунных перелетов, траектория которых проходит в окрестности точек либрации системы Земля – Луна. Часть 1. Теория и метод) | 7 |
| Орлов Д.А., Купреев С.А., Самусенко О.Е., Мельников В.М., Буркова И.В. Методический подход к решению проблемы автономного парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом | 17 |
| Зубарев Я.А., Синельников А.О., Мнацаканян В.У. Моделирование температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика | 30 |
| Перепелкина Ю.В., Задиранов А.Н. Иерархический подход к доказательству существования обобщенных плоских гнездовидных центральных конфигураций в некоторых вариантах общей задачи $(pn+1)$ -тел | 40 |
| Лин З.Н., Попов А.А., Сидоров В.Н., Голубина С.А. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой | 50 |
| Силима П.П., Назарова Ю.А. Влияние горнодобывающей промышленности на экономический рост в регионе Южно-Африканских стран | 57 |
| Abramov V.Yu., Esoh N.G.S. Recognition and characterization of sources rocks in well BX in the sedimentary basin of Cote d'Ivoire (Распознавание и характеристика исходных пород в скважине BX в осадочном бассейне Кот-д'Ивуара) | 76 |
| Ibrahim M.A.E., Kuleshov V.N., Kotelnikov A.E., Georgievskiy A.F., Ibrahim S.A. Geochemical features of granitic rocks using x-ray spectral fluorescence in the Miass region, Southern Ural (Геохимическая характеристика и классификация гранитов с использованием рентгеновской спектральной флуоресценции Миасского района Южного Урала) | 86 |
| Mahmoud H.A., Karelina E.V., Markov V.E., Diakonov V.V., Vikentyev I.V. Image processing for ASTER remote sensing data to map hydrothermal alteration zones in East Kazakhstan (Обработка данных дистанционного зондирования ASTER для картирования зон гидротермальных изменений в Восточном Казахстане) | 95 |

CONTENTS

| | |
|--|----|
| Konstantinov M.S., Thant A.M. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method | 7 |
| Orlov D.A., Kupreev S.A., Samusenko O.E., Melnikov V.M., Burkova I.V. A methodical approach to solving the problem of autonomous parrying of contingencies situations in spacecraft control | 17 |
| Zubarev Ya.A., Sinelnikov A.O., Mnatsakanyan V.U. Simulation of the temperature drift of the laser gyroscope path length | 30 |
| Perepelkina Yu.V., Zadiranov A.N. The hierarchical approach to proving the existence of generalized planar nested central configurations on some versions of the general $(pn+1)$ -body problem | 40 |
| Lin Z.N., Popov A.A., Sidorov V.N., Golubina S.A. Optimization of the control algorithm for a vehicle with a hybrid power plant | 50 |
| Silima P.P., Nazarova Yu.A. The impact of the mining industry on economic growth in the countries of the Southern African region | 57 |
| Abramov V.Yu., Essoh N.G.S. Recognition and characterization of sources rocks in well BX in the sedimentary basin of Cote d'Ivoire | 76 |
| Ibrahim M.A.E., Kuleshov V.N., Kotelnikov A.E., Georgievskiy A.F., Ibrahim S.A. Geochemical features of granitic rocks using x-ray spectral fluorescence in the Miass region, Southern Ural | 86 |
| Mahmoud H.A., Karelina E.V., Markov V.E., Diakonov V.V., Vikentyev I.V. Image processing for ASTER remote sensing data to map hydrothermal alteration zones in East Kazakhstan | 95 |



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-7-16
EDN: FBBFIL
UDC 629.785

Research article / Научная статья

Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method

Mikhail S. Konstantinov , Aung Myo Thant 

Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

 mkonst@bk.ru

Article history

Received: January 14, 2023
Revised: February 22, 2023
Accepted: March 4, 2023

Keywords:

weak stability boundary, low-energy trajectory, flight path, Moon, gravitational perturbations, velocity impulse

Abstract. A method for designing low-energy trajectory of transfer to the Moon with the insertion of a spacecraft into a low circumlunar orbit is proposed. The analysis of this trajectory is based on the solution of a boundary value problem for the system of differential equations of the restricted four-body problem. The trajectory of the low-energy flight passes through a region of space where the gravitational attraction of the Earth, the Moon, and the Sun tend to cancel. The trajectory turns out to be very sensitive to the initial conditions of the spacecraft motion. Difficulties arise in solving the boundary value problem. Weak stability boundary issue appears. An additional difficulty in designing the trajectory of a low-energy transfer of a spacecraft is related to the multi-extremality of the optimization problem under consideration. The authors assume that the transfer trajectory passes in the vicinity of the libration point L1 or L2 of the Earth – Moon system and introduces some restrictions on the velocity vector of the spacecraft at the moment the spacecraft passes the vicinity of the libration point. This assumption and the use of enumeration in space of the two main parameters of the transfer pattern allows to find an initial approximation for the low-energy transfer trajectory.

Acknowledgements

The study was carried out with the support of the Russian Science Foundation, project No. 21-19-00683.

For citation

Konstantinov MS, Thant AM. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):7–16. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-7-16>



Проектирование низкоэнергетических лунных перелетов, траектория которых проходит в окрестности точек либрации системы Земля – Луна. Часть 1. Теория и метод

М.С. Константинов , А.М. Тант 

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация
 mkonst@bk.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 января 2023 г.

Доработана: 22 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 4 марта 2023 г.

Ключевые слова:

низкоэнергетическая траектория, траектория полета, Луна, гравитационные возмущения, импульс скорости

Аннотация. Предложен метод проектирования низкоэнергетических перелетов к Луне с выводением космического аппарата на низкую окололунную орбиту. Анализ траектории низкоэнергетического лунного перелета основывается на решении краевой задачи для системы дифференциальных уравнений ограниченной задачи четырех тел. Траектория низкоэнергетического перелета проходит через область пространства, где гравитационное притяжение Земли, Луны и Солнца очень близки. Поэтому траектория оказывается крайне чувствительной к начальным условиям движения космического аппарата и возникает проблема при решении краевой задачи. Дополнительная трудность проектирования траектории низкоэнергетического лунного перелета связана с многоэкстремальностью рассматриваемой оптимизационной проблемы. В исследовании выдвигается предположение, что перелетная траектория проходит в окрестности точки либрации L1 или L2 системы Земля – Луна и вводятся некоторые ограничения на вектор скорости космического аппарата в момент прохождения им окрестности точки либрации. Данное предположение с использованием перебора в пространстве двух основных параметров схемы перелета позволяет найти начальное приближение для траектории низкоэнергетического перелета.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 21-19-00683.

Для цитирования

Konstantinov M.S., Thant A.M. Designing the low-energy lunar transfers trajectories which pass in the vicinity of the libration points of the Earth – Moon system. Part 1. Theory and method // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 7–16. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-7-16>

Introduction

The aim of the paper is to develop the method for designing low-energy trajectories for the flight to the Moon with the spacecraft (SC) insertion into the low Moon orbit (LMO, low circumlunar orbit). Traditional two impulses pattern for flights to the LMO require a relatively large braking impulse while the transition from the trajectory approaching the Moon to the circumlunar orbit takes place. This velocity impulse turns out to be greater than 800 m/s if the height of the LMO is 100 km. There is a possibility (primarily due to the use of solar gravitational perturbations) to reduce this velocity impulse. That is why; this type of trajectory is called as low-energy

transfer trajectory. In literature, weak stability boundary (WSB-trajectories) is often used for low-energy trajectories of lunar flights. In this paper, a method for designing low-energy flight trajectories is proposed.

Finding low-energy lunar flights can be considered as an important part of the theory of lunar flights. The development of this theory, the development of methods for designing low-energy trajectories of lunar flights, and finding the flight patterns and trajectories of such flights are the subject of research by many teams and many researchers.

It is supposed that on low-energy flight trajectories:

– there must be a section where the perturbing action of the Sun provides the approach of the SC to the vicinity of the Moon with a small value of the selenocentric velocity,

– on the trajectory of the SC approach to the circumlunar orbit, gravitational perturbations from the Earth should provide the decrease in the energy of the selenocentric motion of the SC and the “temporary capture” of the SC by the Moon (the energy constant of the selenocentric osculating orbit becomes negative over a long time interval).

At present, low-energy lunar trajectories are realities and they have been proven not only theoretically, but also practically. These projects were successfully implemented using the considered flight trajectories: the Hiten project (MUSES-A), the ARTEMIS project and the GRAIL project. The problem of analyzing low-energy trajectories to the Moon is considered in many works [1–11]. Some of these (in particular, in [1]) propose methods for finding low-energy lunar trajectories. However, despite the fact that some of the methodological ideas used in these works are very interesting, the problem cannot be considered that it had been solved. In the present work, first of all, due to the narrowing of the area of the analyzed flight trajectories, it is possible to propose an algorithm for designing the trajectories of low-energy lunar trajectories.

1. Statement of the problem for designing the low-energy lunar transfer trajectory

The problem of finding a rational pattern for the flight from the low Earth’s orbit (LEO) to the LMO is considered. The propulsion system of the SC is supposed to be chemical. In order not to tie the study to the characteristics of the used chemical propulsion system, the impulse approximation of active sites is used.

Many characteristics of LEO are considered to be known and it is considered as low circular. The orbital inclination is considered to be given. The longitude of the ascending node of the orbit (Ω) is a chosen parameter of the flight pattern. The starting point from the described orbit is also considered as a chosen parameter. It is determined by the latitude argument of the starting point (u_0) from LEO.

The target orbit of the artificial satellite of the Moon is assumed to be low circular orbit. The height of this orbit is assumed to be given. Note that the developed technique makes it possible to design launch trajectories to high circular circumlu-

nar orbits, but the energy gain from the analyzed lunar flight pattern may turn out to be less significant than for flights to a low orbit. The fact is that when launching the SC into high circumlunar orbits, it is possible to use a three-impulse-maneuvering pattern in the vicinity of the Moon. Such a flight pattern may turn out to be more profitable than the traditional single-pulse pattern when launching the SC into high circumlunar orbits.

1.1. The flight pattern of low-energy flight to the circumlunar orbit

There is no strict definition of the concept of low-energy lunar flight. These flights are based on the fundamental possibility of using a ballistic flight to the Moon, when the SC is temporarily captured by the Moon without any rocket-dynamic maneuver (without turning on the SC engine). Temporal capture is characterized by the negative energy of the osculating selenocentric orbit of the SC. That is, the eccentricity of the osculating selenocentric trajectory of the SC becomes less than one. The selenocentric osculating orbit of the SC is a highly elongated elliptical orbit.

From the point of view of the practice of lunar flight, the temporary capture trajectory itself is to be unlikely interested. For practice, the SC must be inserted into some given target orbit. It is impossible using of the SC propulsion system. Therefore, it is supposed to use a chemical propulsion system when approaching the Moon, ensures the transfer of the SC to the given circumlunar orbit. To do this, it is necessary that the height of the circumlunar orbit of the mentioned selenocentric trajectory be no more than the height of the final circumlunar orbit. Then there is a possibility to realize the deceleration impulse of the speed, which ensures the flight to the final circumlunar orbit.

The following pattern of the flight to the Moon is analyzed. The SC on the LEO is given the velocity impulse that increases the velocity of the SC without changing the direction of the velocity vector. This velocity impulse provides a transition to the highly elongated osculating geocentric orbit, the apogee radius of which is greater than the radius of the Earth’s gravity sphere. Three celestial bodies actively influence the formation of the further flight trajectory: the Earth, the Sun and the Moon. Due to the strong solar gravitational perturbation, the SC enters the vicinity of the Moon with a relatively low selenocentric velocity. Subsequently, the SC approaches the Moon and its height above the lunar

surface becomes equal to the given height of the circumlunar orbit. At this moment, the SC is given by velocity impulse, which ensures the movement of the SC along the target circumlunar orbit.

1.2. Statement of the problem for designing the flight trajectory to the circumlunar orbit

In the general case, the problem of finding a rational trajectory for the flight to the circumlunar orbit can be formulated as follows. Find the following parameters of the flight pattern: the date of start (T_{st}) at the analyzed given epoch, the longitude of the ascending node of the LEO (Ω), the latitude argument of the starting point (u_o), the magnitude of the accelerating velocity impulse at the start (ΔV_1), the flight time to the target orbit of the artificial satellite of the moon (t_p), the magnitude and direction of the braking velocity impulse at the end point of the flight trajectory to the moon (ΔV_{br}) in order to:

a) the SC perform the transport task (the SC ended up on a circumlunar trajectory of a given height) and

b) the flight required minimal energy input.

Instead of the magnitude of the accelerated velocity impulse ΔV_1 , we will consider the apogee radius of the osculating orbit, to which the SC is transferred by this velocity impulse r_a . We will call this orbit the intermediate one. The entire flight trajectory in the formulation under consideration is completely determined by the initial conditions of the SC motion when starting from LEO, that is, by the values of four characteristics: T_{st} , Ω , u_o , r_a . The conditions of motion at the end-point of the known flight trajectory depend on the flight time t_p . With this formulation of the problem, the execution of the transport task can be reduced to satisfying the following two conditions of the equality type.

1. At the end point of the flight trajectory, the SC distance from the Moon's surface must be equal to the height of the LMO H_f . That is, the magnitude of the radius vector of the SC relative to the Moon was equal to the sum of the radius of the Moon (R_{Moon}) and the height of the orbit (H_f)

$$r_{SC_Moon} = R_{Moon} + H_f. \quad (1)$$

2. The radius vector of the SC relatively to the Moon and its velocity vector to the Moon must provide a given inclination of the target circumlunar orbit. The condition can be written using the expression for the unit vector of the angular momentum vector of the selenocentric orbit in the form:

$$\frac{[\mathbf{r}_{SC_Moon} \mathbf{V}_{SC_Moon}]_z}{|\mathbf{r}_{SC_Moon} \mathbf{V}_{SC_Moon}|} = \cos(i). \quad (2)$$

In the last equality, the expression in square brackets is the cross product of the selenocentric radius of the SC and its selenocentric velocity (angular momentum vector). The subscript z denotes the projection of the angular momentum vector onto the z -axis of the selenocentric equatorial coordinate system (the Moon's axis of rotation). The denominator of the left side of the equality uses the modulus of the angular momentum vector. i on the right side of the equation is the given inclination of the plane of the target circumlunar orbit. For the often-analyzed case of a polar circumlunar orbit, the last condition takes the form $[\mathbf{r}_{SC_Moon} \mathbf{V}_{SC_Moon}]_z = 0$.

The listed two conditions must be satisfied by the choice of five parameters of the flight pattern: T_{st} , Ω , u_o , r_a , and t_p . Thus, the execution of the transport task is reduced to finding the flight pattern parameters that satisfy satisfy the two listed conditions of the equality type. It is clear that there are many solutions to a problem in which the number of unknowns is greater than the number of conditions of the equality type in the general case. We may be interested only in those solutions that require minimal energy for the flight. Two variants of the flight pattern optimization criterion are considered. In one of them, the summary velocity impulse (ΔV_{Σ} , the sum of the magnitudes of the velocity impulse departing from the Earth ΔV_1 and the breaking impulse of velocity carried out in the vicinity of the Moon when the SC is inserted into the LMO ΔV_{br}): $\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_1 + \Delta V_{br}$ is considered as the optimization criterion. In the second variant, only the velocity impulse, which is carried out in the vicinity of the Moon during the insertion of the SC into the LMO (ΔV_{br}) is considered as optimization criterion.

From the point of view of the practical implementation of the considered maneuver, the second criterion is interesting because of practical implementation of the considered maneuver better perform. The fact is that the first impulse of velocity is imparted to the SC in the LEO by the upper stage, and the margin of the characteristic velocity is quite large. In this case, a relatively small increase in the fueling of this block during the considered maneuver (a small increase in the magnitude of the first velocity impulse) leads to a strong increase in the apogee of the geocentric trajectory of the SC, which

is required to implement the trajectory of a low-energy flight to the Moon. The braking impulse of velocity in the vicinity of the Moon is performed using the SC engine itself, using the fuel of the propulsion system of the SC. That is why the expediency of using a low-energy lunar flight pattern is often proved by analyzing the possibility of reducing the decelerated impulse of velocity in the vicinity of the Moon, without paying attention to the magnitude of the velocity impulse departing from the Earth.

From the point of view of the developed methodology for designing low-energy lunar trajectories, the choice of one of the two listed criteria is unprincipled. In the process of numerical analysis, the authors used both the first and second performance indicators. For practice – example, apparently, it is natural to formulate the problem in the following way: consider the magnitude of the decelerated velocity impulse as an optimization criterion, but introduce an upper limit on the magnitude of the velocity impulse of departing from the Earth. When analyzing a specific lunar mission, it is necessary to move from the impulsive formulation to the formulation of the problem with finite thrust, while the optimization criterion is to use the inserted mass into the circumlunar orbit.

Thus, the mathematical formulation of the problem of finding patterns of low-energy flight trajectories when launching the SC into circumlunar orbits can be as follows.

Find such five parameters of the flight pattern: T_{st} , Ω , u_o , r_a , t_p , which ensure the satisfaction of the two conditions listed above (1), (2) and provide a minimum indicator of energy costs or in the form

$$\Delta V_{\Sigma} = \Delta V_{\Sigma}(T_{st}, \Omega, u_o, r_a, t_p) \rightarrow \min, \quad (3)$$

or in the form

$$\Delta V_{br} = \Delta V_{br}(T_{st}, \Omega, u_o, r_a, t_p) \rightarrow \min. \quad (4)$$

The mathematical formulation of the problem involves finding the minimum of a function of five variables when two conditions of the equality type are satisfied (constrained optimization problem).

It is possible to reformulate the problem so that the number of equality-type conditions is reduced to one condition. This is due to the possibility of choosing the velocity impulse during the transition to a LMO not as purely braking, but in an arbitrary direction. In this case, the only condition of the equality type will be the condition for the SC to

reach a point in the vicinity of the Moon with a given height (condition (1)). By choosing the velocity impulse vector $\Delta \mathbf{V}_{br}$, it is always possible to ensure the subsequent movement of the SC along a circular orbit with a given inclination, if the declination of the SC selenocentric radius vector relative to the lunar equator at the end point of the flight trajectory is less than the given inclination of the circumlunar orbit. For a typical variant of a polar circumlunar orbit, this constraint is always satisfied.

Fundamentally, a decrease in the number of satisfied equality constraints can have a favorable effect on the convergence of the iterative process of searching for a rational flight pattern and is considered as an important methodological technique.

2. Mathematical model describing the trajectory of the lunar flight

To describe the motion of the SC during its flight to the Moon, the system of differential equations of the restricted four-body problem is used. On the entire flight trajectory, the gravitational effects of the Earth, the Moon and the Sun are taken into account as material points. The position of celestial bodies is determined using the DE-406 ephemeris software. The entire trajectory is divided into geocentric and selenocentric sections. Since all gravitational forces are taken into account in both sections, the choice of the trajectory split point has practically no effect on the accuracy of the calculation. This choice is related to the technique used for finding the low-energy flight trajectory and will be explained below.

The analysis of the trajectory sections was carried out in geocentric and selenocentric coordinate systems, the main plane of which was chosen to be the plane of the ecliptic of the J2000 epoch. The axes of these coordinate systems are parallel. The trajectory sections used their own dimensionless variables.

The following system of differential equations was used to analyze the geocentric section of SC trajectory:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= -\frac{1}{r^3} x + \Phi_{Moon\ x} + \Phi_{Sun\ x}; \\ \frac{dV_y}{dt} &= -\frac{1}{r^3} y + \Phi_{Moon\ y} + \Phi_{Sun\ y}; \\ \frac{dV_z}{dt} &= -\frac{1}{r^3} z + \Phi_{Moon\ z} + \Phi_{Sun\ z}; \\ \frac{dx}{dt} &= V_x; \quad \frac{dy}{dt} = V_y; \quad \frac{dz}{dt} = V_z. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

The above differential equations use dimensionless characteristics: x, y, z are the components of the geocentric radius-vector of the spacecraft in the ecliptic coordinate system; $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ is the value of this radius vector; V_x, V_y, V_z are the components of the spacecraft geocentric inertial velocity; $\Phi_{\text{Moon}x}, \Phi_{\text{Moon}y}, \Phi_{\text{Moon}z}$ are the components of the perturbing acceleration caused by Moon; $\Phi_{\text{Sun}x}, \Phi_{\text{Sun}y}, \Phi_{\text{Sun}z}$ are the components of the perturbing acceleration caused by the Sun; t is the time.

The components of the perturbing acceleration from the Moon are:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{Moon}x} &= \mu_{\text{Moon}b} \left(\frac{x_{\text{Moon}} - x}{r_{\text{SC_Moon}}^3} - \frac{x_{\text{Moon}}}{r_{\text{Moon}}^3} \right); \\ \Phi_{\text{Moon}y} &= \mu_{\text{Moon}b} \left(\frac{y_{\text{Moon}} - y}{r_{\text{SC_Moon}}^3} - \frac{y_{\text{Moon}}}{r_{\text{Moon}}^3} \right); \\ \Phi_{\text{Moon}z} &= \mu_{\text{Moon}b} \left(\frac{z_{\text{Moon}} - z}{r_{\text{SC_Moon}}^3} - \frac{z_{\text{Moon}}}{r_{\text{Moon}}^3} \right),\end{aligned}\quad (6)$$

where $\mu_{\text{Moon}b}$ is the dimensionless gravitational constant of the Moon (ratio of the gravitational constant of the Moon to the gravitational constant of the Earth) $\mu_{\text{Earth}b} = \frac{\mu_{\text{Moon}}}{\mu_{\text{Earth}}}$; $x_{\text{Moon}}, y_{\text{Moon}}, z_{\text{Moon}}$ are components of the radius-vector of the Moon relative to the Earth; $r_{\text{Moon}} = \sqrt{x_{\text{Moon}}^2 + y_{\text{Moon}}^2 + z_{\text{Moon}}^2}$ is the value of this radius vector; $r_{\text{SC_Moon}} = \sqrt{(x - x_{\text{Moon}})^2 + (y - y_{\text{Moon}})^2 + (z - z_{\text{Moon}})^2}$ – the value of the radius-vector of the spacecraft relative to the Moon.

The components of the perturbing acceleration from the Sun are:

$$\begin{aligned}\Phi_{\text{Sun}x} &= \mu_{\text{Sun}b} \left(\frac{x_{\text{Sun}} - x}{r_{\text{SC_Sun}}^3} - \frac{x_{\text{Sun}}}{r_{\text{Sun}}^3} \right); \\ \Phi_{\text{Sun}y} &= \mu_{\text{Sun}b} \left(\frac{y_{\text{Sun}} - y}{r_{\text{SC_Sun}}^3} - \frac{y_{\text{Sun}}}{r_{\text{Sun}}^3} \right); \\ \Phi_{\text{Sun}z} &= \mu_{\text{Sun}b} \left(\frac{z_{\text{Sun}} - z}{r_{\text{SC_Sun}}^3} - \frac{z_{\text{Sun}}}{r_{\text{Sun}}^3} \right),\end{aligned}\quad (7)$$

where $\mu_{\text{Sun}b}$ is the dimensionless gravitational constant of the Sun (ratio of the gravitational constant of the Sun to the gravitational constant of the Earth

$\mu_{\text{Sun}b} = \frac{\mu_{\text{Sun}}}{\mu_{\text{Earth}}}$); $x_{\text{Sun}}, y_{\text{Sun}}, z_{\text{Sun}}$ are the components of

the radius-vector of the Sun relative to the Earth;

$r_{\text{Sun}} = \sqrt{x_{\text{Sun}}^2 + y_{\text{Sun}}^2 + z_{\text{Sun}}^2}$ is the value of this radius

vector; $r_{\text{SC_Sun}} = \sqrt{(x - x_{\text{Sun}})^2 + (y - y_{\text{Sun}})^2 + (z - z_{\text{Sun}})^2}$ is the value of the SC radius-vector relative to the Sun.

The motion on the selenocentric section of the trajectory is analyzed using a system similar to the shown system of differential equations (5). In this case, the Moon is considered as the central body, and the Earth and the Sun are the perturbing ones.

3. Methodical ideas of the developed method for designing low-energy lunar flights

The general idea of reducing the energy costs for the flight is associated with the possibility of using gravitational disturbances in the limited four-body problem (Earth-Moon-Sun-SC) during the flight to the Moon. First of all, the flight trajectory must be chosen so that solar gravitational perturbations ensure the SC approach to the vicinity of the Moon with a small value of selenocentric velocity. Therefore, like many researchers, the authors of this article tried to estimate gravitational solar perturbations as a function of the relative position of the Sun at the time of launch of the SC and the elements of the geocentric osculating orbit, to which the SC is transferred when starting from the LEO. Unfortunately, our attempts did not give a positive result. We believe there are two reasons for this:

- the fact is that the solar perturbations are very large. Therefore, the use of a technique that allows estimating perturbations as quadrature of functions depending on the elements of the unperturbed orbit turns out to be incorrect;

- simultaneously with the gravitational solar perturbations, the geocentric trajectory is also strongly perturbed by the Moon. There is a superposition (interference) of solar and lunar disturbances. This makes it difficult to estimate solar disturbances.

An attempt to consider the formulated problem as a mathematical programming problem and use local methods to find its solution is doomed to failure. The reason is a very large number of local extre-

mums. The number of local extremums is so large that it is difficult to expect that search methods focused on finding a global extremum (for example, genetic algorithms) will cope with solving the problem without choosing a good initial approximation. In addition, the main idea of the proposed method is to find this initial approximation, significantly narrowing the range of possible solutions.

3.1. Constriction the class of considered transfer trajectories. Introduction of the conditions for the SC to fly a vicinity of the libration point of the Earth-Moon system

The paper proposes to consider only such patterns of flight to the Moon, the trajectories of which pass through the vicinity of the libration points L1 or L2 of the Earth-Moon system. More precisely, we analyze such flight trajectories that can be obtained using as an initial approximation the trajectories passing through the vicinity of these libration points. The authors do not claim that low-energy trajectories necessarily pass through the neighborhood of libration points, but it is precisely such flights that are unsearching in the present work.

In this paper, it is assumed that the trajectory of the SC does not just pass in the vicinity of the libration point, but some restrictions are introduced on the magnitude and direction of the SC velocity vector at this moment of time. It is considered that the SC geocentric velocity vector at the moment of passage of the libration point is such that the following two conditions are satisfied: the perigee radius and the apogee radius of the osculating geocentric orbit of the SC are close to the perigee and apogee radius of the geocentric osculating orbit of the libration point.

The introduction of such restrictions can be explained as follows. It follows from the Jacobi integral of the restricted three-body problem (Earth – Moon – SC) that, within the framework of this problem, the SC can “penetrate” into the vicinity of the Moon through the vicinity of the libration point. In this case, the SC geocentric velocity vector should be close to the geocentric velocity vector of the libration point. In principle, it was possible to choose another variant when restrictions were introduced both on the distance of the SC to the libration point and on the components of the velocity vector. The authors of the article were stopped by the fact that then

(with the approach used by the authors) it would be necessary to compare values of different dimensions (distance and speed). Therefore, the described option was chosen. It analyzes (minimizes) the sum of three positive values of the same dimension (three distances):

$$J = \Delta r_L + |r_{SCp} - r_{Lp}| + |r_{SCa} - r_{La}|, \quad (8)$$

where the first term Δr_L is the SC distance from the libration point (it is found as the difference between the geocentric vectors of the SC and the libration point); r_{SCp} and r_{SCa} – radius of perigee and apogee of the osculating geocentric orbit of the SC; r_{Lp} and r_{La} – perigee and apogee radius of the osculating geocentric orbit of the libration point.

Note that in some cases it may be appropriate not to use modules in the expression of the introduced functional J . To do this, we can change the functional using the squares of each of the terms.

The terms of the functional J depend on the four parameters of the flight pattern T_{st}, Ω, u_o, r_a , which determine the conditions for the motion of the SC after its launch from LEO, and the current time of motion of the SC $t: J(T_{st}, \Omega, u_o, r_a, t)$. On each flight trajectory, there is a time t_l when J is minimal. Let us denote this minimum value as I and call it the total miss of the libration point:

$$I(T_{st}, \Omega, u_o, r_a) = \min_t J(T_{st}, \Omega, u_o, r_a, t), \quad (9)$$

The total miss I is a function of four arguments. Finding the initial approximation for these arguments is proposed to be performed as follows. In order to minimize the angle between the plane of the intermediate orbit and the plane of the Moon's orbit, the longitude of the ascending angle of the LEO is assumed to be equal to the longitude of the ascending angle of the Moon's orbit. The analysis shows that the longitude of the ascending node of the Moon's orbit (relative to the Earth's equator) varies in a relatively small range from -13.4° to $+13.4^\circ$ with a period of 18.6 years. For 2024, the longitude of the ascending node of the Moon's orbit changes from 3.77° to 0.137° . Therefore, it is acceptable to consider the initial approximation for the chosen pa-

parameter of the lunar flight pattern Ω for the launch dates in 2024 as zero. Let us also pay attention to the fact that with such a choice of the longitude of the ascending node of the LEO, the angle between the ecliptic plane and the plane of the intermediate orbit turns out to be minimal. This leads to an increase in the perturbation of the intermediate geocentric orbit of the SC by solar gravitational acceleration.

We suppose that the gravitational solar acceleration should deform the trajectory of the SC when it moves as far as possible from the Earth (at the apogee of the intermediate orbit). In order for this deformation to be significant, we considered it expedient to choose the initial approximation for the argument of the latitude of the starting point from LEO u_o so that the starting point is located near the ecliptic plane. Therefore, the argument of the latitude of the starting point from the LEO, counted from the line of nodes of the LEO relative to the plane of the ecliptic, must be equal to either zero or 180° . It is these values that are considered as initial approximations for this latitude argument. In this case, if the longitude of the ascending node of the intermediate orbit is zero, then the arguments of the latitude of the starting point, counted relative to the plane of the earth's equator, will be the same (0° and 180°). If the longitude of the ascending node of the intermediate orbit is chosen equal to 3.77° , then the value of the latitude argument will be greater than these values by 3.168° .

3.2. Use of direct enumeration of two parameters of the flight pattern to find the areas of their values that ensure the satisfaction of the conditions for passing the libration point

A serious problem in the design of lunar flight patterns is multi-extremality. Therefore, an attempt to use an approach that uses the methods of finding a local extremum, as a rule, is not successful. The solution does not provide a zero residual value of the boundary conditions. The search process in a local minimum that is significantly different from zero.

To overcome these difficulties, it is ideal to enumerate all the parameters of the flight pattern in space (with a small step for each parameter), to find such sets of parameters in which the transport problem is solved with relatively good accuracy (there will be a finite small number of such sets). Then refine the values of the parameters of each received set using local methods. A modern computer is not able to im-

plement such an approach. To overcome the described difficulty, it is proposed to use following approach.

Of the four parameters that determine the transfer trajectory (start date T_{st} , radius of the intermediate orbit apogee r_a , longitude of the ascending node of the LEO Ω , argument of the latitude of the launch point u_o), two are selected, the rational values of which are difficult to foresee. These parameters are T_{st} and r_a . For these parameters, a complete enumeration of their values from the possible range is carried out. The start date T_{st} varies throughout the analyzed range of dates (for example, the annual range) with a fairly small step (for example, one hour). The apogee radius of the intermediate orbit r_a varies in the range of 1–1.5 million km with a step of 5 thousand km. For each point of the parameter plane $T_{st} - r_a$ with fixed values of the other two parameters chosen from rational considerations, the SC trajectory is analyzed and the value of the total miss of the libration point I is calculated: At the same time, the time t_1 of the maximum approach of the SC to the libration point is also found.

An analysis of the level lines of the total miss of the libration point on the plane $T_{st} - r_a$ makes it possible to find such launch dates and radii of the apogee of the intermediate geocentric orbit, at which the SC can reach the vicinity of the considered libration point and, at the same time, the SC velocity vector has such a magnitude and direction that the shape and size of the osculating geocentric orbit of the SC are close to the shape and size of the osculating geocentric orbit of the libration point. It is these trajectories that are considered as the initial approximation for low-energy transfer trajectories.

The date of reaching the minimum total miss of the libration point t_1 is considered as the boundary point of the geocentric and selenocentric sections of the trajectory.

At further stages of the analysis, a transition is made to the formulation, where the total miss of the libration point is not analyzed, the achieved height above the lunar surface is considered as an indicator of the solution of the transport problem. The required-height is ensured with the use of local search methods.

At the final stage of the analysis, when it is possible to achieve a given height of the SC above the lunar surface, the gradient projection method is used, which makes it possible to iteratively improve the parameters of the flight pattern (according to

the criterion of fuel consumption), while remaining on the trajectory that transfers the SC to a LMO of a given height.

3.3. Introduction to the consideration of the intermediate velocity impulse – a methodological technique in the design of low-energy lunar trajectories

When designing low-energy lunar flights, a methodological technique was used related to the introduction of an intermediate velocity impulse on the flight trajectory (ΔV_c) into the flight pattern. The idea was to make it easier to solve the boundary value problem (satisfying the conditions of the transport problem). With the introduction of an intermediate velocity impulse, the dimension of the vector of the selected parameters of the flight pattern is increased by four units at once: (date of the velocity impulse, its magnitude and direction, characterized by two angles). In this case, the class of possible flight trajectories is greatly expanded, and the solution of the boundary value problem is simplified. When introducing an intermediate velocity impulse, it was assumed that in the final solution, its value would be reduced to very small (infinitely small) values, and this introduction was considered as a methodological technique. In the course of the analysis, it is possible to consider as a low-energy flight such flights on which the intermediate impulse of velocity is not infinitely small, but simply small (for example, equal to 20–30 m/s), and the sum of this impulse ΔV_c and the braking impulse at the Moon is less velocity impulse of traditional direct flights.

The initial approximation for the date of the intermediate velocity impulse is the date of reaching the trajectory point with the minimum total miss of the libration point.

Conclusion

The statement considered in this paper does not analyze the problem of optimizing the number of velocity pulses on the trajectory of a low-energy flight to the Moon. This problem is expected to be analyzed in the future. One of the possible research methods is to use the necessary optimality conditions of the maximum principle for the impulse flight trajectory.

It can also be noted that in further studies, we do not exclude the possibility of introducing an additional term into the J -function (8), will en-

sure, at the time of the passage of the vicinity of the libration point, the proximity of the plane of the geocentric osculating orbit of the SC to the plane of the geocentric orbit of the Moon.

In the second part of this work, the developed algorithm for designing a low-energy trajectory for a flight to the Moon will be described. The results of a numerical analysis of the obtained trajectories will be presented.

References

1. Parker JS, Anderson RL. *Low-energy lunar trajectory design*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.; 2014. <https://doi.org/10.1002/9781118855065>
2. McCarthy BP, Howell KC. Cislunar transfer design exploiting periodic and quasi-periodic orbital structures in the four-body problem. *71st International Astronautical Congress, The CyberSpace Edition, October 12–14, 2020*. Paris; 2020.
3. Scheuerle ST, McCarthy BP, Howell KC. Construction of ballistic lunar transfers leveraging dynamical systems techniques. *AAS/AIAA Astrodynamics Specialist Conference, Lake Tahoe, California (Virtual), August 9–12, 2020*. South Lake Tahoe, California; 2021.
4. McCarthy BP, Howell KC. Trajectory design using quasi-periodic orbits in the multi-body problem. *Proceedings of the 29th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting, 2019*. Maui; 2019.
5. Ivashkin VV. On the Earth-to-Moon trajectories with temporary capture of a particle by the moon. *54th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, September 29 – October 3, 2003*. Paper IAC-03-A.P.01. <https://doi.org/10.2514/6.IAC-03-A.P.01>
6. Ivashkin VV. Low energy trajectories for the Moon-to-Earth space flight. *Journal of Earth System Science*. 2005;114:613–618. <https://doi.org/10.1007/BF02715945>
7. Belbruno EA, Carrico JP. Calculation of weak stability boundary ballistic lunar transfer trajectories. *Proceedings of the AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, August 14–17, 2000, Denver, Colorado*. Paper AIAA 2000-4142. <https://doi.org/10.2514/6.2000-4142>
8. Belbruno EA, Miller JK. Sun-perturbed Earth-to-Moon transfers with ballistic capture. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*. 1993;16(4):770–774. <https://doi.org/10.2514/3.21079>
9. Koon WS, Lo MW, Marsden JE, Ross SD. Low energy transfers to the Moon. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2001;81(1):63–73. <https://doi.org/10.1023/A:1013359120468>
10. Miller JK. Lunar transfer trajectory design and four body problem. *13th AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting at Ponce, Puerto Rico, 2003*. American Astronomical Society, American Institute of Aeronautics and Astronautics; 2003.
11. Miller JK, Hintz GR. Weak stability boundary and trajectory design. *Spaceflight Mechanics*. Conference paper AAS 15-297. Williamsburgh, VA; 2015.

About the authors

Mikhail S. Konstantinov, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Space Systems and Rocket Science Department, Aerospace Institute, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4, Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0138-6190, Scopus Author ID: 55396771600, eLIBRARY SPIN-code: 3030-7494; mkonst@bk.ru

Aung Myo Thant, PhD student, Space Systems and Rocket Science Department, Aerospace Institute, Moscow Aviation Institute (National Research University), 4 Volokolamskoye Shosse, Moscow, 125993, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-1159-3292; aungmyothant4696@gmail.com

Сведения об авторах

Константинов Михаил Сергеевич, доктор технических наук, профессор кафедры космических систем и ракетостроения, Аэрокосмический институт, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; ORCID: 0000-0002-0138-6190, Scopus Author ID: 55396771600, eLIBRARY SPIN-код: 3030-7494; mkonst@bk.ru

Тант Аунг Мьо, аспирант, кафедра космических систем и ракетостроения, Аэрокосмический институт, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Российская Федерация, 125993, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4; ORCID: 0009-0000-1159-3292; aungmyothant4696@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29

EDN: FERBGZ

УДК 629.782

Научная статья / Research article

Методический подход к решению проблемы автономного парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом

Д.А. Орлов^a , С.А. Купреев^a , О.Е. Самусенко^a , В.М. Мельников^a , И.В. Буркова^b 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bИнститут проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

 orlov-da@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 17 ноября 2022 г.

Доработана: 27 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 2 марта 2023 г.

Ключевые слова:

автономное управление, идентификация полетных ситуаций, нештатные полетные ситуации, принятие решений, бортовая аппаратура

Аннотация. В рамках основных тенденции развития мировой космической деятельности – расширение состава околоземных орбитальных группировок космических аппаратов, активизация исследования планет и тел Солнечной системы, повышение требований к качеству и надежности осуществления космических экспедиций – на первый план выдвигается проблема развития и усовершенствования методики оптимального управления, системного анализа, поддержки принятия решений в целях проектирования высокоэффективных систем управления космических аппаратов. К этим исследованиям относится формирование методических подходов к изучению оптимального управления аппаратами при их движении в атмосферах планет, автономному управлению космическим аппаратом в условиях неопределенности полетных ситуаций и др. Проблемным вопросом проектирования экспедиций дальнего космоса является организация эффективного управления космическим аппаратом при значительной его удаленности от наземных станций. При этом безальтернативное условие успешного осуществления программ полета – это разработка и применение автономных систем управления космического аппарата, основанных на использовании высокоэффективных технологий сбора и обработки измерительной информации, что предопределяет необходимость совершенствования методов и алгоритмов автономного принятия решений по управлению космическим аппаратом. Разработан новый методический подход к структурному построению автономных систем управления космического аппарата, основанный на созданных технологиях идентификации полетных ситуаций: обработка проводимых измерений; формирование логических решающих правил; прогнозирование траекторий полета и работоспособности бортовой аппаратуры. Приведена формальная постановка задачи автономного принятия решений по управлению космическим аппаратом.

Для цитирования

Орлов Д.А., Купреев С.А., Самусенко О.Е., Мельников В.М., Буркова И.В. Методический подход к решению проблемы автономного парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 17–29. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29>



A methodical approach to solving the problem of autonomous parrying of contingencies situations in spacecraft control

Dmitry A. Orlov^a  , Sergei A. Kupreev^a , Oleg E. Samusenko^a ,
Vitaly M. Melnikov^a , Irina V. Burkova^b 

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bInstitute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

 orlov-da@rudn.ru

Article history

Received: November 17, 2022

Revised: February 27, 2023

Accepted: March 2, 2023

Keywords:

autonomous control, identification of flight situations, decision making, onboard equipment

Abstract. As part of the main trends in the development of world space activities – expanding the composition of near-Earth orbital constellations of spacecraft, intensifying the study of planets and bodies of the solar system, increasing the requirements for the quality and reliability of space expeditions – the problem of developing and improving the methodology of optimal control, system analysis, decision support to design highly efficient spacecraft control systems is brought to the fore. These studies include the formation of methodological approaches to the study of the optimal control of spacecraft during their movement in the atmospheres of planets, the autonomous control of a spacecraft under conditions of uncertain flight situations, etc. The problematic issues of designing deep space expeditions include the organization of effective control of the spacecraft with its considerable distance from ground stations. At the same time, an uncontested condition for the successful implementation of flight programs is the development and application of autonomous spacecraft control systems based on the use of highly efficient technologies for collecting and processing measurement information. This determines the need to improve the methods and algorithms of autonomous decision-making on the spacecraft control. The authors develop a new methodological approach to the structural construction of autonomous spacecraft control systems based on the created technologies for identifying flight situations: processing measurements; forming logical decision rules; forecasting flight trajectories and on-board equipment operability. A formal statement of the problem of autonomous decision-making on spacecraft control is provided.

For citation

Orlov DA, Kupreev SA, Samusenko OE, Melnikov VM, Burkova IV. A methodical approach to solving the problem of autonomous parrying of contingencies situations in spacecraft control. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):17–29. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-17-29>

Введение

В активизации исследования дальнего космоса [1–4] существенно повышаются требования к проектированию космических экспедиций. Приобретает большую значимость проблема обеспечения высокого уровня надежности эксплуатации создаваемых дорогостоящих изделий космической техники, так как срыв программ полета ведет к огромным потерям финансовых и технических ресурсов. Кроме того, в связи с прогнозируемой высокой интенсивностью изменения динамики полета космического аппарата (КА) при реализации экспедиций дальнего космоса, осо-

бенно при движении аппаратов в атмосферах планет, возрастает вероятность возникновения нештатных ситуаций и повышаются требования к оперативному их устранению.

Характерной особенностью проектирования космических экспедиций является необходимость учета влияния на процесс управления множества разноплановых факторов, связанных как со спецификой построения управляемых объектов, так и с условиями их полета. Так, при возникновении признаков нарушения работоспособности бортовой аппаратуры необходима разработка и применение алгоритмов парирования неисправностей [5–7].

Анализ существующей литературы позволил установить наличие значительного числа работ по вопросам принятия решений по управлению космическим аппаратом, проблеме создания и применения автономных систем в различных сферах научно-практической деятельности, в том числе при управлении космическими аппаратами [8–18]. Вместе с тем показано отсутствие методического подхода к решению задач автономного парирования нештатных ситуаций. На первый план выдвигается проблема создания новых и развития существующих методов и алгоритмов управления перспективными космическими аппаратами. Это даст возможность проектировать высокоэффективные системы управления, позволит значительно повысить качество и надежность реализации космических экспедиций.

Однако эти работы в основном направлены на исследование отдельных вопросов проектирования и функционирования систем управления. Так, в [13] описывается система, обеспечивающая парирования нештатных ситуаций при управлении космическим аппаратом Deep Space One. В [8–10; 13] исследуются вопросы выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций при диагностике работоспособности бортовой аппаратуры космического аппарата, в [11; 12] описываются различные варианты базы знаний. Вместе с тем в существующих материалах недостаточно освещены вопросы построения систем управления, обеспечивающих основные операции процесса принятия решений: от анализа влияния системных связей на процесс управления и прогноза возникновения нештатных ситуаций до исполнения корректирующих программ.

В настоящем исследовании основное внимание уделяется разработке методического подхода к структурному построению системы автономного управления космическими аппаратами, которая будет в дальнейшем использоваться для построения оптимального управления и принятия автономных решений в задачах проектирования систем управления космического аппарата.

1. Анализ особенностей методического подхода к решению проблемы автономного управления космическими аппаратами

Исключительно важной представляется проблема организации автономного управления космическими аппаратами, необходимость решения которой может быть обусловлена различ-

ными обстоятельствами, в первую очередь нарушением работоспособности бортовой аппаратуры, а также возможными неопределенностями текущих полетных ситуаций. В этих условиях только оперативное принятие правильных решений по управлению космическим аппаратом может предотвратить развитие негативных тенденций динамики движения космических аппаратов и обеспечить необходимые условия качественного выполнения научных экспериментов и программ полета. Высокий уровень оперативности принятия решений по управлению космическим аппаратом достигается за счет разработки адаптивных алгоритмов идентификации полетных ситуаций и формирования логических решающих правил.

Данная проблема наиболее трудноразрешима при управлении аппаратами дальнего космоса, предназначенными для изучения планет Солнечной системы и припланетного пространства. Основные отличия функционирования космических дальнего космоса аппаратов от аппаратов ближнего космоса заключаются, во-первых, в их большой удаленности от наземных пунктов управления, что существенно снижает быстродействие информационного обмена и принятия решений, и, во-вторых, в существующей в настоящем времени неточности знания характеристик околопланетного пространства, в первую очередь параметров атмосфер исследуемых планет.

Таким образом, проблема обеспечения оперативного автономного управления является актуальной при проектировании экспедиций дальнего космоса.

Очевидно, что для эффективного автономного управления космического аппарата должна быть обеспечена возможность решения взаимосвязанных между собой следующих основных задач:

- проведение оперативной идентификации текущих полетных ситуаций с помощью бортовых средств и алгоритмов, что является особенно важным при управлении космическим аппаратом с высокой динамикой изменения параметров движения, например при полете аппарата на участках аэродинамического торможения или при проведении ракетодинамических маневров;
- автоматизированная выработка рекомендаций по формированию программ управления с использованием предварительно разработанной и

содержащейся в базе знаний бортовой системы управления совокупности взаимосвязанных решающих правил с учетом полученных результатов идентификации текущих полетных ситуаций и граничных условий полета космического аппарата;

– оценка правильности вырабатываемых рекомендаций путем анализа результатов прогнозирования динамики изменения параметров движения космического аппарата на последующих участках полета.

Анализируя особенности перечисленных задач, следует отметить, что необходимым условием и вместе с тем основной трудностью их решения в бортовом исполнении является создание высокоэффективных логических решающих правил, охватывающих максимально возможные случаи возникающих полетных ситуаций, применяемых для парирования негативных тенденций и корректировки траекторий движения космического аппарата в практически любых складывающихся текущих условиях.

Принцип, по которому формируются решающие правила, составляющие основу базы знаний, заключается в их структурном построении: каждое правило из существующего множества описывается в формате – «если S_k , то U_j », где S_k – установленное состояние объекта, U_j – управляющее воздействие на объект, соответствующее состоянию космического аппарата в текущий момент времени [19–23]. В определенных условиях при таком структурном построении базы знаний и организации рационального процесса выбора необходимых правил из общей совокупности может быть достигнут желаемый результат управления объектом. Применяемый принцип формирования логических решающих правил является наиболее простым в реализации и вместе с тем эффективным для процессов эволюции объектов с ограниченным числом возможных состояний и достаточно хорошо прогнозируемыми полетными ситуациями космических аппаратов. В частности, разработанные таким образом решающие правила успешно использовались при парировании нештатных ситуаций в работе бортовых систем, достаточно часто возникающих при управлении орбитальными космическими аппаратами. В этих случаях составленные командные воздействия направлены в основном не на коррекцию орбитальных параметров движения аппарата, а на выбор рациональных режимов управления бортовой аппаратуры.

Тем не менее для достаточно широкого класса задач управления космическим аппаратом с высокой динамикой изменения полетных ситуаций указанный принцип построения решающих правил не всегда позволяет выбрать правильные решения по управлению космическим аппаратом. Наиболее характерным примером таких задач является управление космическим аппаратом в атмосфере в условиях неточности знания ее параметров. Например, при решении задач посадки космического аппарата на поверхность планет возможные неопределенности в значениях плотности атмосфер ρ могут привести к существенному изменению качественного характера траекторий полета по сравнению с номинальными. Так, при входе космического аппарата в атмосферу вблизи верхней границы физически реализуемого коридора даже небольшое уменьшение плотности ρ приводит к вылету аппарата из атмосферы, а при входе космического аппарата в окрестности нижней границы увеличение плотности ρ является причиной превышения максимальных величин перегрузки и температуры сверх допустимых значений. В этих случаях возможные отклонения значений плотности атмосферы ρ от заранее прогнозируемых (что может привести к срыву выполнения задач космической миссии) существенно влияют на корректирующие программы управления аэродинамическими силами, обеспечивающими перевод космического аппарата в номинальный режим полета. Стоит отметить, что для одинаковых отклонений $\delta\rho$ при разных значениях скорости V , высоты h , угла наклона вектора скорости к местному горизонту θ и курсового ε углов полета космического аппарата корректирующие управляющие воздействия могут сильно различаться, так как вариации возможных полетных ситуаций носят широкий характер. Полетные ситуации связываются логическими операциями типа «если S_k , то U_j », а также практической невозможностью их полного учета в виде формализованных решающих правил по указанному принципу. При динамично меняющихся полетных ситуациях задача определения правильных функций управления усложняется чрезвычайно высокой чувствительностью характера траектории движения космического аппарата от подаваемых командных воздействий. Например, неправильное по времени изменение (несколько секунд) аэродинамического качества с одного граничного значения на другое может привести к вылету аппарата из атмосферы и срыву программы посадки

космического аппарата в заданную область поверхности планеты.

Поэтому в условиях высокой интенсивности изменения параметров движения космического аппарата представляется целесообразным составление логических решающих правил по принципу функциональных аналитических (а не логических) зависимостей управляющих воздействий от характеристик текущего и прогнозируемого состояний управляемого объекта. При этом быстрое изменение полетных ситуаций вызывает необходимость применения решений по управлению космическим аппаратом в масштабе времени, близком к реальному, что вызывает повышенные требования к разработке расчетных аналитических зависимостей с целью обеспечения адекватного моделирования динамики полета космического аппарата.

В формализованном виде расчетные соотношения должны выглядеть следующим образом:

$$U_j = f(\xi_k, S_k, S_{k+1}), \quad (1)$$

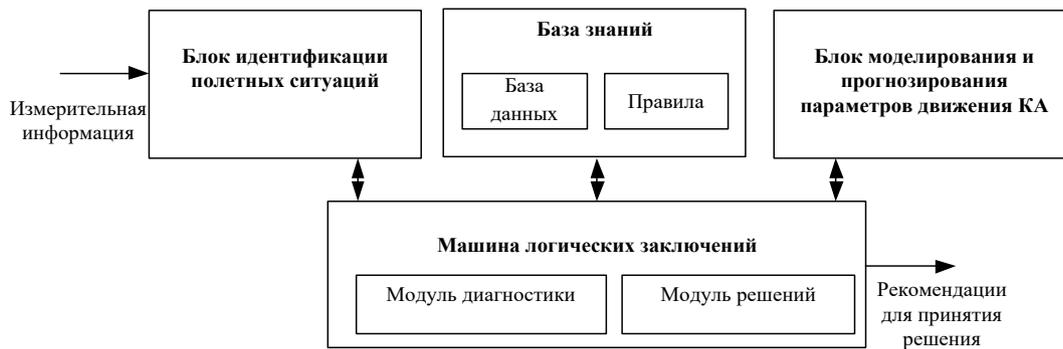
где ξ_k – отклонения характеристик текущего состояния объекта от номинального; S_{k+1} – номинальное состояние объекта на следующий интервал времени.

С помощью выражения (1) определяются управляющие воздействия на объект U_j в зависимости от идентификационных возмущенных текущих состояний, а также от требуемых прогнозируемых состояний.

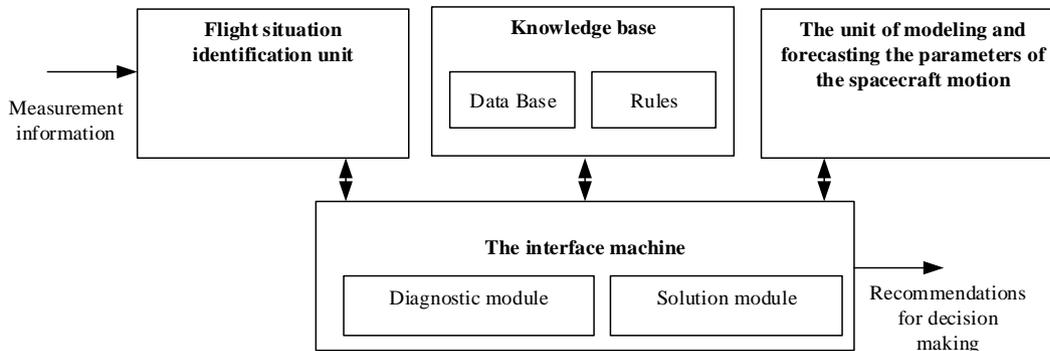
2. Методический подход к структурному построению системы автономного управления космическими аппаратами

Разработанная структура построения автономной системы управления КА содержит блоки, представленные на рисунке.

Исходя из рисунка видно, что в разработанной структуре построения автономной системы управления вводятся новые элементы – блок идентификации полетных ситуаций и блок моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата. В традиционных автономных структурах такие элементы, как базы знаний и машины логических заключений, уже существуют. Дадим описание принципов функционирования как отдельных структурных блоков системы, так и их взаимодействия.



Структурное построение автономной системы управления



Structural construction of an autonomous control system

Блок идентификации полетных ситуаций позволяет регулировать работу измерительной бортовой аппаратуры в процессе получения необходимой информации. В зависимости от целевого назначения космического аппарата применяется различный состав бортовых измерительных средств: датчики угловых скоростей, звездные датчики, оптические датчики, инфракрасные вертикали, гироскопические системы, датчики плотности атмосферы и т. д. С помощью аппаратуры блока определяется вектор состояния космического аппарата и его бортовой аппаратуры за счет обработки и преобразования измерительной информации. В результате обеспечивается возможность реализации качественно новых технологий автономной идентификации полетных ситуаций. Так, при реализации миссий дальнего космоса с применением аппаратно-программных средств блока определяются скоростные перегрузки и проводится анализ роста кажущейся скорости космического аппарата в атмосфере V_s . По интенсивности нарастания величины V_s определяются отклонение расчетных значений плотности атмосферы от номинальных, крутизна траекторий спуска, высота полета космического аппарата и необходимость корректировки траекторий движения аппарата. Получаемая с помощью данного блока информация является исходной для формирования технологических циклов принятия автономных решений по управлению космическим аппаратом и поступает на координирующий блок автономной системы – машину логических заключений, на котором во взаимодействии с базой знаний обеспечивается выработка необходимых логических решающих правил.

Для формирования *базы знаний* создается совокупность логических решающих правил, определяющих логическую связь между идентифицированными полетными ситуациями космического аппарата и выработкой программ управления, обеспечивающих оперативную корректировку параметров движения аппарата и состояний бортовой аппаратуры. В базу знаний входит и база данных – совокупность данных, где информация может быть представлена в двух основных параметрах, представляющих собой множество событий S в виде объектов O , атрибутов A и их значений. Например: в качестве события может выступать значения углов рыскания, крена или тангажа в системе управле-

ния движением космического аппарата. Атрибутом является управляющий угол, значение – определенное значение в градусах, а объектом может выступать система управления движением U . В базе данных содержатся аналитические зависимости между измеряемыми параметрами, характеризующими текущие положения космического аппарата (например, кажущаяся скорость V_s), и векторы состояния управляемого объекта.

Логические решающие правила связаны между собой в виде «если S , то U » и формируются исходя из анализа известных нештатных ситуаций, которые описываются в эксплуатационной документации на отдельно взятый космический аппарат. Диапазон логических решающих правил зависит:

- от формирования новых программ управления, которые не предусмотрены в эксплуатационной документации;

- имитации различных нештатных ситуаций и выработки различных программ управления.

В этих двух случаях происходит расширение логических решающих правил $S(U)$ в условиях детерминированной модели состояний космического аппарата.

Существуют неопределенные полетные ситуации, для которых нельзя заранее скорректировать программу управления. Например, при вариации плотности атмосферы из-за вспышек на Солнце условия полета космического аппарата могут отличаться от номинальных до 50 % по значительному числу параметров: крутизне траектории, изменению высоты полета, скорости полета и т. д. Для этих случаев логические решающие правила выражаются в виде конечных аналитических или логических зависимостей, позволяющих определять командные воздействия на систему, соответствующие текущим полетным ситуациям, выполняемые в определенной последовательности. На различных этапах программы полета в процессе информационного взаимодействия базы знаний с машиной логических заключений решающие правила могут добавляться и совершенствоваться в зависимости от идентификации вновь возникающих полетных ситуаций. Для осуществления эффективного автономного управления необходимо стремиться к созданию совокупности решающих правил, охватывающей максимально возможные полетные ситуации, что дает возможность наиболее

рационального выполнения целевых функций космических миссий.

Машина логических заключений осуществляет ряд важных функций по взаимодействию с другими блоками системы автономного управления космического аппарата. Машина логических заключений состоит из модуля диагностики текущих состояний космического аппарата и модуля поиска решений по управлению космическим аппаратом. При помощи модуля диагностики текущих состояний на основе измерительной информации осуществляется сравнение реальных состояний аппарата с номинальными. После сравнения определяются отклонения текущих координат движения космического аппарата и нештатно работающие звенья бортовой аппаратуры. В результате выявленной информации модуль диагностики формирует логические заключения о необходимости корректирующих воздействий для штатного функционирования космического аппарата. В случае штатной работы бортовой аппаратуры формируются логические заключения при отсутствии выправляющих воздействий для корректировки состояния космического аппарата. Модуль поиска решений по управлению космическим аппаратом на основании информации, содержащейся в базе знаний, реализует многоитерационный поиск нужных комбинаций решающих правил, направленных на восстановление штатного режима полета космического аппарата. После этого реализуется информационный обмен между машиной логических заключений и блоком моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата. В блок моделирования передается информация о рекомендуемых программах управления, составленных в виде последовательности логических решающих правил. Из этого блока в машину логических заключений поступают данные о прогнозировании траекторий движения космического аппарата в случае отработки сформированных корректирующих программ, и при удовлетворительных результатах прогнозирования принимается окончательное заключение об исполнении разработанных программ управления.

Блок моделирования и прогнозирования обеспечивает выполнение заключительной стадии формирования решений по управлению космическим аппаратом. Результаты прогноза параметров движения КА после реализации рекомендо-

ванных командных воздействий сравниваются с эталонными, соответствующими номинальным режимам полета и содержащимися в бортовом компьютере блока. Применительно к рассмотрению наиболее динамичных этапов миссий дальнего космоса – движению космического аппарата в атмосфере, учитывая высокий уровень неопределенностей полетных ситуаций, обуславливаемых как возможными погрешностями работы бортовых систем, так и неточностью знаний параметров атмосферы, представляется практически невозможным обеспечение высокоточного совпадения прогнозируемых и номинальных траекторных параметров. В этих условиях предпочтительным является выбор решений по управлению космическим аппаратом, соответствующих не столько наименьшим отклонениям сравниваемых параметров, сколько реализации качественных тенденций изменения характера траекторий полета, например изменение крутизны траекторий движения, интенсивности гашения скорости космического аппарата и др.

Блок выполняет также важные функции при парировании нештатных ситуаций, вызванных нарушением работоспособности бортовой аппаратуры космического аппарата. Технология его работы и структуры построения заключается в следующем. В оперативной памяти бортовой системы хранятся данные о параметрах бортовых систем (состав и функциональные режимы), телеметрическая информация о состоянии бортовой аппаратуры космического аппарата (номинальные и допустимые значения телеметрических параметров) и предполагаемые к выдаче на борт КА программы управления (включая ограничения на последовательность выдачи команд и временные интервалы между командами).

Номинальное состояние бортовых систем зависит от режимов выдаваемых командных воздействий, которые определяет блок моделирования и прогнозирования. При этом данный блок выполняет моделирование функционирования бортовых систем при отсутствии ошибок в управлении, случайных возмущающих факторов и неисправностей в работе аппаратуры, как бы имитируя идеальное функционирование бортовых систем. В результате этих процедур при помощи блока моделирования и прогнозирования получается последовательность «эталонных» значений телеметрических параметров в процес-

се имитации подаваемых на борт космического аппарата командных воздействий $U(t)$.

С целью диагностики работоспособности бортовой аппаратуры в процессе полета космического аппарата проводится детальный сравнительный анализ эталонных вариантов телеметрических параметров с реальными, получаемыми в сеансах связи с космическим аппаратом и с помощью проводимых измерений. Это позволяет определить те элементы, которые являются причиной нарушения нормального функционирования бортовой системы, таким образом можно предотвратить негативную тенденцию в работе бортовой аппаратуры и заранее парировать нештатную ситуацию (или вовсе ее избежать). Например, быстрый разряд химической батареи или уменьшение мощности входных сигналов при передаче информации с борта космического аппарата на командно-измерительную станцию. При оценке работоспособности бортовой аппаратуры определяются интервал времени ее нормальной работы без использования корректирующих управляющих воздействий и причины негативных тенденций. Также выявляется взаимосвязь процессов, при которой работа одного процесса влечет за собой изменение другого процесса, в том числе и в негативную сторону.

В результате проведенных оценочных процедур работоспособности бортовой аппаратуры дается объективная оценка ее работы с предполагаемой динамикой развития процессов на борту космического аппарата и прогнозируется время нормальной работы элементов аппаратуры, выявляются «проблемные» звенья в бортовых системах космического аппарата.

Подводя итог, можно заключить, что предлагаемый методический подход для обеспечения принятия решений в процессе автономного управления космическими аппаратами позволит провести идентификацию прогнозируемых состояний работоспособности бортовых систем, которая выражается в выявлении или отсутствии отклонений контролируемых параметров от номинальных значений. Проведен детальный анализ работоспособности отдельных блоков, входящих в состав бортовой системы, в результате чего определяются те элементы, которые являются причиной отклонений реальных состояний бортовой аппаратуры от номинальных. Приведены методические обоснования структурного построения системы автономного управления и

принципы формирования логических решающих правил, а также выработки решений по управлению космическим аппаратом. В рамках предложенной структуры при рациональном взаимодействии структурных элементов системы автоматического управления принципиально может быть обеспечена выработка рекомендаций по принятию решений в различных полетных ситуациях: при восстановлении работоспособности бортовой аппаратуры; выявлении опасных сближений космического аппарата с фрагментами техногенного происхождения; полете космического аппарата в атмосферах в условиях неопределенности их параметров и др.

3. Формальная постановка задачи

Для безопасного целевого функционирования космического аппарата его бортовая система должна выполнять следующие функции:

- восстанавливать работоспособность бортовой аппаратуры после парирования неисправности при автономном функционировании космического аппарата;

- на основе управляющих воздействий корректировать траектории полета космического аппарата при отклонении траектории его движения от номинальной, а также отдельные параметры;

- моделировать прогноз движения с целью выявления признаков возникновения негативных тенденций и вырабатывать решения по управлению космическим аппаратом для их устранения и др.

Приведем формальную постановку исследуемой задачи для предлагаемого подхода к принятию автономных решений по управлению космическим аппаратом и введем следующие обозначения:

$X_p = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n\}$ – вектор текущего состояния космического аппарата в текущий момент времени. Значения x_i представляют собой траекторные параметры движения космического аппарата, параметры состояния отдельных элементов бортовых систем, данные об околоземном пространстве и т. д., то есть являются реальными или текущими параметрами движения космического аппарата;

$X_n = \{x_1, x_2, \dots, x_k, \dots, x_n\}$ – вектор значений параметров x_k при штатной работе космического аппарата на прогнозируемый интервал времени;

$x_{k\min}, x_{k\max}$ – минимально и максимально допустимые значения k -го параметра;

$S_k(u)$ – логические решающие правила, устанавливающие логические или функциональные соотношения между событиями S , характеризующие состояния космического аппарата и его бортовой аппаратуры, зависящие от управляющих воздействий и полетных ситуаций;

$J = \sum_{k=1}^n a_k (x_{kp} - x_{kp})^2$ – критерий оптимальности, характеризующий различие между реальными и прогнозируемыми (номинальными) векторами X_p и X_n ;

a_k – весовые коэффициенты, устанавливающие приоритетность каждого из компонент вектора целей.

Для формулировки задачи принятия решений по управлению космическим аппаратом положим, что при сравнении реального вектора текущего состояния космического аппарата X_p , идентифицируемого на основе получаемой телеметрической информации и обработанных изменений бортовой аппаратурой данных, с соответствующим вектором прогнозируемого (желаемого) состояния X_n выявляются отклонения компонент $x_k = x_{kp} - x_{kp}$ и устанавливается факт наличия или отсутствия нештатных ситуаций и признаков возникновения негативных тенденций функционирования космического аппарата.

Из общей совокупности параметров $x_k (i = 1, 2, \dots, n)$ осуществляется выборка тех значений параметров, для которых справедливы неравенства $x_{kp} > 0,8x_{k\max}$ и $x_{kp} < 1,2x_{k\min}$, и с их учетом формируется критерий оптимальности J .

Из всей совокупности параметров x_k , логические решающие правила $S_k(u)$ определяют такую программу управления, при которой обеспечивается минимум функционала J на последующем временном интервале $\Delta t = t_{k+1} - t_k$. Правильность выбора программ подтверждается путем оценки результатов прогнозирования параметров движения космического аппарата, полученных после подачи командных воздействий.

Исходя из постановки задачи система управления космическим аппаратом должна обеспечивать выполнение следующих функций:

– определение таких полетных ситуаций, при которых выявляются признаки отклонения текущих параметров траекторий от прогнозируемых;

– выработка предложений по принятию решений по управлению космическим аппаратом и

подача необходимых корректирующих воздействий для устранения нештатных ситуаций;

– имитация траекторий движения космического аппарата с целью отработки правильности принятия решений по управлению космическим аппаратом.

Анализ возможных полетных ситуаций, влияющих на содержание и оперативность выработки управляющих решений, позволяет «группировать» состояние системы исходя из статуса состояния системы в текущий момент времени:

– «штатные ситуации»: характеризующие работоспособность космического аппарата параметры x_{ip} находятся в допустимых пределах и в допустимом диапазоне значений $1,2x_{k\min} < x_{kp} < 0,8x_{k\max}$;

– «опасные ситуации»: характеризующие работоспособность космического аппарата параметры x_{ip} находятся в допустимых пределах, но достаточно близко к граничным значениям $x_{kp} < 1,2x_{k\min}, x_{ip} > 0,8x_{k\max}$;

– «аварийные ситуации»: часть параметров x_{kp} , характеризующих работоспособность космического аппарата, вышла за пределы допустимых значений $x_{kp} < x_{k\min}, x_{kp} > x_{k\max}$.

Состояние системы можно сгруппировать по оперативности принятия решений и определить исходя из двух вариантов:

– «без резерва времени» – ситуации, требующие выработки и реализации решений по управлению космическим аппаратом с помощью командных воздействий немедленного исполнения. К таким случаям относятся практически все *аварийные ситуации*, а также *опасные ситуации* с высоким уровнем динамики нарастания негативных тенденций;

– «с резервом времени» – ситуации, предполагающие выработку наилучшей из допустимых стратегий, направленных на перемещение параметров x_k от границ допустимых значений. К ним относятся практически все *опасные ситуации*.

Решение формализованной постановки задачи предполагает необходимость в разработке новых методических подходов к построению алгоритмов автономного управления космическим аппаратом. В основу этих подходов положены оригинальные технологии рационального выполнения операций управления, методы аналитического моделирования траекторий полета аппаратов ближнего и дальнего космоса.

Формализованная постановка задачи базируется на методическом подходе к структурному построению системы автономного управления космическим аппаратом, основанной на оригинальных принципах элементной декомпозиции структурного состава, выявлении областей рационального применения отдельных элементов, интеграции их взаимодействия в обеспечение принятия эффективных решений по управлению космическим аппаратом.

Заключение

Разработаны методические принципы формирования автономного управления, заключающиеся: 1) в обеспечении идентификации полетных ситуаций бортовыми средствами в условиях ограниченных возможностей наземного контура управления; 2) формировании логических решающих правил, направленных на обеспечение максимального охвата возможных полетных ситуаций в процессе реализации космических миссий; 3) оперативной выработке решений по управлению космическим аппаратом; 4) обязательном проведении оценки корректности выработанных корректирующих программ путем прогнозирования параметров движения космического аппарата и работоспособности бортовой аппаратуры после исполнения управляющих воздействий.

Предложен и обоснован методический подход к новому структурному построению системы автономного управления космическим аппаратом. Новизной структурного построения является то, что наряду с использованием традиционных блоков (базы знаний и машины логических заключений) вводятся новые элементы – блок идентификации полетных ситуаций и блок моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата. Блок идентификации полетных ситуаций выполняет функции регулирования работы измерительной аппаратуры с целью оперативного получения и обработки необходимой информации для выявления первичных признаков отклонения состояний космического аппарата и функционирования бортовых систем от номинальных режимов. База знаний включает в себя базу данных и решающие правила, определяющие логические соотношения между идентифицированными полетными ситуациями и действиями, направленными на достижение эффективного управления космиче-

ским аппаратом. Машина логических заключений во взаимодействии с другими блоками системы вырабатывает рекомендации по принятию решений по управлению космическим аппаратом. Блок моделирования и прогнозирования параметров движения космического аппарата является контролирующим элементом системы, определяющим правильность рекомендуемых программ управления.

Приведена формальная постановка задачи автономного принятия решений по управлению космическим аппаратом. Путем сравнения реального вектора текущего состояния космического аппарата X_p , идентифицируемого на основе получаемой телеметрической информации и обработанных измеренных данных, с соответствующим вектором прогнозируемого (номинального) состояния $X_{п}$ выявляются отклонения компонентов $x_k = x_{kp} - x_{kп}$ и устанавливается факт наличия или отсутствия нештатных ситуаций и признаков возникновения негативных тенденций функционирования космического аппарата. Из общей последовательности параметров $x_k (i = 1, 2, \dots, n)$ осуществляется выборка тех составляющих, отклонения которых превышают допустимые значения и с их учетом формируется критерий достижения целевых функций J . Из всей совокупности логических решающих правил $S_k(u)$ составляется такая программа управления, при которой обеспечивается минимум функционала J на последующем временном интервале $\Delta t = t_{i+1} - t_i$. Правильность выбора программ подтверждается путем оценки результатов прогнозирования параметров движения космического аппарата, полученных после подачи командных воздействий.

Список литературы

1. Ботанов А.Ф., Воронцов В.А., Графодатский О.С., Иванов М.А., Крайнов А.М., Лемешевский С.А., Маров М.Я., Хаханов Ю.А. Перспективы исследования атмосферы и поверхности Марса, Венеры, Луны с помощью мобильных средств // К.Э. Циолковский. Проблемы и будущее российской науки и техники: материалы 52-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2017. С. 35–37.
2. Хартов В.В., Можина Н.В., Кудрявцев Ю.Е., Прокопенко О.Е., Михайлов В.М., Райкунов К.Г. Сотрудничество АО «ЦНИИмаш» и АО «НПО Лавочкина» при реализации проекта по исследованию Марса «Экзомарс» //

Вестник НПО имени С.А. Лавочкина. 2022. № 2 (56). С. 57–64. <https://www.doi.org/10.26162/LS.2022.56.2.005>

3. Яковлева Д.М. Проектирование автоматической межпланетной станции для исследования Венеры // Гагаринские чтения – 2020: сборник тезисов докладов. М., 2020. С. 735–736.

4. Шеремет А.А., Воронцов В.А. Проектный облик вертолета для исследования планеты Венера в составе спускаемого аппарата в проекте «Венера-Д» // Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов: в 4 томах. Т. 2. М., 2021. С. 250–252.

5. Мишурова А.В., Донсков А.В., Васильева П.Н. Парирование нештатных ситуаций при управлении полетом пилотируемых космических аппаратов // Идеи К.Э. Циолковского в инновациях науки и техники: материалы 51-х Научных чтений памяти К.Э. Циолковского. Калуга, 2016. С. 124.

6. Соловьев С.В. Нештатные ситуации в космической технике и принципы их парирования // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. 2021. № 2. С. 97–103. <https://www.doi.org/10.37882/2223-2966.2021.02.28>

7. Беляева Е.К., Муртазин Р.Ф. Парирование нештатных ситуаций при полете на полярную окололунную орбиту // XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов: в 4 т. Т. 3. М., 2021. С. 13–14.

8. Шульгин В.А. Нечеткая логическая модель в системе автоматического управления технологическим процессом // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: материалы I Всероссийской научной конференции. Тольятти, 2017. С. 353–360.

9. Подиновская О.В., Подиновский В.В. Анализ иерархических многокритериальных задач принятия решений методами теории важности критериев // Проблемы управления. 2014. № 6. С. 2–8.

10. Смоленцева Т.Е., Сумин В.И., Ирхин В.П., Шатовкин Р.Р. Обоснование архитектуры системы управления на основе иерархических многоуровневых систем // Вестник Воронежского института ФСИН России. 2017. № 3. С. 142–147.

11. Титов Н.А., Макрушин С.В. Технология создания доменной базы знаний вопрос-ответной системы на основе крупномасштабной универсальной базы знаний // Computational Nanotechnology. 2022. Т. 9. № 1. С. 115–124.

12. Борисов А.Н. Построение интеллектуальных систем, основанных на знаниях, с повторным использованием компонентов // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем. 2014. № 4. С. 97–102.

13. Williams B.C., Pandurang Nayak P. A reactive planner for a model-based execution // IJCAI'97: Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, California, 1997. Vol. 2. Pp. 1178–1185.

14. Поспелов Г.С., Эрлих. А.И., Солодов В.М., Вен В.Л. Проблемы программно-целевого планирования и управления. М.: Наука. 1981. С. 29.

15. Куликовский Р. Оптимальные и адаптивные процессы в системах автоматического регулирования. М.: Наука, 1967. 379 с.

16. Лебедев А.А., Чернобровкин Л.С. Динамика полета беспилотных летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1972. 615 с.

17. Красильщиков М.Н., Серебряков Г.Г. Управление и наведение беспилотных маневренных летательных аппаратов на основе современных информационных технологий. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 280 с.

18. Макарова И.М., Лохина В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 375 с.

19. Aarup M., Arentoft M.M., Parrod Y., Stader J., Stokes I. OPTIMUM-AIV: a knowledge-based planning and scheduling system for spacecraft AIV // Knowledge Based Scheduling / ed. by M. Fox, M. Zweben. San Mateo, California: Morgan Kaufmann, 1994. Pp. 451–469.

20. Соколов Н.Л. Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций // Успехи современного естествознания. 2007. № 6. С. 16–20.

21. Лебедева Т.Г., Осипов Г.С. Архитектура и управляемость дискретных автоматических систем, основанных на знаниях // Известия Российской академии наук: теория и системы управления. 2000. № 5. С. 703–709.

22. Осипов Г.С., Жилыкова Л.Ю., Виноградов А.Н. Динамические интеллектуальные системы. Представление знаний и основные алгоритмы // Моделирование целенаправленного поведения. Известия Российской академии наук: теория и системы управления. 2002. № 6. С. 119–127.

23. Bocharov L.A., Sokolov N.L., Udalo V.A. Organization of an intellectual searching to support vehicles control // Second International Conference on Soft Computing and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control. Turkey, 2003. Pp. 172–175.

References

1. Botanov AF, Vorontsov VA, Grafodatsky OS, Ivanov MA, Krainov AM, Lemeshevsky SA, Marov MYa, Khakhanov YuA. Prospects for studying the atmosphere and surface of Mars, Venus, and the Moon using mobile devices. *K.E. Tsiolkovsky. Problems and the Future of Russian Science and Technology: Materials of 52 Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky*. Kaluga; 2017. p. 35–37. (In Russ.)
2. Khartov VV, Mozhina NV, Kudryavtsev YuE, Prokopenko OE, Mikhailov VM, Raikunov KG. Cooperation between JSC “TSNIIMASH” and “Lavochkin Association”, JSC in the implementation of the exomars Mars exploration project. *Vestnik NPO Imeni S.A. Lavochkina*. 2022;(2):57–64. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.26162/LS.2022.56.2.005>
3. Yakovleva DM. Designing an automatic interplanetary station for the study of Venus. *Gagarin Readings – 2020: Collection of Abstracts*. Moscow; 2020. p. 735–736. (In Russ.)
4. Sheremet AA, Vorontsov VA. Conceptual design of the helicopter dedicated for Venus exploration as a part of “Venera-D” descent vehicle. *Academic Readings on Astronautics Dedicated to the Memory of S.P. Korolev and Other Outstanding Domestic Scientists – Pioneers of Space Exploration: Collection of Abstracts* (vol. 2). Moscow; 2021. p. 250–252. (In Russ.)
5. Mishurova AV, Donskov AV, Vasileva PN. Parrying emergency situations when controlling the flight of manned spacecraft. *Ideas K.E. Tsiolkovsky in Innovations in Science and Technology: Materials of the 51st Scientific Readings in Memory of K.E. Tsiolkovsky*. Kaluga; 2016. p. 124. (In Russ.)
6. Soloviev SV. Emergency situations in space technology and the principles of their parry. *Modern Science: Actual Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2021;(2):97–103. (In Russ.) <https://www.doi.org/10.37882/2223-2966.2021.02.28>
7. Belyaeva EK, Murtazin RF. Parrying emergency situations during a flight to a polar circumlunar orbit. *XLV Academic Readings on Astronautics Dedicated to the Memory of Academician S.P. Korolev and Other Outstanding Domestic Scientists – Pioneers of Space Exploration: Collection of Abstracts* (vol. 3). Moscow; 2021. p. 13–14. (In Russ.)
8. Shulgin VA. Fuzzy logical model in automatic control system of technological process. *Proceedings of the I All-Russian Scientific Conference*. Togliatti; 2017. p. 353–360. (In Russ.)
9. Podinovskaya OV, Podinovskiy VV. Analysis of hierarchical multicriteria decision-making problems by methods of criteria importance theory. *Control Sciences*. 2014;(6):2–8. (In Russ.)
10. Smolentseva TE, Sumin VI, Irkhin VP, Shatovkin RR. Justification of the architecture of the control system based on hierarchical multi-level systems. *Bulletin of the Voronezh Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia*. 2017;(3):142–147.
11. Titov NA, Makrushin SV. Technology for creating a domain knowledge base of a question-answer system based on a large-scale universal knowledge base. *Computational Nanotechnology*. 2022;9(1):115–124. (In Russ.)
12. Borisov AN. Ontology-based intelligent system construction through component reuse. *Systems Open Semantic Technologies for Intelligent Systems*. 2014;(4):97–102. (In Russ.)
13. Williams BC, Pandurang Nayak P. A reactive planner for a model-based execution. *IJCAI'97: Proceedings of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence* (vol. 2). Menlo Park, California; 1997. p. 1178–1185.
14. Pospelov GS, Erlikh AI, Solodov VM, Ven VL. *Problems of program-targeted planning and management*. Moscow: Nauka Publ.; 1981. (In Russ.)
15. Kulikovskiy R. *Optimal and adaptive processes in automatic control systems*. Moscow: Nauka Publ.; 1967. (In Russ.)
16. Lebedev AA, Chernobrovkin LS. *Flight dynamics of unmanned aerial vehicles*. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1972. (In Russ.)
17. Krasilshchikov MN, Serebryakov GG. *Control and guidance of unmanned maneuverable aircraft based on modern information technologies*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2003. (In Russ.)
18. Makarova IM, Lokhina VM. *Intelligent automatic control systems*. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2001. (In Russ.)
19. Aarup M, Arentoft MM, Parrod Y, Stader J, Stokes I. OPTIMUM-AIV: a knowledge-based planning and scheduling system for spacecraft AIV. In: Fox M, Zweben M. (eds.) *Knowledge Based Scheduling*. San Mateo, California: Morgan Kaufmann; 1994. p. 451–469.
20. Sokolov NL. The basic principles of diagnostics of the operability of the onboard equipment of automatic spacecraft and the development of recommendations for the elimination of emergency situations. *Successes of Modern Natural Science*. 2007;(6):16–20. (In Russ.)
21. Lebedeva TG, Osipov GS. Architecture and controllability of discrete automatic systems based on knowledge. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences: Theory and Control Systems*. 2000;(5):703–709. (In Russ.)
22. Osipov GS, Zhilyakova LYu, Vinogradov AN. Dynamic intelligent systems. Knowledge representation and basic algorithms. *Modeling of Purposeful Behavior. Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems*. 2002;(6):119–127. (In Russ.)
23. Bocharov LA, Sokolov NL, Udaloj VA. Organization of an intellectual searching to support vehicles control. *Second International Conference on Soft Computing and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control*. Turkey; 2003. p. 172–175.

Сведения об авторах

Орлов Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2733-4479, Scopus Author ID: 57193905914, eLIBRARY SPIN-код: 5313-6772; orlov-da@rudn.ru

Купреев Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8657-2282, Scopus Author ID: 57201885865, eLIBRARY SPIN-код: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

Самусенко Олег Евгеньевич, кандидат технических наук, директор департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-код: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Мельников Виталий Михайлович, академик Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского и Международной академии информатизации, доктор технических наук, профессор департамента механики и процессов управления, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru

Буркова Ирина Владимировна, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова, Российская академия наук, Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 65; ORCID: 0000-0002-4671-0847, eLIBRARY SPIN-код: 8047-7930; irbur27@gmail.com

About the authors

Dmitry A. Orlov, Ph.D of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2733-4479, Scopus Author ID: 57193905914, eLIBRARY SPIN-code: 57193905914; orlov-da@rudn.ru

Sergei A. Kupreev, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8657-2282, e-LIBRARY SPIN-code: 2287-2902; kupreev-sa@rudn.ru

Oleg E. Samusenko, Ph.D of Technical Sciences, Head of the Department of Innovation Management in Industries, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-8350-9384, eLIBRARY SPIN-code: 6613-5152; samusenko@rudn.ru

Vitaly M. Melnikov, Academician of the K.E. Tsiolkovsky Russian Academy of Cosmonautics and International Academy of Informatization, Doctor of Sciences (Techn.), Professor of the Department of Mechanics and Control Processes, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2114-7891, Scopus Author ID: 16646368100, eLIBRARY AuthorID: 185305; vitalymelnikov45@yandex.ru

Irina V. Burkova, Doctor of Sciences (Techn.), leading researcher, Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, 65 Profsoyuznaya St, Moscow, 117997, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4671-0847, eLIBRARY SPIN-code: 8047-7930; irbur27@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-30-39

EDN: DSOCIG

УДК 629.7.054.07

Научная статья / Research article

Моделирование температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика

Я.А. Зубарев^a, А.О. Синельников^b, В.У. Мнацаканян^c

^aНаучно-исследовательский институт «Полус» имени М.Ф. Стельмаха, Москва, Российская Федерация

^bГосударственный научно-исследовательский институт приборостроения, Москва, Российская Федерация

^cНациональный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва, Российская Федерация

✉ mr.sinelnikov.a@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 28 декабря 2022 г.

Доработана: 21 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 26 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

кольцевой лазер, компьютерное моделирование, оптический ситалл, амплитуда частотной подставки, MATLAB, термокомпенсация

Аннотация. Представлены результаты моделирования температурного дрейфа периметра резонатора лазерного гироскопического датчика на базе кольцевого гелий-неонового лазера с круговой поляризацией излучения и магнитооптической частотной подставкой на эффекте Зеемана при помощи математического пакета MATLAB. Разработанный и реализованный в среде MATLAB алгоритм позволяет моделировать температурные деформации периметра зеемановского лазерного гироскопического датчика при изменении конфигурации его конструктивных элементов. В результате можно оценить качество поставляемого материала для изготовления резонатора кольцевого лазера, а также совокупный вклад конструктивных элементов в результирующий дрейф периметра зеемановского гироскопического датчика. Полученная модель является аналитическим инструментом дополнительного контроля качества оптического ситалла СО-115М, из которого изготавливается резонатор, и оптимизации конструкции зеемановского лазерного гироскопического датчика как локально, так и комплексно. Это необходимо для повышения эффективности стабилизации периметра кольцевого лазера в диапазоне рабочих температур с помощью активной системы регулировки периметра и пассивной термокомпенсации путем подбора конструктивных элементов с противоположными по знаку температурными коэффициентами линейного расширения. Использование разработанной модели в производстве лазерных гироскопов дает возможность осуществлять подбор конструктивных элементов зеемановского гироскопического датчика, что существенно увеличивает время его непрерывной работы в одномодовом режиме в широком температурном диапазоне при сохранении требуемой точности для систем ориентации, стабилизации и навигации различных летательных аппаратов.

Для цитирования

Зубарев Я.А., Синельников А.О., Мнацаканян В.У. Моделирование температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 30–39. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-30-39>



Simulation of the temperature drift of the laser gyroscope path length

Yaroslav A. Zubarev^a , Anton O. Sinelnikov^b  , Victoria U. Mnatsakanyan^c 

^aPolyus Research Institute of M.F. Stelmakh, Moscow, Russian Federation

^bState Research Institute of Instrument Engineering, Moscow, Russian Federation

^cNational Research Technological University "MISIS"; Moscow, Russian Federation

✉ mr.sinelnikov.a@mail.ru

Article history

Received: December 28, 2022

Revised: February 21, 2023

Accepted: February 26, 2023

Keywords:

ring laser, computer simulation, optical glass-ceramic, frequency bias amplitude, MATLAB, thermal compensation

Abstract. The authors present the results of modeling the temperature drift of the resonator path length of a laser gyroscope based on a ring helium-neon laser with circular polarization of radiation and a magneto-optical frequency bias based on the Zeeman effect using the MATLAB mathematical package. The algorithm developed and implemented in the MATLAB environment makes it possible to simulate temperature deformations of the path length of a Zeeman laser gyroscope when the configuration of its structural elements changes. This allows to evaluate the quality of the supplied material for the manufacture of the ring laser resonator, as well as to evaluate the total contribution of structural elements to the resulting drift of the perimeter of the Zeeman gyroscope. The model obtained in the work is an analytical tool for additional quality control of the optical glass-ceramic SO-115M, from which the resonator is made, and optimization of the design of the Zeeman laser gyroscope, both locally and comprehensively. This is necessary to increase the efficiency of ring laser perimeter stabilization in the operating temperature range using an active perimeter adjustment system and passive thermal compensation by selecting structural elements with opposite temperature coefficients of linear expansion. The use of the developed model in the production of laser gyroscopes permits to select the structural elements of the Zeeman gyroscope, which significantly increases the time of its continuous operation in a single-mode in a wide temperature range while maintaining the re-quired accuracy for the orientation, stabilization and navigation systems of various aircraft.

For citation

Zubarev YaA, Sinelnikov AO, Mnatsakanyan VU. Simulation of the temperature drift of the laser gyroscope path length. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):30–39. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-30-39>

Введение

Гироскопические датчики [1] на основе кольцевых лазеров (КЛ) [2; 3] являются чувствительными элементами высокоточных систем ориентации [4], стабилизации и навигации различных летательных аппаратов [5; 6]. Стабильность эксплуатационных характеристик данных систем обеспечивается устойчивостью датчиков к внешним температурным воздействиям [7].

Благодаря отсутствию подвижных деталей и узлов лазерные гироскопические датчики с магнитооптической частотной подставкой (ЧП) [3] являются наиболее устойчивыми к жестким эксплуатационным условиям. К данному классу приборов относятся зеэмановские лазерные датчики [8]. Для обеспечения стабильности периметра кольцевого лазера зеэмановского датчика

в широком диапазоне температур используются методы пассивной и активной термокомпенсации [9; 10].

К пассивным методам относится использование материалов с минимальным температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР) [11]. В зеэмановских датчиках таким материалом является ситалл марки СО-115М производства Лыткаринского завода оптических стекол [12]. Недостатком ситалла является нелинейный характер ТКЛР в диапазоне рабочих температур датчика [13; 14]. Это существенно ограничивает диапазон работы активной системы регулировки периметра (СРП) [15; 16].

В процессе работы зеэмановского датчика возникает дрейф периметра КЛ, вызванный разогревом его резонатора и изменением внешней

температуры [17; 18]. При этом в конструкции зеемановского датчика присутствуют элементы, имеющие отличные от ситалла ТКЛР [19], поэтому задача моделирования температурного дрейфа периметра датчика является актуальной.

В различной степени эта проблема свойственна всем лазерным гироскопическим датчикам и для ее решения активно применяются методы математического моделирования [20; 21] и температурной коррекции [22–24].

Цель исследования – разработка алгоритма в среде MATLAB, с помощью которого возможно моделировать температурный дрейф периметра резонатора зеемановских лазерных датчиков угловой скорости.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- 1) получение исходных данных для моделирования;
- 2) разработка модели температурного дрейфа периметра лазерного гироскопического датчика;
- 3) реализация модели в среде MATLAB.

1. Принцип работы и особенности конструкции зеемановского гироскопического датчика

На рис. 1 представлен резонатор зеемановского датчика, образованный четырьмя зеркалами, закрепленными на корпусе методом оптического контакта.

На двух подвижных зеркалах резонатора установлены пьезокорректоры, обеспечивающие работу СРП. Через полупрозрачное зеркало на смесительный узел выводится часть излучения для формирования выходных сигналов и получения информации о вращении. Резонатор закрепляется на основании и фиксируется с помощью специального крепежа.

Чувствительным элементом зеемановского гироскопического датчика является *He-Ne* КЛ, генерирующий лазерное излучение с круговой поляризацией на длине волны $\lambda = 632,8$ нм. Спектр собственных частот продольных мод неплоского четырехзеркального резонатора КЛ составляет половину длины волны излучения $\lambda/2$, что соответствует 316,4 нм [8].

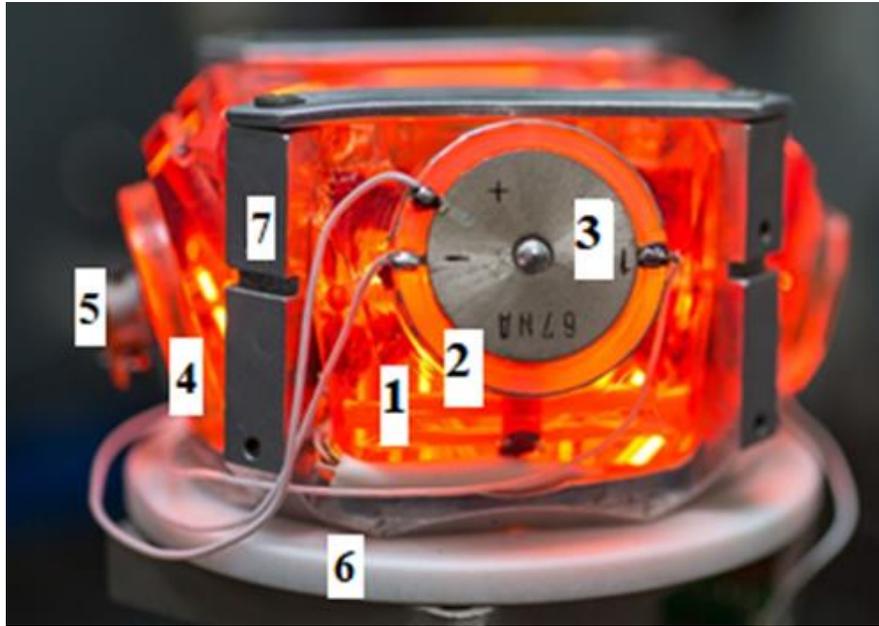


Рис. 1. Резонатор зеемановского датчика:
1 – резонатор; 2 – подвижное зеркало; 3 – пьезокорректор; 4 – полупрозрачное зеркало;
5 – смесительный узел; 6 – основание; 7 – крепежный элемент

Figure 1. Resonator of the Zeeman sensor:
1 – resonator; 2 – movable mirror; 3 – piezoelectric corrector; 4 – translucent mirror;
5 – mixing unit; 6 – base; 7 – fastening element

Благодаря круговой поляризации генерируемого излучения при наложении продольного магнитного поля на активные каналы КЛ в зеемановском гироскопическом датчике реализуется

магнитооптическая ЧП. Амплитуда ЧП является эквивалентом реального вращения и соответствует разности частот встречных волн КЛ $\Delta f = f_{cw} - f_{ccw}$, кГц.

Настройка периметра на центр контура усиления лазера соответствует максимальному значению амплитуды ЧП $\Delta f_{\max} = 70\text{--}90$ кГц, а настройка – минимальному $\Delta f_{\min} < 20$ кГц. Таким образом, по изменению амплитуды ЧП во время работы КЛ можно оценить температурные деформации периметра его резонатора.

2. Выбор исходных данных и построение модели

Для построения модели температурного дрейфа периметра КЛ проведены исследования зеемановского датчика угловой скорости типа ЗЛК-16 [8] при длительных температурных воздействиях согласно методике, представленной в [9; 10], и получены необходимые исходные данные.

Требуемая информация содержится в текстовом документе WORK.txt, вид которого представлен на рис. 2. В столбец 1 записано время съема данных t , с, в столбец 2 – амплитуда ЧП Δf , кГц, в столбце 3 показания термодатчика T в относительных единицах.

| Time, s | Freq. kHz | Temp, с.е. |
|---------|-------------|---------------|
| 92.160 | 69.57330452 | 360.51063830 |
| 152.190 | 60.28341922 | 440.00425532 |
| 212.220 | 27.95467088 | 508.97446809 |
| 272.250 | 21.81220080 | 573.55744681 |
| 332.280 | 65.29396609 | 638.15319149 |
| 392.320 | 75.23782414 | 704.00212766 |
| 452.350 | 83.14398271 | 769.50212766 |
| 512.380 | 81.36060505 | 836.04680851 |
| 572.410 | 72.03960273 | 902.28723404 |
| 632.450 | 62.53284574 | 969.31914894 |
| 692.480 | 12.67738531 | 1037.15319149 |
| 752.510 | 31.21958112 | 1104.48085106 |
| 812.540 | 59.91528424 | 1172.91276596 |
| 872.580 | 67.70565160 | 1240.68085106 |

Рис. 2. Массив данных исследования дрейфа периметра в текстовом формате

Figure 2. An array of perimeter drift research data in text format

Величина амплитуды ЧП Δf при линейно изменяющейся температуре T в диапазоне от -55 до $+75$ °С со скоростью $1^\circ/\text{мин}$ внутри камеры тепла и холода отражает последовательную перестройку спектра частот КЛ относительно центра контура усиления, вызванную дрейфом периметра датчика ΔL , нм.

Типичная величина дрейфа периметра ΔL для зеемановских гироскопических датчиков в диапазоне рабочих температур составляет $3\lambda\text{--}4\lambda$ (от 2000 до 25000 нм) [9; 10] и может зависеть от множества факторов: ТКЛР ситалла СО-115М и других конструкционных элементов, длины резонатора КЛ, способа накачки активной среды, рабочего тока разряда и т. д.

Таким образом, имея в качестве исходных данных временные зависимости амплитуды ЧП Δf от температуры T , становится возможным создать модель температурного дрейфа периметра при помощи программного метода. Для построения модели разработан специальный алгоритм, реализованный в среде MATLAB [25].

Структурная схема работы алгоритма представлена на рис. 3.

В массив A записываются данные из текстового файла ϕ , полученного в ходе экспериментального исследования и представленного на рис. 2:

$$A = \text{dlmread}('WORK.txt'). \quad (1)$$

В массив t записывается 3-й столбец массива A , содержащий показания термодатчика. В массив e записывается 2-й столбец массива A , содержащий значения амплитуды ЧП Δf :

$$t = A(:,11) * (0.0003051804 * 44.444444) - 61.11111$$

$$e = A(:,3). \quad (2)$$

Первые пустые промежуточные массивы $e1$ и $t1$ заполняются значениями из алгоритма поиска точек перегиба. Далее осуществляется поиск точек массива e , значения которых больше либо меньше значений их предыдущих и последующих точек, которые вносятся в промежуточный массив, также придавая этим точкам значения массива t :

$$e1 = []$$

$$t1 = []$$

$$\text{indx} = 1$$

$$\text{for } i = 2:\text{size}(e) - 1$$

$$\text{if } ((e(i-1) < e(i)) \&\& (e(i+1) < e(i))) \vee ((e(i-1) > e(i)) \&\& (e(i+1) > e(i)))$$

$$e1(\text{indx}) = e(i);$$

$$t1(\text{indx}) = t(i);$$

$$\text{indx} = \text{indx} + 1;$$

$$\text{end} \quad (3)$$



Рис. 3. Структурная схема работы алгоритма

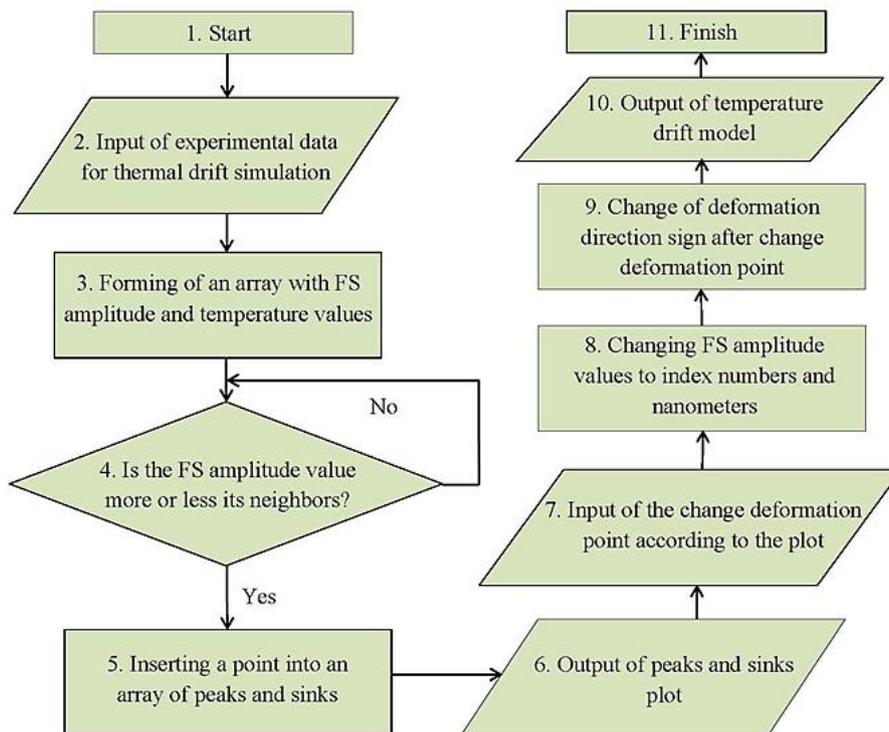


Figure 3. Block diagram of the algorithm (FS – frequency stand)

После этого значения массива $e1$ заменяются на соответствующие им порядковые номера и переводятся в нанометры:

$$\begin{aligned} e1 &= 1: \text{size}(e1'); \\ e1 &= 633 * 0.25 * e1 \end{aligned} \quad (4)$$

На рис. 4 представлен промежуточный график температурной зависимости амплитуды ЧП Δf от температуры T , содержащий ключевые точки «пиков» и «провалов», необходимые для построения конечной модели температурного дрейфа периметра зеэмановского лазерного гироскопического датчика. В точках с нечетными номерами КЛ находится на собственной n -й рабочей моде, попадающей в максимум контура усиления, а с четными – области максимальной

отстройки от контура усиления. Расстояние между двумя соседними точками с нечетными номерами, например между точками 1 и 3, соответствует $\lambda/2 = 316,4$ нм. В свою очередь, расстояние между двумя соседними точками с последовательными номерами, то есть между расстройкой и настройкой (например, между точками 2 и 3), соответствует четверти длины волны излучения $\lambda/4 = 158,2$ нм. В точке 9 происходит изменение направления деформации резонатора. С точки 1 до точки 10 наблюдается сужение периметра КЛ, с точки 10 до точки 18 – расширение. Это связано с нелинейным характером ТКЛР ситалла СО-115М в рабочем диапазоне температур зеэмановского лазерного гироскопического датчика.

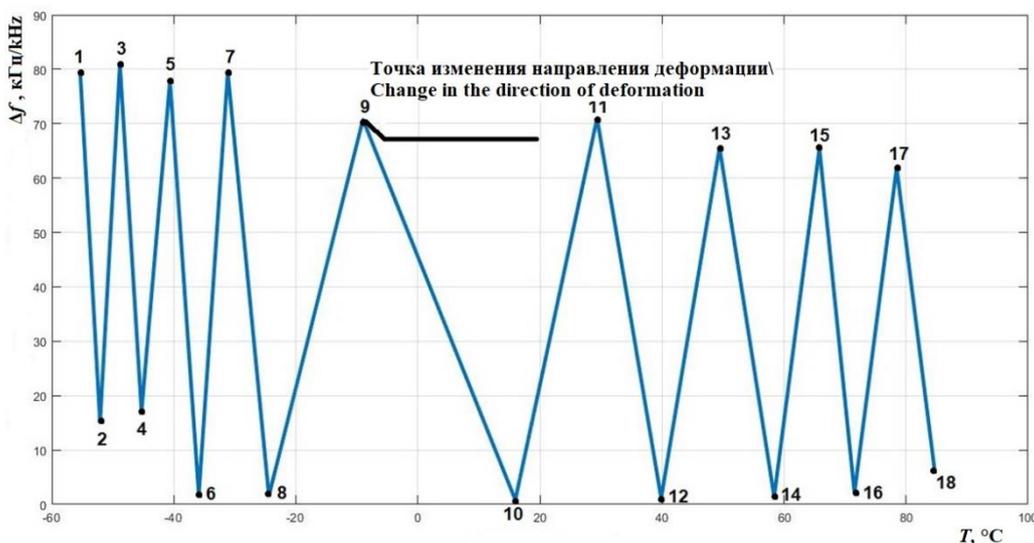


Рис. 4. Промежуточный график зависимости амплитуды ЧП от температуры
Figure 4. Intermediate graph of the dependence of the amplitude of the frequency stand on the temperature

На промежуточном графике (рис. 4) выбирается номер точки перегиба ind , а именно номер 9. Из значений точек массива $e1$ вычитается значение величины изменения амплитуды ЧП в точке изменения направления деформации, что позволяет переместить график к нулю координат в точке перегиба:

$$\begin{aligned} ind &= 9 \\ e1 &= e1 - e1(ind) \end{aligned} \quad (5)$$

Далее в пустые промежуточные массивы ex и te заносятся значения $e1$ и $t1$ из цикла, который отражает значения изменения до точки перегиба относительно оси абсцисс:

$$\begin{aligned} ex &= [] \\ te &= [] \\ i1 &= 1 \\ \text{for } k &= 1: \text{size}(e1') \\ &\text{if } k < ind \\ ex(i1) &= -e1(k)' \\ te(i1) &= t1(k)' \\ i1 &= i1 + 1 \\ &\text{end} \\ &\text{if } k \geq ind \\ ex(i1) &= e1(k)' \\ te(i1) &= t1(k)' \\ i1 &= i1 + 1 \\ &\text{end} \end{aligned} \quad (6)$$

По значениям из массивов ex и te строится конечный график зависимости абсолютного изменения периметра ΔL от температуры t .

На рис. 5 представлена модель температурного дрейфа периметра зеэмановского гироскопического датчика, отражающая зависимость абсолютного изменения длины его периметра от внешней температуры и саморазогрева.

По полученной модели видно, что наибольшую деформацию периметр КЛ имеет в зоне

отрицательных температур, что соответствует характеру ТКЛР ситалла СО-115М в данной области. Эту особенность необходимо учитывать при предварительной регулировке СРП гироскопического датчика, чтобы обеспечить эффективную термокомпенсацию с помощью активных пьезокорректоров.

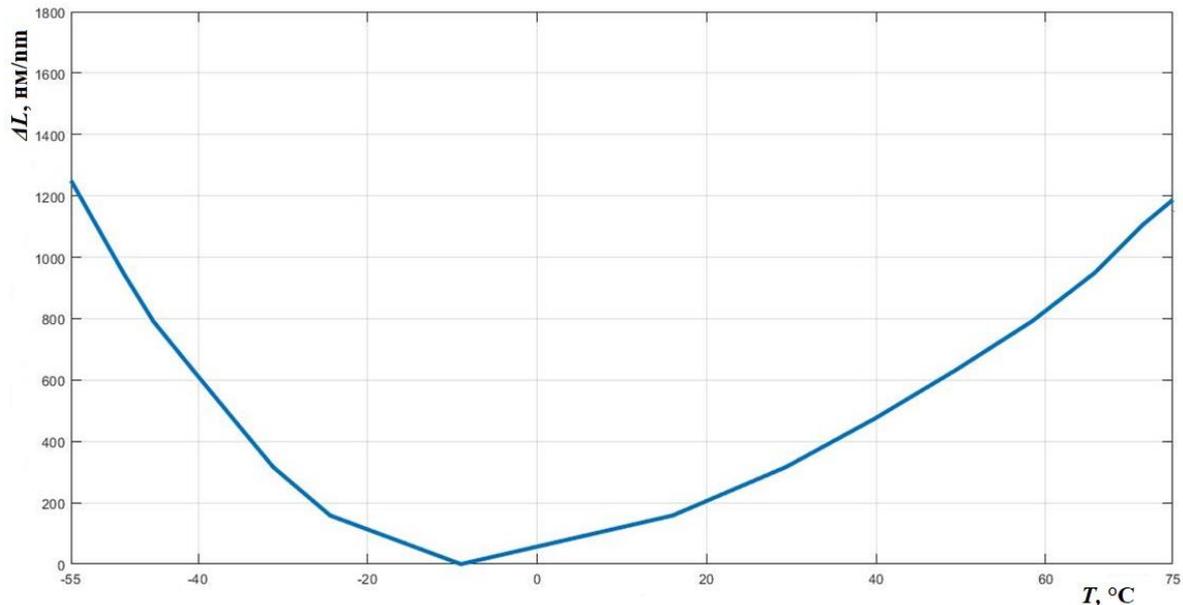


Рис. 5. Модель температурного дрейфа периметра зеэмановского датчика
Figure 5. Model of temperature drift of the perimeter of the Zeeman RLG

3. Реализация моделирования для оценки вклада конструктивных элементов в совокупный температурный дрейф периметра

Имея представление о характере температурного дрейфа периметра ΔL , становится возможным оценить вклад всех конструктивных элементов КЛ, имеющих отличные от ситалла СО-115М ТКЛР, в совокупный уход периметра зеэмановского гироскопического датчика.

На основе исходных данных и благодаря реализованной в среде MATLAB модели температурных дрейфов периметра датчика возможно провести моделирование и получить зависимости изменения периметра резонатора в диапазоне рабочих температур на этапах различной сборки датчика, как показано на рис. 6.

Представленная модель демонстрирует поведение температурного дрейфа периметра гироскопического датчика на разных этапах сборки – от резонатора КЛ до готового изделия. При добавлении новых конструктивных элементов

наблюдается сдвиг точки перегиба и изменение результирующей деформации ΔL . Это позволяет оценить вклад каждого конструктивного элемента в изменение периметра датчика.

Согласно полученной модели, увеличение числа конструктивных элементов КЛ вначале сборки датчика приводит к росту абсолютного удлинения периметра ΔL при частичном закреплении пьезоблоков на подвижных зеркалах. Далее совокупная деформация периметра датчика снижается на 400 нм и ее результирующая величина становится равной $\Delta L = 2000$ нм, что соответствует типовым значениям [9; 10]. При этом на 20 °С смещается точка изменения направления деформации оптического контура датчика из области отрицательных температур в область положительных температур.

Таким образом, благодаря данной модели можно получить достоверную информацию о влиянии всех составных элементов на совокупное изменение периметра зеэмановского гироскопического датчика с целью оптимизации его конструкции и режима работы активной СРП.

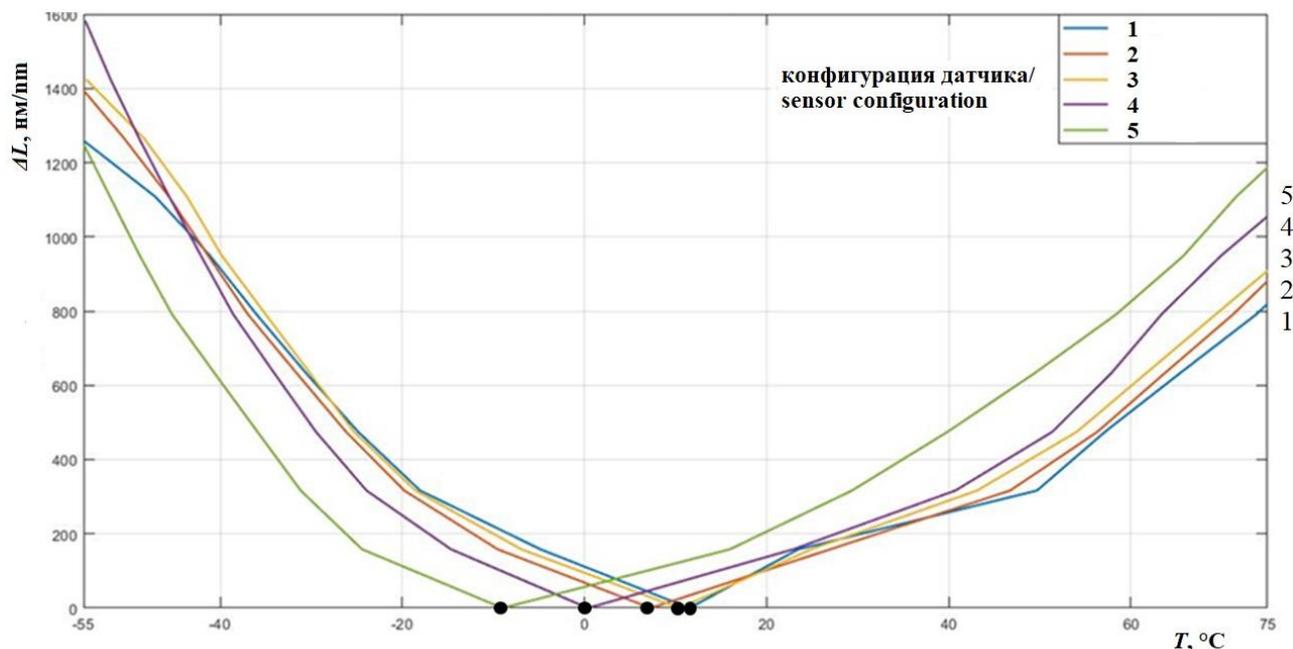


Рис. 6. Модель температурного дрейфа периметра на разных этапах сборки датчика: 1 – полностью собранный датчик; 2 – датчик без магнитных экранов; 3 – резонатор с полностью припаянными пьезоблоками; 4 – резонатор с пьезоблоками, отпаянными по образующей; 5 – только резонатор КЛ

Figure 6. A model of the temperature drift of the perimeter at different stages of sensor assembly: 1 – full sensor; 2 – sensor without magnetic shield; 3 – resonator with fixed piezoelements; 4 – resonator with loose piezoelements; 5 – only resonator

Заключение

Разработанный и реализованный в среде MATLAB алгоритм позволяет моделировать температурные деформации периметра зеemanовского лазерного гироскопического датчика при изменении конфигурации его конструктивных элементов. Это дает возможность оценивать качества поставляемого материала для изготовления КЛ, а также – совокупный вклад конструктивных элементов в результирующий дрейф периметра зеemanовского датчика.

Таким образом, представленная модель является аналитическим инструментом контроля качества оптического ситалла СО-115М, из которого изготавливается резонатор КЛ, и оптимизации конструкции зеemanовского лазерного гироскопического датчика как локально, так и комплексно. Это необходимо для повышения эффективности стабилизации периметра КЛ в диапазоне рабочих температур методами активной и пассивной термокомпенсации.

Использование разработанной модели в производстве лазерных гироскопов позволяет осуществлять подбор конструктивных элементов гироскопического датчика, что существенно

увеличивает время его непрерывной работы в одномодовом режиме в широком температурном диапазоне при сохранении требуемой точности для систем ориентации, стабилизации и навигации различных летательных аппаратов.

Список литературы / References

- Hering E, Schönfelder G, Basler S, Biehl K-E, Burkhardt T, Engel T, Feinäugle A, Fericean S, Forkl A, Giebeler C, Hahn B, Halder E, Herfort Ch, Hubrich S, Reichenbach J, Röbel M, Sester S. Geometric quantities. In: Hering E, Schönfelder G. (eds.) *Sensors in Science and Technology*. Wiesbaden: Springer; 2022. p. 147–372. https://doi.org/10.1007/978-3-658-34920-2_3
- Chopra KN. Ring laser gyroscopes. *Optoelectronic Gyroscopes: Design and Applications*. Singapore: Springer; 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8380-3_1
- Passaro VMN, Cuccovillo A, Vaiani L, De Carlo M, Campanella CE. Gyroscope technology and applications: a review in the industrial perspective. *Sensors*. 2017;17(10). <https://doi.org/10.3390/s17102284>
- Cheremisenov GV. A gyrocompass based on a rotating laser gyroscope: experience in the development and experimental results. *Gyroscopy and Navigation*. 2018;9:29–34. <https://doi.org/10.1134/S2075108718010054>

Черемисенов Г. В. Опыт разработки гирокомпаса на основе вращающегося лазерного гироскопа // Гироскопия и навигация. 2017. № 3 (98). С. 49–59. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2017.25.3.049-059>

5. Bolotnov AS. Application of the laser gyroscope in free-form inertial systems. *Politechnical Student Journal*. 2019;10(39). <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533>

Болотнов А. С. Применение лазерного гироскопа в бесплатформенных инерциальных системах // Политехнический молодежный журнал. 2019. Вып. 10 (39). <https://doi.org/10.18698/2541-8009-2019-10-533>

6. Corke P. Navigation. *Robotics and Control*. Cham: Springer; 2022. p. 123–147. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79179-7_5

7. Logashina IV, Chumachenko EN, Bober SA, Akse-
nov SA. Thermal stress state of a laser-gyroscope housing for use in space. *Russian Engineering Research*. 2009;29: 751–755. <https://doi.org/10.3103/S1068798X09080012>

8. Azarova VV, Golyaev YD, Savelyev II. Zeeman laser gyroscopes. *Quantum Electronics*. 2015;45(2):171–179.

Азарова В. В., Голяев Ю. Д., Савельев И. И. Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 2. С. 171–179.

9. Golyaev YD, Zapotylo NR, Nedzvetskaya AA, Sinelnikov AO, Tikhmenev NV. Laser gyros with increased time of continuous operation. *Proceedings of the 18th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2011)*. St. Petersburg; 2011. p. 53.

10. Golyaev YuD, Zapotylo NR, Nedzvetskaya AA, Sinelnikov AO. Thermally stable optical cavities for Zeeman laser gyroscopes. *Optics and Spectroscopy*. 2012;113(2): 227–229. <https://doi.org/10.1134/S0030400X12070090>

11. Zubarev YA, Sinelnikov AO, Fetisova NE. A study of the temperature stability of the Zeeman laser gyro ring resonator. *2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS)*. IEEE; 2022. p. 1–4. <https://doi.org/10.23919/ICINS51784.2022.9815336>

12. Savvova OV, Bragina LL, Petrov DV, Topchii VL, Ryabinin SA. Technological aspects of the production of optically transparent glass ceramic materials based on lithium-silicate glasses. *Glass and Ceramics*. 2018;75:127–132. <https://doi.org/10.1007/s10717-018-0041-6>

13. Kompan TA, Sharov AA. Monitoring of the uniformity of the thermal linear expansion coefficient of large-size optical components. *Measurement Techniques*. 2009;52:755. <https://doi.org/10.1007/s11018-009-9345-9>

14. Filatov YD, Sidorko VI, Kovalev SV, Kovalev VA. Effect of the rheological properties of a dispersed system on the polishing indicators of optical glass and glass ceramics. *Journal of Superhard Materials*. 2021;43:65–73. <https://doi.org/10.3103/S1063457621010032>

15. Wu F, Zhang M-H, Fu X, Guo X, Wang J-L, Wang J-X. Design of ac laser frequency stabilization system for space three-axis mechanical dithering laser gyro. *Zhongguo Guanxing Jishu Xuebao*. 2017;25(2):265–268.

16. Cygan A, Lisak D, Masłowski P, Bielska K, Wójtewicz S, Domysławska J, Trawiński RS. Pound-Drever-Hall-locked, frequency-stabilized cavity ring-down spectrometer. *The Review of Scientific Instruments*. 2011;82(6):063107. <https://doi.org/10.1063/1.3595680>

17. Sinelnikov AO, Medvedev AA, Golyaev YD, Grushin ME, Chekalov DI. Thermal zero drifts in magneto-optical Zeeman laser. *Gyroscope and Navigation*. 2021; 129(4):308–313. <https://doi.org/10.1134/S2075108721040076>

Синельников А. О., Медведев А. А., Голяев Ю. Д., Грушин М. Е., Чекалов Д. И. Роль тепловых дрейфов нуля в магнитооптических зеемановских лазерных гироскопах // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 29. № 4 (115). С. 46–55. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.0079>

18. Savelyev I, Sinelnikov A. The influence of the pumping current on the Zeeman laser rotation sensors output parameters. *Proceedings of the 22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS 2015)*. St. Petersburg; 2015. p. 421–424.

19. Zubarev YA, Sinelnikov AO, Katkov AA. Contribution of structural elements to the temperature drift of the Zeeman laser angular velocity sensors perimeter. *Fizicheskoe Obrazovanie v Vuzah*. 2021;27(24):55–58. (In Russ.) https://doi.org/10.54965/16093143_2021_27_S4_55

Зубарев Я. А., Синельников А. О., Катков А. А. Вклад конструкционных элементов в температурный дрейф периметра зеемановского лазерного датчика угловой скорости // Физическое образование в вузах. 2021. Т. 27. № 24. С. 55–58. https://doi.org/10.54965/16093143_2021_27_S4_55

20. Soloveva T, Sinelnikov A, Kuznetsov E, Golyaev Y, Kolbas Y. Computer simulation of processes in the resonator length control system of the Zeeman laser gyro. *Proceedings of the International Conference on Optoelectronic Information and Computer Engineering (OICE 2022)*, China, 15 August 2022 (vol. 12308). <https://doi.org/10.1117/12.2645990>

21. Khandelwal A, Syed A, Nayak J. Mathematical model of semiconductor fiber ring laser gyroscope. *Journal of Optics*. 2017;46:8–15. <https://doi.org/10.1007/s12596-016-0368-8>

22. Weng J, Bian X, Kou K, Lian T. Optimization of ring laser gyroscope bias compensation algorithm in variable temperature environment. *Sensors*. 2020;20(2):377. <https://doi.org/10.3390/s20020377>

23. Liang H, Ren Q, Zhang D, Zhao X, Guo Y. The temperature compensation method for the laser gyro based on the relevance vector machine. In: Jia Y, Zhang W, Fu Y, Yu Z, Zheng S. (eds.) *Proceedings of 2021 Chinese Intelligent Systems Conference*. Singapore: Springer; 2022. p. 367–375. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6328-4_39

24. Li Y, Fu L, Wang L, He L, Li D. Laser gyro temperature error compensation method based on NARX neural network embedded into extended Kalman filter. In: Yan L, Duan H, Yu X. (eds.) *Advances in Guidance, Navigation and Control*. Singapore: Springer; 2022. p. 3309–3320.

25. Semenov AS, Yakushev IA, Egorov AN. Modeling of technical systems in the MATLAB environment. *Modern High-Tech Technologies*. 2017;8:56–64. (In Russ.)

Семенов А.С., Якушев И.А., Егоров А.Н. Математическое моделирование технических систем в среде MATLAB // *Современные наукоемкие технологии*. 2017. № 8. С. 56–64.

Сведения об авторах

Зубарев Ярослав Андреевич, аспирант, ведущий инженер участка 450/4 НПК-470 по лазерной гироскопии, Научно-исследовательский институт «Полус» имени М.Ф. Стельмаха, Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 3, корп. 1; ORCID: 0000-0002-4492-338X; zubyar@mail.ru

Синельников Антон Олегович, кандидат технических наук, начальник лаборатории № 251-1, отдел № 250 разработки гироскопических блоков на базе лазерных гироскопов, Государственный научно-исследовательский институт приборостроения, Российская Федерация, 129226, Москва, пр-т Мира, д. 125; ORCID: 0000-0002-5579-3509, Scopus Author ID: 55382453500, eLIBRARY SPIN-код: 2442-7507; mr.sinelnikov.a@mail.ru

Мнацаканян Виктория Умедовна, доктор технических наук, профессор кафедры горного оборудования, транспорта и машиностроения, Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Российская Федерация, 119049, Москва, Ленинский пр-кт, д. 4, стр. 1; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-код: 8693-8313; artvik@bk.ru

About the authors

Yaroslav A. Zubarev, postgraduate student, lead engineer of lab. 450/4, scientific and production unit 470 (laser gyroscopy), Polyus Research Institute of M.F. Stelmakh, 3 Vvedenskogo St, bldg 1, Moscow, 117342, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4492-338X; zubyar@mail.ru

Anton O. Sinelnikov, Ph.D., Head of the laboratory No. 255-1, sector 250 (developing of gyro inertial units based on laser gyroscopes), State Research Institute of Instrument Engineering, 125 Prospekt Mira, Moscow, 129226, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5579-3509, Scopus Author ID: 55382453500, eLIBRARY SPIN-код: 2442-7507; mr.sinelnikov.a@mail.ru

Victoria U. Mnatsakanyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mining Equipment, Transport and Mechanical Engineering, National Research Technological University “MISIS”; 4 Leninskii Prospekt, bldg 1, Moscow, 119049, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9276-7599, Scopus Author ID: 6603501339, eLIBRARY SPIN-code: 8693-8313; artvik@bk.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-40-49

EDN: EOWDIE

УДК 51-7

Научная статья / Research article

Иерархический подход к доказательству существования обобщенных плоских гнездовидных центральных конфигураций в некоторых вариантах общей задачи $(pn+1)$ -тел

Ю.В. Перепелкина^a , А.Н. Задиранов^b 

^aРоссийский государственный университет туризма и сервиса, Черкизово, Российская Федерация

^bАкадемия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация

 amadeycity@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 20 ноября 2022 г.

Доработана: 26 января 2023 г.

Принята к публикации: 5 февраля 2022 г.

Ключевые слова:

небесная механика, задача n -тел, частные решения

Аннотация. Продемонстрирован иерархический подход к процедуре доказательства существования в общей задаче $(pn+1)$ -тел точных частных решений, так называемых обобщенных плоских центральных конфигураций небесных тел в форме последовательно вложенных один в другой выпуклых n -угольников, в вершинах которых расположены тела неравных масс, а в центре конфигурации находится несферическое тело. Рассматриваются плоские гнездовидные центральные конфигурации в форме вложенных один в другой выпуклых четырехугольников смешанных форм типа квадрат + ромб + дельтоид + трапеция + центральное тело в рамках общей задачи $(4n+1)$ -тел небесной механики. Приведенные общие условия существования справедливы для любых гнездовидных плоских центральных конфигураций в рамках задачи $(4n+1)$ -тел. Для решений системы уравнений используются символичные вычисления математического пакета Maple. Полученная система алгебраических уравнений имеет иерархическую структуру, подобную той, которая получается при реализации в системе алгебраических уравнений прямого хода преобразований в процессе решения систем линейных уравнений методом Гаусса. Рассматриваются случаи центрального тела в виде сферической (шар) и несферической (эллипсоид вращения или трехосный эллипсоид) структур. В каждом из случаев приведены соответствующие необходимые и достаточные условия существования центральных конфигураций различного вида.

Для цитирования

Перепелкина Ю.В., Задиранов А.Н. Иерархический подход к доказательству существования обобщенных плоских гнездовидных центральных конфигураций в некоторых вариантах общей задачи $(pn+1)$ -тел // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 40–49. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-40-49>

© Перепелкина Ю.В., Задиранов А.Н., 2023

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

The hierarchical approach to proving the existence of generalized planar nested central configurations on some versions of the general $(pn+1)$ -body problem

Yulianna V. Perepelkina^a , Alexander N. Zadiranov^b 

^aRussian State University of Tourism and Service, Cherkizovo, Russian Federation

^bState Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

 amadeycity@yandex.ru

Article history

Received: November 20, 2022

Revised: January 26, 2023

Accepted: February 5, 2022

Keywords:

celestial mechanics, n -body problem, partial solutions, central configurations

Abstract. A hierarchical approach to proving of existence in the general $(pn+1)$ -body exact partial solutions is presented, the so called generalized planar nested central configurations in a form of consequently nested in each other convex n -gons with nonequal in general masses in the vertices and a nonspherical body in the centre. Flat nest-shaped central configurations in the form of convex quadrilaterals of mixed shapes nested one into another of the type square + rhombus + deltoid + trapezoid + central body within the frame-work of the general problem of $(4n+1)$ -bodies of celestial mechanics were measured. The given general conditions of existence are valid for any nest-shaped planar central configurations within the framework of the $(4n+1)$ -bodies problem. Symbolic calculations of the Maple mathematical package are used to solve the system of equations. The system of algebraic equations has a hierarchical structure similar to the obtained direct transformations to the system of algebraic equations within the process of solving systems of linear equations by the Gauss method. The cases of a central body in the form of a spherical (a ball) and a non-spherical (an ellipsoid of rotation or a triaxial ellipsoid) structures are considered. In each of the cases, the corresponding necessary and sufficient conditions for the existence of central configurations of various types are given.

For citation

Perepelkina YuV, Zadiranov AN. The hierarchical approach to proving the existence of generalized planar nested central configurations on some versions of the general $(pn+1)$ -body problem. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):40–49. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-40-49>

Введение

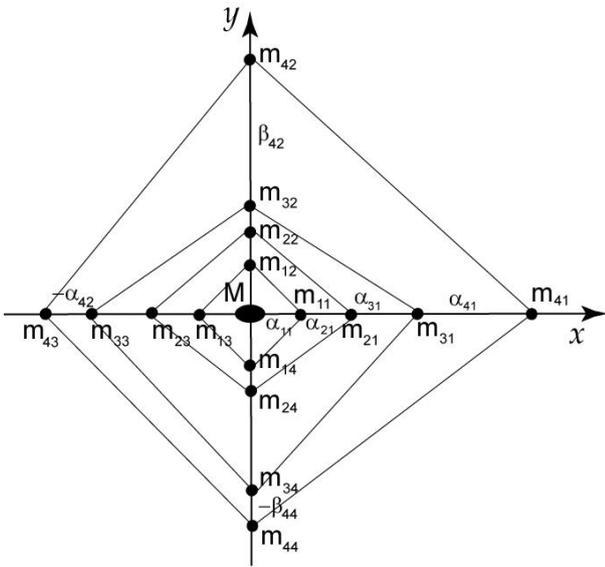
В последние десятилетия проблема существования обобщенных классических, главным образом плоских центральных конфигураций (ц.к.) небесной механики и звездной динамики развивается в нескольких направлениях. Первое состоит в рассмотрении действующих между телами сил, отличных от сил гравитационного притяжения (фотогравитационных, радиационных, электрических, магнитных и др.)¹ [1; 2]. Второе рассматривает фигуры, участвующие

в конфигурации тел, в частности центральные тела конфигурации [3; 4], отличные от сферических (эллипсоид вращения сжатый или вытянутый, трехосный эллипсоид) [5–8]. Третье изучает гнездовидные (то есть «наращиваемые») плоские ц.к., а четвертое – гнездовидные пространственные ц.к. Как показали исследования, структура уравнений движения и, как следствие, необходимых и достаточных условий существования [9; 10] ц.к. зависит от вида (формы) рассматриваемых ц.к. В различных трудах еще начала XX в. [11; 12] рассматривались элементы обобщенных квадратных и трапецевидных плоских ц.к. с несферическими телами в центре,

¹ Емельянов Н.В. Основы теории возмущений в небесной механике: учебное пособие. М.: Физический факультет МГУ, 2015. 126 с.

а позднее – обобщенные плоские ц.к. смешанного вида [5; 6; 13]. Современное прикладное программное обеспечение позволяет с достаточно высокой точностью моделировать подобные системы [14; 15].

В данном исследовании рассматриваются плоские гнездовидные ц.к. в форме вложенных один в другой выпуклых четырехугольников смешанных форм, а именно типа квадрат – ромб – дельтоид – трапеция – центральное тело, то есть в рамках общей задачи $(4n+1)$ -тел небесной механики (рис.). Для таких ц.к. предложен так называемый *иерархический* подход для поиска совокупностей значений геометрических и динамических параметров, определяющих их существование.



Гнездовидная плоская центральная конфигурация типа квадрат – ромб – дельтоид – трапеция
Nest-shaped flat central configuration of the square – rhombus – deltoid – trapezoid type

1. Постановка задачи: общий вид уравнений движения $(p+1)$ -тел

Уравнения пространственного движения тел P_{lk} с массой m_{lk} , $l = 1, \dots, p$; $k = 1, \dots, n$ (l – число вложенных один в другой выпуклых многоугольников, k – число вершин многоугольников) в относительной гелиоцентрической системе координат P_0xuz , вращающейся с постоянной угловой скоростью ω вокруг тела P_0 с массой M_0 , имеют вид [13]

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{lk} - 2\omega \dot{y}_{lk} - \omega^2 x_{lk} &= \\ &= -f(M_0 + m_{lk}) \frac{x_{lk}}{r_{lk}^3} + \\ &+ f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left(\frac{x_{lj} - x_{lk}}{\Delta_{ljl k}^3} - \frac{x_{lj}}{r_{lj}^3} \right) + \\ &+ f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left(\frac{x_{\sigma s} - x_{lk}}{\Delta_{\sigma sl k}^3} - \frac{x_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right); \\ \ddot{y}_{lk} + 2\omega \dot{x}_{lk} - \omega^2 y_{lk} &= \\ &= -f(M_0 + m_{lk}) \frac{y_{lk}}{r_{lk}^3} + \\ &+ f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left(\frac{y_{lj} - y_{lk}}{\Delta_{ljl k}^3} - \frac{y_{lj}}{r_{lj}^3} \right) + \\ &+ f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left(\frac{y_{\sigma s} - y_{lk}}{\Delta_{\sigma sl k}^3} - \frac{y_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right); \\ \ddot{z}_{lk} &= -f(M_0 + m_{lk}) \frac{z_{lk}}{r_{lk}^3} + \\ &+ f \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^n m_{lj} \left(\frac{z_{lj} - z_{lk}}{\Delta_{ljl k}^3} - \frac{z_{lj}}{r_{lj}^3} \right) + \\ &+ f \sum_{\substack{1 \leq \sigma \leq p \\ \sigma \neq l}} \sum_{s=1}^n m_{\sigma s} \left(\frac{z_{\sigma s} - z_{lk}}{\Delta_{\sigma sl k}^3} - \frac{z_{\sigma s}}{r_{\sigma s}^3} \right), \end{aligned} \right\} (1)$$

где $r_{lk} = \sqrt{x_{lk}^2 + y_{lk}^2 + z_{lk}^2}$;

$$\Delta_{ljl k} = \sqrt{(x_{lj} - x_{lk})^2 + (y_{lj} - y_{lk})^2 + (z_{lj} - z_{lk})^2}.$$

При записи системы уравнений (1) предполагалось, что все тела P_{lk} , P_0 притягиваются по закону Ньютона, но в то же время взаимодействующие один с другим тела P_{lk} не оказывают влияния на движение центрального тела P_0 ввиду $m_{lk} \ll M_0$, то есть рассматривается ограниченный вариант задачи N -тел, или планетный случай.

Первая сумма в правой части системы уравнений (1) отражает гравитационное взаимодействие

при $l = 1, 2; k = 1, \dots, 4$ к системе уравнений (3) добавляются

$$\begin{aligned} \omega_{21}^2 x_{21} = & (M_0 + m_{21}) \frac{x_{21}}{r_{21}^3} - m_{11} \left(\frac{x_{11} - x_{21}}{\Delta_{1121}^3} - \frac{x_{11}}{r_{11}^3} \right) - \\ & - m_{12} \left(\frac{x_{12} - x_{21}}{\Delta_{1221}^3} - \frac{x_{12}}{r_{12}^3} \right) - m_{13} \left(\frac{x_{13} - x_{21}}{\Delta_{1321}^3} - \frac{x_{13}}{r_{13}^3} \right) - \\ & - m_{14} \left(\frac{x_{14} - x_{21}}{\Delta_{1421}^3} - \frac{x_{14}}{r_{14}^3} \right) - m_{22} \left(\frac{x_{22} - x_{21}}{\Delta_{2221}^3} - \frac{x_{22}}{r_{22}^3} \right) - \\ & - m_{23} \left(\frac{x_{23} - x_{21}}{\Delta_{2321}^3} - \frac{x_{23}}{r_{23}^3} \right) - m_{24} \left(\frac{x_{24} - x_{21}}{\Delta_{2421}^3} - \frac{x_{24}}{r_{24}^3} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{24}^2 x_{24} = & (M_0 + m_{24}) \frac{x_{24}}{r_{24}^3} - m_{11} \left(\frac{x_{11} - x_{24}}{\Delta_{1124}^3} - \frac{x_{11}}{r_{11}^3} \right) - \\ & - m_{12} \left(\frac{x_{12} - x_{24}}{\Delta_{1224}^3} - \frac{x_{12}}{r_{12}^3} \right) - m_{13} \left(\frac{x_{13} - x_{24}}{\Delta_{1324}^3} - \frac{x_{13}}{r_{13}^3} \right) - \\ & - m_{14} \left(\frac{x_{14} - x_{24}}{\Delta_{1424}^3} - \frac{x_{14}}{r_{14}^3} \right) - m_{21} \left(\frac{x_{21} - x_{24}}{\Delta_{2124}^3} - \frac{x_{21}}{r_{21}^3} \right) - \\ & - m_{22} \left(\frac{x_{22} - x_{24}}{\Delta_{2224}^3} - \frac{x_{22}}{r_{22}^3} \right) - m_{23} \left(\frac{x_{23} - x_{24}}{\Delta_{2324}^3} - \frac{x_{23}}{r_{23}^3} \right); \end{aligned}$$

$$(x \leftrightarrow y), \tag{4}$$

при $l = 1, 2, \dots, (p - 1), p; k = 1, \dots, 4$ к системам уравнений (3), (4) добавляются

$$\begin{aligned} \omega_{p1}^2 x_{p1} = & (M_0 + m_{p1}) \frac{x_{p1}}{r_{p1}^3} - m_{11} \left(\frac{x_{11} - x_{p1}}{\Delta_{11p1}^3} - \frac{x_{11}}{r_{11}^3} \right) - \\ & - m_{12} \left(\frac{x_{12} - x_{p1}}{\Delta_{12p1}^3} - \frac{x_{12}}{r_{12}^3} \right) - m_{13} \left(\frac{x_{13} - x_{p1}}{\Delta_{13p1}^3} - \frac{x_{13}}{r_{13}^3} \right) - \\ & - m_{14} \left(\frac{x_{14} - x_{p1}}{\Delta_{14p1}^3} - \frac{x_{14}}{r_{14}^3} \right) - m_{21} \left(\frac{x_{21} - x_{p1}}{\Delta_{21p1}^3} - \frac{x_{21}}{r_{21}^3} \right) - \\ & - m_{22} \left(\frac{x_{22} - x_{p1}}{\Delta_{22p1}^3} - \frac{x_{22}}{r_{22}^3} \right) - m_{23} \left(\frac{x_{23} - x_{p1}}{\Delta_{23p1}^3} - \frac{x_{23}}{r_{23}^3} \right) - \\ & - m_{24} \left(\frac{x_{24} - x_{p1}}{\Delta_{24p1}^3} - \frac{x_{24}}{r_{24}^3} \right) - \dots - \\ & - m_{(p-1)1} \left(\frac{x_{(p-1)1} - x_{p1}}{\Delta_{(p-1)1p1}^3} - \frac{x_{(p-1)1}}{r_{(p-1)1}^3} \right) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & - m_{(p-1)2} \left(\frac{x_{(p-1)2} - x_{p1}}{\Delta_{(p-1)2p1}^3} - \frac{x_{(p-1)2}}{r_{(p-1)2}^3} \right) - \\ & - m_{(p-1)3} \left(\frac{x_{(p-1)3} - x_{p1}}{\Delta_{(p-1)3p1}^3} - \frac{x_{(p-1)3}}{r_{(p-1)3}^3} \right) - \\ & - m_{(p-1)4} \left(\frac{x_{(p-1)4} - x_{p1}}{\Delta_{(p-1)4p1}^3} - \frac{x_{(p-1)4}}{r_{(p-1)4}^3} \right) - \\ & - m_{p2} \left(\frac{x_{p2} - x_{p1}}{\Delta_{p2p1}^3} - \frac{x_{p2}}{r_{p2}^3} \right) - \\ & - m_{p3} \left(\frac{x_{p3} - x_{p1}}{\Delta_{p3p1}^3} - \frac{x_{p3}}{r_{p3}^3} \right) - \\ & - m_{p4} \left(\frac{x_{p4} - x_{p1}}{\Delta_{p4p1}^3} - \frac{x_{p4}}{r_{p4}^3} \right); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{p4}^2 x_{p4} = & (M_0 + m_{p4}) \frac{x_{p4}}{r_{p4}^3} - m_{11} \left(\frac{x_{11} - x_{p4}}{\Delta_{11p4}^3} - \frac{x_{11}}{r_{11}^3} \right) - \\ & - m_{12} \left(\frac{x_{12} - x_{p4}}{\Delta_{12p4}^3} - \frac{x_{12}}{r_{12}^3} \right) - m_{13} \left(\frac{x_{13} - x_{p4}}{\Delta_{13p4}^3} - \frac{x_{13}}{r_{13}^3} \right) - \\ & - m_{14} \left(\frac{x_{14} - x_{p4}}{\Delta_{14p4}^3} - \frac{x_{14}}{r_{14}^3} \right) - m_{21} \left(\frac{x_{21} - x_{p4}}{\Delta_{21p4}^3} - \frac{x_{21}}{r_{21}^3} \right) - \\ & - m_{22} \left(\frac{x_{22} - x_{p4}}{\Delta_{22p4}^3} - \frac{x_{22}}{r_{22}^3} \right) - m_{23} \left(\frac{x_{23} - x_{p4}}{\Delta_{23p4}^3} - \frac{x_{23}}{r_{23}^3} \right) - \\ & - m_{24} \left(\frac{x_{24} - x_{p4}}{\Delta_{24p4}^3} - \frac{x_{24}}{r_{24}^3} \right) - \dots - \\ & - m_{((p-1)1)} \left(\frac{x_{(p-1)1} - x_{p4}}{\Delta_{(p-1)1p4}^3} - \frac{x_{(p-1)1}}{r_{(p-1)1}^3} \right) - \\ & - m_{(p-1)2} \left(\frac{x_{(p-1)2} - x_{p4}}{\Delta_{(p-1)2p4}^3} - \frac{x_{(p-1)2}}{r_{(p-1)2}^3} \right) - \\ & - m_{(p-1)3} \left(\frac{x_{(p-1)3} - x_{p4}}{\Delta_{(p-1)3p4}^3} - \frac{x_{(p-1)3}}{r_{(p-1)3}^3} \right) - \\ & - m_{(p-1)4} \left(\frac{x_{(p-1)4} - x_{p4}}{\Delta_{(p-1)4p4}^3} - \frac{x_{(p-1)4}}{r_{(p-1)4}^3} \right) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -m_{p1} \left(\frac{x_{p1} - x_{p4}}{\Delta_{p1p4}^3} - \frac{x_{p1}}{r_{p1}^3} \right) - \\
 & -m_{p2} \left(\frac{x_{p2} - x_{p4}}{\Delta_{p2p4}^3} - \frac{x_{p2}}{r_{p2}^3} \right) - m_{p3} \left(\frac{x_{p3} - x_{p4}}{\Delta_{p3p4}^3} - \frac{x_{p3}}{r_{p3}^3} \right); \\
 & (x \leftrightarrow y) \tag{5}
 \end{aligned}$$

Символ $(x \leftrightarrow y)$ означает, что аналогичные системы уравнений имеют место и для переменных y . Отметим, что приведенные общие условия существования справедливы для любых гнездовидных плоских ц.к. в рамках задачи $(4n+1)$ -тел, например для дельтообразных, трапецеобразных и др.

3. Необходимые и достаточные условия существования гнездовидных плоских центральных конфигураций смешанных форм при иерархической последовательности

Рассмотрим гнездовидные плоские ц.к. в виде последовательно вложенных один в другой p многоугольников разной формы (рис.), что позволяет говорить о ц.к. смешанных форм в классическом варианте. Для уменьшения объема алгебраических преобразований и частичного упрощения изложения алгоритма вычислений ограничимся случаем $p = 4, n = 4$.

Для удобства выпишем фактические значения координат (x_{lk}, y_{lk}) тел P_{kl} в соответствии с рисунком в виде таблицы.

Координаты тел гнездовидной конфигурации для различных типов четырехугольников
Coordinates of nest-shaped bodies for different types of quadrilaterals

| k | 1 | 2 | 3 | 4 |
|-----------------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|
| <i>l = 1 (квадрат/square)</i> | | | | |
| x_{1k} | α_{11} | 0 | $-\alpha_{11}$ | 0 |
| y_{1k} | 0 | α_{11} | 0 | $-\alpha_{11}$ |
| r_{1k} | α_{11} | α_{11} | α_{11} | α_{11} |
| <i>l = 2 (ромб/rhombus)</i> | | | | |
| x_{2k} | α_{21} | 0 | $-\alpha_{21}$ | 0 |
| y_{2k} | 0 | β_{22} | 0 | $-\beta_{22}$ |
| r_{2k} | α_{21} | β_{22} | α_{21} | β_{22} |
| <i>l = 3 (дельтоид/deltoid)</i> | | | | |
| x_{3k} | α_{31} | 0 | $-\alpha_{31}$ | 0 |
| y_{3k} | 0 | β_{32} | 0 | $-\beta_{32}$ |
| r_{3k} | α_{31} | β_{32} | α_{31} | β_{32} |
| <i>l = 4 (трапеция/trapezoid)</i> | | | | |
| x_{4k} | α_{41} | 0 | $-\alpha_{43}$ | 0 |
| y_{4k} | 0 | α_{41} | 0 | $-\alpha_{43}$ |
| r_{4k} | α_{41} | α_{41} | α_{43} | α_{43} |

Подстановка значений координат из таблицы последовательно в системы уравнений (3)–(5) [15] дает ($l = 1; k = 1, \dots, 4$):

а) *первый уровень иерархии* – квадрат, центральное тело шар с массой M_0 :

$$\begin{aligned}
 \omega_{11}^2 = \omega_{12}^2 = \omega_{13}^2 = \omega_{14}^2 = \omega^2 = \\
 = \left[M_0 + m \frac{(1+2\sqrt{2})}{4} \right] \frac{1}{\alpha^3}. \tag{6}
 \end{aligned}$$

Таким образом, при последовательной записи условий существования сначала квадратной ц.к. $m_{11} = m_{12} = m_{13} = m_{14} = m$ с центральным телом M_0 $l = 1; k = 1, \dots, 4$ получается одно уравнение (6) с тремя неизвестными ω^2, M, m , если считать геометрические размеры ц.к. заданными (α – размер полудиagonали квадрата). Далее учитываем следующее «кольцо» и записываем условия существования ц.к. типа квадрат – ромб – центральное тело – шар;

б) *второй уровень иерархии* – для двух вложенных один в другой четырехугольников ($l = 1,$

2; $k = 1, \dots, 4$) к уравнению (6) добавляются два уравнения

$$\begin{aligned} \omega_{21}^2 = \omega_{23}^2 = & \left(M_0 + \frac{1}{4} m_{21} \right) \frac{1}{\alpha_{21}^3} + \\ & + 2m_{22} \frac{1}{(\alpha_{21}^2 + \beta_{22}^2)^{3/2}} + m_{11} \frac{1}{\alpha_{21}} \times \\ & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{21})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \alpha_{21})^2} + \frac{2\alpha_{21}}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{21}^2)^{3/2}} \right); \\ \omega_{22}^2 = \omega_{24}^2 = & \left(M_0 + \frac{1}{4} m_{22} \right) \frac{1}{\beta_{22}^3} + \\ & + 2m_{21} \frac{1}{(\alpha_{21}^2 + \beta_{22}^2)^{3/2}} + m_{11} \frac{1}{\beta_{22}} \times \\ & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \beta_{22})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \beta_{22})^2} + \frac{2\beta_{22}}{(\alpha_{11}^2 + \beta_{22}^2)^{3/2}} \right); \end{aligned} \quad (7)$$

в) *третий уровень иерархии* – для трех вложенных один в другой четырехугольников ($l = 1, 2, 3$; $k = 1, \dots, 4$) к уравнениям (6), (7) добавляются еще три уравнения:

$$\begin{aligned} \omega_{31}^2 = \omega_{33}^2 = & \left(M_0 + \frac{1}{4} m_{31} \right) \frac{1}{\alpha_{31}^3} + \\ & 2m_{22} \frac{1}{(\alpha_{31}^2 + \beta_{22}^2)^{3/2}} + m_{11} \frac{1}{\alpha_{31}} \times \\ & \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{31})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \alpha_{31})^2} + \frac{2\alpha_{31}}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{21}^2)^{3/2}} \right) + \\ & + m_{21} \frac{1}{\alpha_{31}} \left(\frac{1}{(\alpha_{21} + \alpha_{31})^2} - \frac{1}{(\alpha_{21} - \alpha_{31})^2} \right) + \\ & + m_{32} \frac{1}{(\beta_{22}^2 + \alpha_{31}^2)^{3/2}} + m_{34} \frac{1}{(\beta_{34}^2 + \alpha_{31}^2)^{3/2}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \omega_{32}^2 = & (M_0 + m_{32}) \frac{1}{\beta_{32}^3} + \\ & + 2m_{21} \frac{1}{(\alpha_{21}^2 + \beta_{32}^2)^{3/2}} + m_{11} \frac{1}{\beta_{32}} \times \\ & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \beta_{32})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \beta_{32})^2} + \frac{2\beta_{32}}{(\alpha_{11}^2 + \beta_{32}^2)^{3/2}} \right) + \\ & + m_{22} \frac{1}{\beta_{32}} \left(\frac{1}{(\beta_{22} + \beta_{32})^2} - \frac{1}{(\beta_{22} - \beta_{32})^2} \right) + 2m_{31} \times \\ & \times \frac{1}{(\beta_{32}^2 + \alpha_{31}^2)^{3/2}} + m_{34} \frac{1}{\beta_{32}} \left(\frac{1}{(\beta_{32} + \beta_{34})^2} - \frac{1}{\beta_{34}^2} \right); \\ \omega_{34}^2 = & (M_0 + m_{34}) \frac{1}{\beta_{34}^3} + \\ & + 2m_{21} \frac{1}{(\alpha_{21}^2 + \beta_{34}^2)^{3/2}} + m_{11} \frac{1}{\beta_{34}} \times \\ & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \beta_{34})^2} + \frac{1}{(\beta_{34} - \alpha_{11})^2} + \frac{2\beta_{34}}{(\alpha_{11}^2 + \beta_{34}^2)^{3/2}} \right) + \\ & + m_{22} \frac{1}{\beta_{34}} \left(\frac{1}{(\beta_{22} + \beta_{34})^2} - \frac{1}{(\beta_{22} - \beta_{34})^2} \right) + 2m_{31} \times \\ & \times \frac{1}{(\beta_{34}^2 + \alpha_{31}^2)^{3/2}} + m_{32} \frac{1}{\beta_{34}} \left(\frac{1}{(\beta_{32} + \beta_{34})^2} - \frac{1}{\beta_{32}^2} \right); \end{aligned} \quad (8)$$

г) *четвертый уровень иерархии* – для четырех вложенных один в другой четырехугольников ($l = 1, \dots, 4$; $k = 1, \dots, 4$) к уравнениям (6)–(8) добавляются еще четыре уравнения:

$$\begin{aligned} \omega_{41}^2 = & \left(M_0 + \frac{1}{8} m_{41} \right) \frac{1}{\alpha_{41}^3} + \\ & + 2m_{22} \frac{1}{(\alpha_{41}^2 + \beta_{22}^2)^{3/2}} + m_{11} \frac{1}{\alpha_{41}} \times \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{41})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \alpha_{41})^2} + \frac{2\alpha_{41}}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{41}^2)^{3/2}} \right) - \\
 & - m_{21} \frac{1}{\alpha_{41}} \left(\frac{1}{(\alpha_{21} + \alpha_{41})^2} - \frac{1}{(\alpha_{21} - \alpha_{41})^2} \right) + \\
 & + m_{32} \frac{1}{(\beta_{32}^2 + \alpha_{41}^2)^{3/2}} + m_{31} \frac{1}{\alpha_{41}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{31} + \alpha_{41})^2} - \frac{1}{(\alpha_{31} - \alpha_{41})^2} \right) + m_{34} \frac{1}{(\beta_{34}^2 + \alpha_{41}^2)^{3/2}} + \\
 & + m_{43} \frac{1}{\alpha_{41}} \left(\frac{1}{(\alpha_{41} + \alpha_{43})^2} - \frac{1}{\alpha_{43}^2} + \frac{1}{(\alpha_{43}^2 + \alpha_{41}^2)^{3/2}} \right); \\
 & \omega_{42}^2 = \left(M_0 + \frac{1}{8} m_{41} \right) \frac{1}{\alpha_{41}^3} + \\
 & + 2m_{21} \frac{1}{(\alpha_{21}^2 + \alpha_{41}^2)^{3/2}} - m_{32} \frac{1}{\alpha_{41}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\beta_{32} - \alpha_{41})^2} - \frac{1}{\beta_{32}^2} \right) + m_{11} \frac{1}{\alpha_{41}} \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{41})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \alpha_{41})^2} + \frac{2\alpha_{41}}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{41}^2)^{3/2}} \right) + \\
 & + m_{22} \frac{1}{\alpha_{41}} \left(\frac{1}{(\beta_{22} + \alpha_{41})^2} - \frac{1}{(\beta_{22} - \alpha_{41})^2} \right) + \\
 & + m_{34} \frac{1}{\alpha_{41}} \left(\frac{1}{(\alpha_{33} + \alpha_{41})^2} - \frac{1}{\alpha_{33}^2} \right) + m_{43} \frac{1}{\alpha_{41}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{41}^2 + \alpha_{43}^2)^2} - \frac{1}{\alpha_{43}^2} + \frac{\alpha_{41}}{(\alpha_{41}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} \right); \\
 & \omega_{43}^2 = \left(M_0 + \frac{1}{8} m_{43} \right) \frac{1}{\alpha_{43}^3} + 2m_{22} \frac{1}{(\beta_{22}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} - \\
 & - m_{32} \frac{1}{\alpha_{41}} \left(\frac{1}{(\beta_{32} - \alpha_{41})^2} - \frac{1}{\beta_{32}^2} \right) + m_{11} \frac{1}{\alpha_{43}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{43})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \alpha_{43})^2} + \frac{2\alpha_{43}}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} \right) + \\
 & + m_{32} \frac{1}{(\beta_{32}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} + m_{21} \frac{1}{\alpha_{41}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{21} + \alpha_{43})^2} - \frac{1}{(\alpha_{21} - \alpha_{43})^2} \right) + \\
 & + m_{31} \frac{1}{\alpha_{43}} \left(\frac{1}{(\alpha_{31} + \alpha_{43})^2} - \frac{1}{(\alpha_{31} - \alpha_{43})^2} \right) + m_{41} \frac{1}{\alpha_{43}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{41}^2 + \alpha_{43}^2)^2} - \frac{1}{\alpha_{41}^2} + \frac{\alpha_{43}}{(\alpha_{41}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} \right) + \\
 & + m_{34} \frac{1}{(\beta_{34}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}}; \\
 & \omega_{44}^2 = \left(M_0 + \frac{1}{8} m_{43} \right) \frac{1}{\alpha_{43}^3} + m_{11} \frac{1}{\alpha_{41}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{11} + \alpha_{43})^2} - \frac{1}{(\alpha_{11} - \alpha_{43})^2} + \frac{2\alpha_{43}}{(\alpha_{11}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} \right) \times \\
 & \times 2m_{21} \frac{1}{(\alpha_{21}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} + 2m_{31} \frac{1}{(\alpha_{31}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} + \\
 & + m_{32} \frac{1}{\alpha_{43}} \left(\frac{1}{(\beta_{32} + \alpha_{43})^2} - \frac{1}{\beta_{32}^2} \right) + m_{34} \frac{1}{\alpha_{43}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{\beta_{34}^2} - \frac{1}{(\beta_{34} - \alpha_{43})^2} \right) + m_{41} \frac{1}{\alpha_{43}} \times \\
 & \times \left(\frac{1}{(\alpha_{41}^2 + \alpha_{43}^2)^2} - \frac{1}{\alpha_{41}^2} + \frac{\alpha_{43}}{(\alpha_{41}^2 + \alpha_{43}^2)^{3/2}} \right). \quad (9)
 \end{aligned}$$

4. Алгоритм последовательных вычислений

Число выписанных уравнений на последнем четвертом уровне иерархии равно 10, однако они образуют систему из 42 уравнений, если записать их в виде попарных разностей вида $\omega_{11}^2 - \omega_{21}^2 = 0$, $\omega_{11}^2 - \omega_{22}^2 = 0, \dots$, $\omega_{43}^2 - \omega_{44}^2 = 0$, соответствующих исключению из системы уравне-

ний квадрата угловой скорости ω^2 и отражающих тот факт, что все 16 тел, расположенных в вершинах четырех многоугольников гнездовидной плоской ц.к., должны вращаться относительно их общего центра M_0 (который, строго говоря, не является центром масс системы тел) с одной и той же угловой скоростью, в то время как само тело с массой M_0 , которое на рисунке не отражено, каким-то образом движется относительно общего центра масс.

Отмечаем, что полученная выше система алгебраических уравнений имеет иерархическую структуру, подобную получаемой при реализации в системе алгебраических уравнений прямого хода преобразований в процессе решения систем линейных алгебраических уравнений методом исключения неизвестных Гаусса. Правда, полученная таким образом «трапецевидная» форма расширенной матрицы системы уравнений имеет «перевернутый» вид, поскольку строки с наименьшим числом неизвестных с ненулевыми коэффициентами оказываются сверху, а не внизу, как это бывает в классическом методе Гаусса.

Действительно, первое уравнение содержит лишь массу M и неизвестные ω_{11} , α_{11} , m_{11} и образует *первый уровень иерархии*. Далее добавляется *второй уровень* из трех уравнений, содержащих массу M и неизвестные α_{21} , α_{22} , m_{21} , m_{22} , так как неизвестные с индексом 11 уже оказываются найденными из решения уравнения предыдущего уровня. Следующий *третий уровень иерархии* образуется подсистемой из 12 уравнений, содержащих массу M и неизвестные α_{31} , α_{32} , α_{34} , m_{31} , m_{32} , m_{34} , так как неизвестные с индексами 11, 21, 22 уже найдены из решения уравнений предыдущего (второго) уровня. Наконец, *четвертый уровень иерархии* образуется подсистемой из 26 уравнений, содержащих массу M и неизвестные α_{41} , α_{43} , m_{41} , m_{43} , так как неизвестные с индексами 11, 21, 22, 31, 32 и 34 уже найдены из решения уравнений предыдущего уровня.

Считая геометрические размеры α_{lk} рассматриваемых в ц.к. многоугольников заданными, получим переопределенную систему линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных масс m_{lk} , которых из-за наличия симметрий оказывается всего 8 (m_{11} – для квадрата; m_{21} , m_{22} – для ромба; m_{31} , m_{32} , m_{34} – для дельтоида; m_{31} , m_{33} – для трапеции). Используя возможности

Maple, выписав последовательно 42 упомянутые попарные разности $\omega_{11}^2 - \omega_{21}^2 = 0$, $\omega_{11}^2 - \omega_{22}^2 = 0, \dots$, $\omega_{43}^2 - \omega_{44}^2 = 0$, получим систему линейных алгебраических уравнений вида, которая имеет множество решений относительно масс при условии наличия переменных значений центральной массы и размеров многоугольников.

$$\sum_{i=1}^{42} (a_{i1}m_{11} + a_{i2}m_{21} + a_{i3}m_{22} + a_{i4}m_{31} + a_{i5}m_{32} + a_{i6}m_{33} + a_{i7}m_{41} + a_{i8}m_{42}) = a_{i9}M_0. \quad (10)$$

Заключение

Предложен и описан новый подход к доказательству существования обобщенных плоских центральных конфигураций в рамках общей задачи $(pn+1)$ -тел, в которой p вложенных один в другой выпуклых n -угольников, в вершинах которых, строго говоря, разных масс m_{lk} , вращаются с постоянной угловой скоростью вокруг центрального тела M_0 . Центральное тело может иметь сферическую (шар) или несферическую структуру (эллипсоид вращения или трехосный эллипсоид). В каждом из случаев соответствующие необходимые и достаточные условия существования ц.к. имеют различный вид.

Список литературы / References

1. Lei H, Huang X. Quadrupole and octupole order resonances in non-restricted hierarchical planetary systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2022; 515(1):1086–1103. <https://doi.org/10.1093/mnras/stac1757>
2. Tory M, Grishin E, Mandel I. Empirical stability boundary for hierarchical triples. *Publications of the Astronomical Society of Australia*. 2022;39:7. <https://doi.org/10.1017/pasa.2022.57>
3. Siddique MAR, Kashif AR. The restricted six-body problem with stable equilibrium points and a rhomboidal configuration. *Hindawi Advances in Astronomy*. 2022; 2022:8100523. <https://doi.org/10.1155/2022/8100523>
4. Han S, Lee H-W, Kim K-W. Orbital dynamics in centrosymmetric systems. *Physical Review Letters*. 2022;128: 176601. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.128.176601>
5. Llibre J, Moeckel R, Sim C. Central configurations, periodic orbits, and hamiltonian systems. *Advanced Courses in Mathematics (CRM)*. Barcelona, Basel: Springer; 2015. p. 105–167. <https://doi.org/10.1007/978-3-0348-0933-7>

6. Zhuravlev SG. Proof of the existence theorem of plane central configurations with an ellipsoid of rotation in the center in the problem of $(4n+1)$ -bodies. *Theoretical and Applied Problems of Nonlinear Analysis. Problems of Nonlinear Analysis*. Moscow: Dorodnicyn Computing Centre of RAS; 2012. p. 186–215. (In Russ.)

Журавлев С.Г. Доказательство теоремы существования плоских центральных конфигураций с эллипсоидом вращения в центре в задаче $(4n+1)$ -тел // Теор. и прикл. задачи нелинейного анализа. М.: Вычислительный центр имени А.А. Дородницына Российской академии наук, 2012. С. 186–215.

7. Antonidou K, Libert A.-S. Origin and continuation of $3/2$, $5/2$, $3/1$, $4/1$ and $5/1$ resonant periodic orbits in the circular and elliptic restricted three-body problem. *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. 2018;130:41. <https://doi.org/10.1007/s10569-018-9834-8>

8. Oks E. Orbital dynamics in the restricted three body problem: overview of recent analytical advances obtained by separating rapid and slow subsystems in non-planar configurations. *Dynamics*. 2021;1:95–124. <https://doi.org/10.3390/dynamics1010006>

9. Veras D. Relating binary-star planetary systems to central configurations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2016;462(3):3368. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1873>

10. Hansen B, Naoz S. The stationary points of the hierarchical three-body problem. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2020;499(2):1682–1700. <https://doi.org/10.1093/mnras/staa2602>

11. Andoyer MH. Sur les solutions periodiques voisines des positions d'équilibre relatif, dans le probleme des n corps. *Bulletin Astronomique, Paris*. 1906;23:129–146.

12. Elmabsout B. Comptes rendus de l'Académie des Sciences. *Mechanics. Mécanique. Série II. Fascicule b.* (vol. 328). Elsevier; 2000.

13. Zhuravlev SG. On existence of planar central configurations in relative noninertial coordinate systems. *International Journal on Pure and Applied Mathematics, Classical and Celestial Mechanics, Cosmodynamics*. 2012;(1):62–74. (In Russ.)

Журавлев С.Г. О существовании плоских центральных конфигураций в относительных неинерциальных системах координат // Международный журнал по теоретической и прикладной математике, классической и небесной механике и космодинамике. 2012. № 1. С. 49–61.

14. Pollard H. *Mathematical introduction to celestial mechanics*. London: Prentice-Hall International Inc.; 1966. <https://doi.org/10.2307/3612975>

Поллард Г. Математическое введение в небесную механику / пер. с англ. Э.М. Эпштейна. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. 188 с.

15. Lalande F, Trani AA. Predicting the stability of hierarchical triple systems with convolutional neural networks. *The Astrophysical Journal*. 2022;938(1):1–9. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac8eab>

16. Perepelkina YuV. Mathematical modeling of systems of nonlinear equations using the Maple visual instruments. *New Aspects of Science and Education: Theses of Reports International Science and Practical Conference, Moscow, 11 April 2019*. Moscow: MAKS Press; 2019. p. 122–123. (In Russ.)

Перепелкина Ю.В. Математическое моделирование поиска решений нелинейных систем уравнений визуальными средствами Maple // Новое в науке и образовании: сборник тезисов докладов международной ежегодной научно-практической конференции, Москва, 11 апреля 2019 г. М.: МАКС Пресс, 2019. С. 122–123.

Сведения об авторах

Перепелкина Юлианна Вячеславовна, кандидат физико-математических наук, доцент Высшей школы сервиса, Российский государственный университет сервиса и туризма, Российская Федерация, 141221, Черкизово, ул. Главная, д. 99; ORCID: 0000-0001-8115-8253, Scopus Author ID: 25925321600, eLIBRARY SPIN-код: 5157-4093; amadeycity@yandex.ru

Задиранов Александр Никитич, доктор технических наук, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галужкина, д. 4; ORCID: 0000-0001-7787-8290, Scopus Author ID: 57214856655, eLIBRARY SPIN-код: 2873-6465; zadiranov@mail.ru

About the authors

Yulianna V. Perepelkina, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of High School of Service, Russian State University of Torusim and Service, 99 Glavnaya St, Cherkizovo, 141221, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-8115-8253, Scopus Author ID: 25925321600, eLIBRARY SPIN-code: 5157-4093; amadeycity@yandex.ru

Alexander N. Zadiranov, Doctor of Technical Sciences, Professor of Combustion Behavior and Environmental Safety Department, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Borisa Galushkina St, Moscow, 129366, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7787-8290, Scopus Author ID: 57214856655, eLIBRARY SPIN code: 2873-6465; zadiranov@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56
EDN: EXXABZ
УДК 629.331

Научная статья / Research article

Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой

З.Н. Лин , А.А. Попов , В.Н. Сидоров ✉, С.А. Голубина

Калужский филиал Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана,
Калуга, Российская Федерация
✉ sidorov-kaluga@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 ноября 2022 г.
Доработана: 21 января 2023 г.
Принята к публикации: 25 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

городской цикл, расход топлива, Matlab Simulink, выбросы углекислого газа

Аннотация. Увеличение автомобильного парка в мире и в том числе в России с одновременным стремительным ростом цен на топливо заставляет обратить внимание на снижение расхода топлива автомобилем. Одним из направлений, позволяющих снизить потребление углеводородного топлива, является использование автомобилей с электромеханическим приводом. Источником энергии на таких автомобилях служат двигатель внутреннего сгорания и электрический двигатель. Приводятся результаты исследования расхода топлива гибридным автомобилем при различных алгоритмах его управления. Использовались методы математического и имитационного моделирования. Рассматриваются данные расхода топлива при использовании различных алгоритмов включения бензинового двигателя внутреннего сгорания в зависимости от скорости движения автомобиля. Посредством имитационного моделирования установлено, что для обеспечения наибольшей экономии топлива необходимо, чтобы бензиновый двигатель запускался при достижении автомобилем скорости не ниже 60 км/ч, тогда расход топлива в условиях городского цикла уменьшается на 50 % в сравнении с режимом запуска бензинового двигателя при скорости 30 км/ч.

Для цитирования

Лин З.Н., Попов А.А., Сидоров В.Н., Голубина С.А. Оптимизация алгоритма управления автомобилем с гибридной силовой установкой // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 50–56. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

Optimization of the control algorithm for a vehicle with a hybrid power plant

Zar Ni Lin , Andrey A. Popov , Vladimir N. Sidorov ✉, Svetlana A. Golubina

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, Russian Federation
✉ sidorov-kaluga@yandex.ru

Article history

Received: November 12, 2022
Revised: January 21, 2023
Accepted: February 25, 2023

Abstract. Along with the rapid growth of fuel prices, the increase of car fleet in the world, including Russia, has focused on reducing fuel consumption by vehicles. One of the ways that can reduce the consumption of hydrocarbon fuels is to use vehicles with an electromechanical powertrain.



Keywords:

urban driving cycle, fuel consumption, Matlab Simulink, carbon dioxide emissions

The energy source for such vehicles is both an internal combustion engine and an electric motor. The results of a study of fuel consumption by a hybrid vehicle with various control algorithms are presented. The methods of mathematical and simulation modeling were used. Fuel consumption data is given when using various algorithms for turning on the gasoline internal combustion engine, depending on the vehicle speed. As a result of simulation modeling, it was found that in order to ensure the greatest fuel economy, it is necessary that the gasoline engine starts when the car reaches a speed of at least 60 km/h, then fuel consumption in the urban driving cycle is reduced by 50% compared to the gasoline engine start mode at a speed of 30 km/h.

For citation

Lin ZN, Popov AA, Sidorov VN, Golubina SA. Optimization of the control algorithm for a vehicle with a hybrid power plant. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):50–56. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-50-56>

Введение

Автомобиль стал неотъемлемой частью современного общества. В России, согласно аналитическому агентству «Автостат», зарегистрировано более 45 млн легковых автомобилей¹, то есть почти каждый третий россиянин владеет автомобилем. В крупных городах автомобили являются причиной 80–90 % выбросов, которые загрязняют окружающую среду, что в несколько раз превышает долю выбросов промышленных предприятий. В связи с этим ужесточаются экологические нормы, предъявляемые к автомобилям [1]. Еще одной проблемой является ограниченность запасов нефтепродуктов. По оценкам экспертов, углеводородсодержащих продуктов в мире хватит не более чем на 60–70 лет добычи [2]. Таким образом, перед отраслью автомобилестроения стоит задача в уменьшении количества потребляемого топлива, а также переходе на другие виды энергии.

Один из путей решения данной проблемы – переход на гибридные автомобили. Применение гибридных автомобилей позволяет повысить топливную экономичность автомобиля в условиях городского ездового цикла путем оптимизации совместной работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) и электросилового устройства [3–4]. ДВС в основном используется при установившейся скорости движения, а при трогании и разгоне работает электродвигатель [5]. При торможении за счет рекуперации кинетической энергии происходит зарядка аккумуляторных батарей,

энергия которых используется электродвигателем при трогании и разгоне автомобиля [6].

Цель исследования – оценка расхода топлива гибридным автомобилем в л/100 км пути при различных алгоритмах управления гибридной силовой установкой в условиях городского цикла.

1. Материалы и методы

Применяются методы математического и имитационного моделирования. Модель транспортного средства разработана в среде MATLAB Simulink² и состоит из нескольких подсистем:

- подсистема ездового цикла, включающая контрольную скорость, с которой должно следовать транспортное средство. Эта подсистема является входом модели [7];
- модель транспортного средства и подсистемы модели колеса для расчета противодействующих сил и обновления скорости транспортного средства на каждом шаге моделирования;
- модель двигателя для расчета потерь энергии;
- модель трансмиссии для расчета тяговой силы с учетом потерь энергии при передаче крутящего момента от двигателя к ведущим колесам;
- модель электродвигателя и инвертора для расчета потерь энергии, учитывающая эффективность двигателя и инвертора;
- подсистема батареи, которая предназначена для расчета потребности в энергии от батареи [8];

¹ Статистика количества легковых автомобилей. URL: <https://www.autostat.ru/news/49197/> (дата обращения: 12.10.2022).

² MATLAB/Simulink. URL: <http://matlab.exponenta.ru> (дата обращения: 12.10.2022); MATLAB for Artificial Intelligence. URL: <http://www.mathworks.com> (дата обращения: 12.10.2022).

– подсистема энергопотребления, предназначенная для расчета расхода топлива двигателем и энергопотребления электродвигателя [9–10].

Рис. 1 иллюстрирует модель транспортного средства, включая все вышеупомянутые подсистемы и взаимодействия между ними [11–12]. На рис. 2 представлен блок внешних сил.

Касательная сила тяги, создаваемая на колесах автомобиля за счет энергии, вырабатываемой двигателем внутреннего сгорания и электромотором, передаваемой через трансмиссию, тратится на преодоление всех сил сопротивления движению. К силам сопротивления относят:

сила сопротивления качению, сила сопротивления воздушному потоку, сила сопротивления подъему и сила инерции.

$$F_t = F_f + F_w + F_a + F_j, \quad (1)$$

где F_t – касательная сила тяги, Н; F_f – сила сопротивления качению, Н; F_w – сила сопротивления воздушному потоку, Н; F_a – сила сопротивления подъему, Н; F_j – сила инерции, Н.

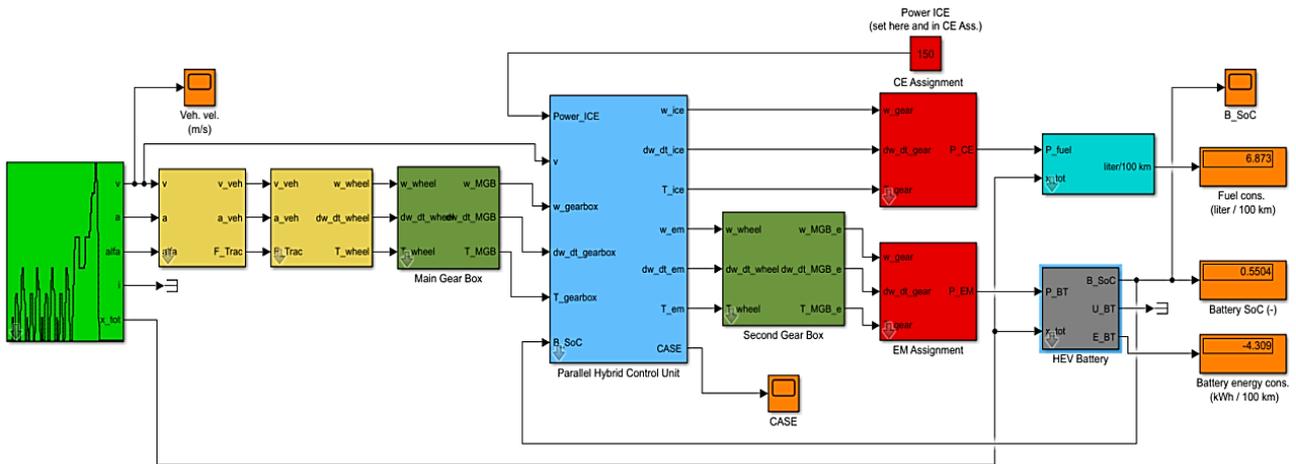


Рис. 1. Модель автомобиля с гибридной силовой установкой
Figure 1. Vehicle model with a hybrid power plant

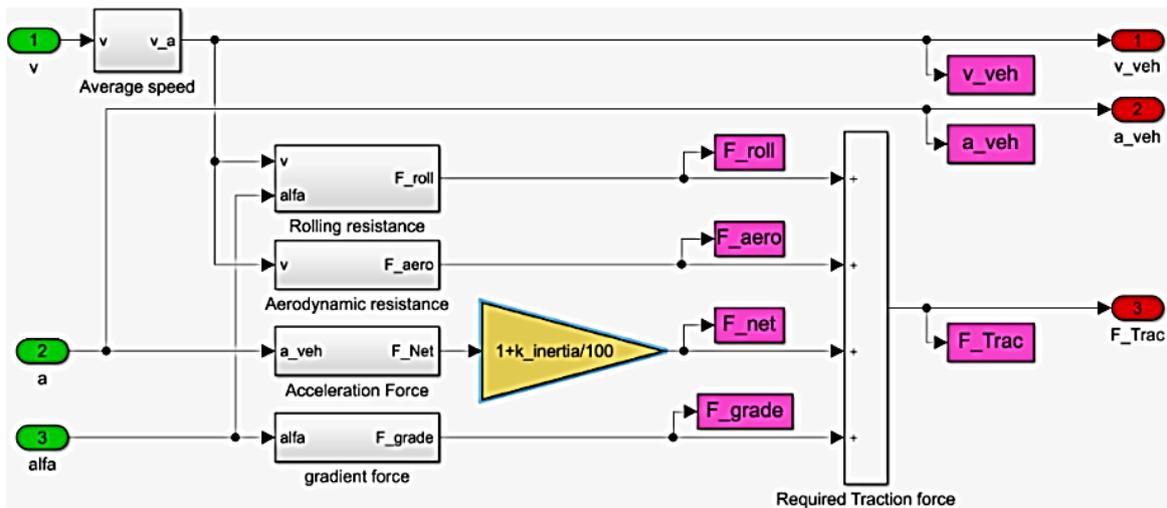


Рис. 2. Блок внешних сил
Figure 2. Block of external forces acting on the vehicle

Блок мощности двигателя (рис. 3), используемый в этом исследовании, представляет со-

бой картографическую модель расхода топлива двигателем внутреннего сгорания при макси-

мальной и минимальной нагрузках по мощности и крутящему моменту, в зависимости от угловой скорости двигателя.

Мощность двигателя определяется через часовой расход топлива и низшую теплоту его сгорания:

$$P_{CE} = m_f H_u, \quad (2)$$

где P_{CE} – мощность двигателя, кВт; m_f – массовой часовой расход топлива, кг/ч; H_u – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг.

Блок определения расхода топлива (рис. 4) используется для определения расхода топлива с размерностью [л/100 км] через часовой расход топлива, плотность топлива и пройденный путь:

$$V_L = \frac{m_f}{\rho_f} \cdot \frac{100}{S}, \quad (3)$$

где m_f – массовой часовой расхода топлива, кг/ч; ρ_f – плотность топлива, кг/л; S – пройденный путь, км.

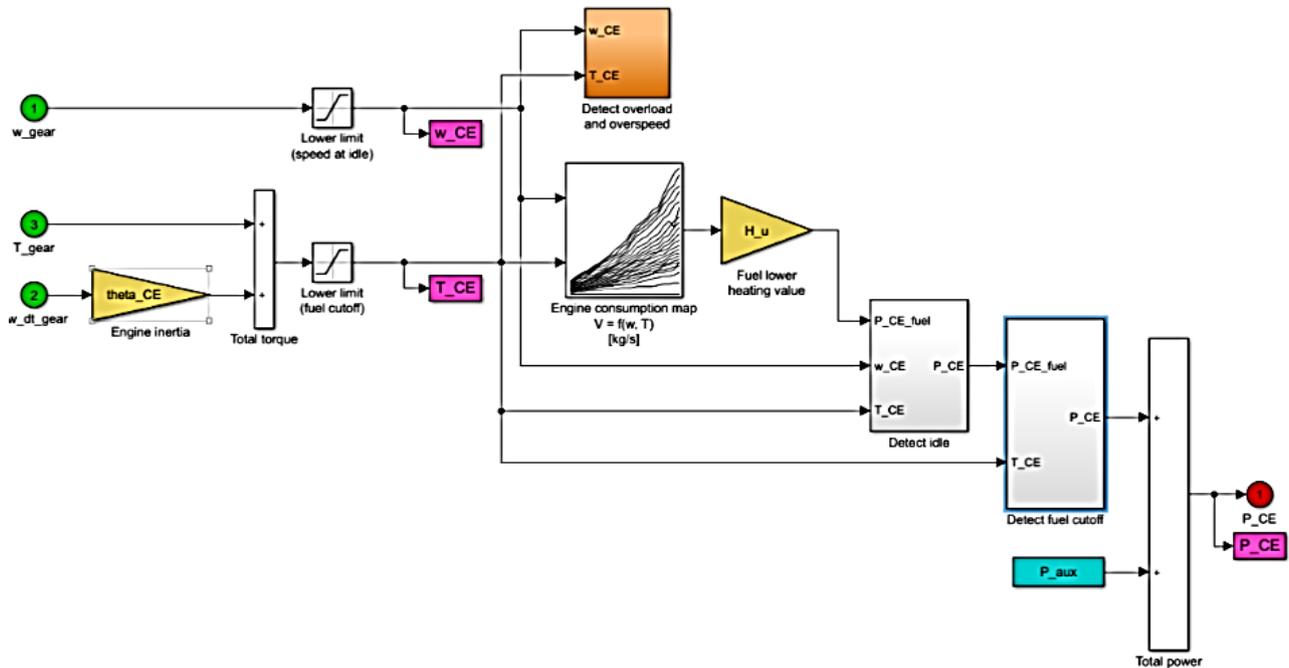


Рис. 3. Блок мощности двигателя
Figure 3. Engine power block

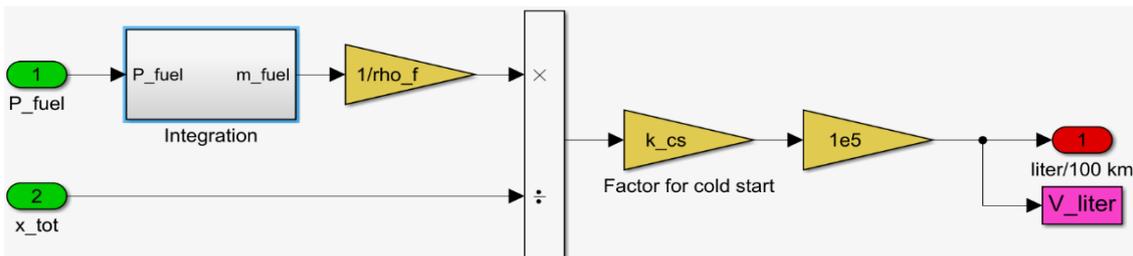


Рис. 4. Блок определения расхода топлива на 100 км пути
Figure 4. Block for determining fuel consumption in 100 km track

2. Результаты и обсуждение

В ходе проведения имитационного эксперимента автомобиль разогнался за счет электромотора, а двигатель внутреннего сгорания вклю-

чался при достижении различных скоростей движения автомобиля: 30, 45 и 60 км/ч. Изменению подвергался только порог скорости включения двигателя внутреннего сгорания, другие

параметры (крутящий момент и заряд батареи) оставались одинаковыми для каждого опыта.

На рис. 5 представлен график расхода топлива в л/100 км в режиме включения двигателя внутреннего сгорания на скорости 30 км/ч. При такой начальной скорости включения ДВС время работы двигателя в пределах городского цикла общей протяженностью 1800 с составило около 1000 с. Максимальный расход топлива – 6 л/100км.

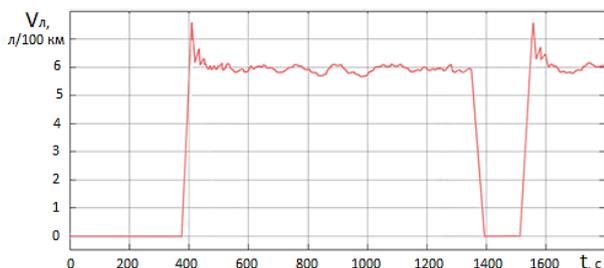


Рис. 5. График расхода топлива для режима включения ДВС на скорости выше 30 км/ч

Figure 5. Fuel consumption graph for the mode of turning on ICE at speeds above 30 km/h

График изменения расхода топлива в режиме включения двигателя внутреннего сгорания при скорости 45 км/ч представлен на рис. 6. Можно отметить, что увеличение порога включения ДВС на 15 км/ч привело к уменьшению работы двигателя в городском цикле примерно на 20 % и составило 800 с при том же максимальном расходе топлива.

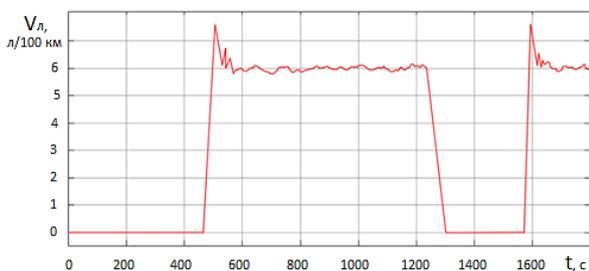


Рис. 6. График расхода топлива в режиме включения ДВС на скорости 45 км/ч

Figure 6. Fuel consumption graph for the mode of turning on ICE at a speed of 45 km/h

Как следует из рис. 7 дальнейшее увеличение порога включения ДВС до 60 км/ч снизило время работы двигателя еще на 30 % и составило всего 300 из 1800 с общего времени движения.

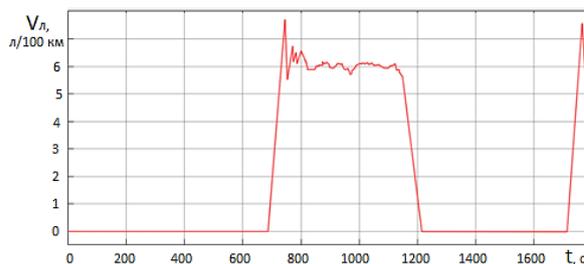


Рис. 7. График расхода топлива в режиме включения ДВС на скорости 60 км/ч

Figure 7. Fuel consumption graph for the mode of turning on ICE at a speed of 60 km/h

Средняя скорость движения в небольших городах составляет около 35 км/ч [10]. По результатам моделирования очевидно, что при запуске бензинового двигателя при скорости 30 км/ч большую часть времени в пределах города он будет работать с наибольшим расходом топлива и, соответственно, производить вредоносные выбросы CO_2 .

Если поднять порог включения ДВС до 45 км/ч, то обеспечивается экономия топлива на 20 %. Однако при движении в городе часто бывают ситуации, когда необходимо ускориться до 50–55 км/ч, в результате чего будет включаться ДВС и увеличивать общее число выбросов в атмосферу.

Для обеспечения наибольшей экономии топлива и минимизации выбросов CO_2 необходимо поднять порог включения ДВС до 60 км/ч. При таком использовании силовой установки количество топлива, которое расходует автомобиль, уменьшается на 50 % в сравнении с первым вариантом. Также за счет минимизации времени работы ДВС при движении в городе обеспечивается минимальное количество выбросов CO_2 в атмосферу, что способствует улучшению экологической ситуации в городе. Двигатель внутреннего сгорания целесообразно использовать при движении за городом, что позволяет увеличить дальность поездки, подзарядить батарею для электромотора и обеспечить сравнительно низкое потребление топлива.

Закключение

Получены значения расхода топлива при использовании в гибридном автомобиле различных алгоритмов управления запуском бензинового двигателя внутреннего сгорания. ДВС запускается при различных скоростях движения

автомобиля: 30, 45 и 60 км/ч. Изменению подвергался только порог скорости включения двигателя внутреннего сгорания, другие параметры (крутящий момент и заряд батареи) оставались одинаковыми для каждого опыта.

Сравнение результатов показало, что при запуске бензинового двигателя при скорости 30 км/ч более 50 % времени городского цикла он будет работать с наибольшим расходом топлива и производить вредоносные выбросы CO₂. Для обеспечения максимальной экономии топлива необходимо, чтобы бензиновый двигатель запускался при скорости не ниже 60 км/ч, тогда расход топлива автомобилем в городском цикле уменьшается на 50 % в сравнении с первым режимом – запуске бензинового двигателя при скорости 30 км/ч. Двигатель внутреннего сгорания целесообразно использовать при движении за городом, что позволяет увеличить дальность поездки, подзарядить батарею для электромотора и обеспечить сравнительно низкое потребление топлива на крейсерской скорости автомобиля.

Список литературы

1. Cárcel-Carrasco J., Pascual-Guillamón M., Salas-Vicente F. Analysis on the effect of the mobility of combustion vehicles in the environment of cities and the improvement in air pollution in Europe: a vision for the awareness of citizens and policy makers // *Land*. 2021. Vol. 10. Issue 2. P. 184. <https://doi.org/10.3390/land10020184>

2. Раков В.А. Методика оценки технического состояния гибридных силовых установок автомобиля // *Технология колесных и гусеничных машин*. 2015. № 2. С. 25–31.

3. Becerra G., Alvarez-Icaza L., Flores De La Mota I., Mendoza-Soto J.L. Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles // *Applied Simulation and Optimization*. 2017. Vol. 2. Pp. 185–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55810-3_7

4. He H., Guo X. Multi-objective optimization research on the start condition for a parallel hybrid electric vehicle // *Applied Energy*. 2018. Vol. 227. Pp. 294–303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.082>

5. Insu C., Jongwon B., Junha P., Jinwook L. Experimental evaluation and prediction algorithm suggestion for determining SOC of lithium polymer battery in a parallel hybrid electric vehicle // *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8. Issue 9. Article 1641. <https://doi.org/10.3390/app8091641>

6. Hellgren J., Jonasson E. Maximization of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car // *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 2007. Vol. 1. No. 1. Pp. 95–121. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2007.014449>

7. Раков В.А. Исследование автопарка гибридных автомобилей // *Транспорт на альтернативном топливе*. 2013. № 1 (31). С. 18–23.

8. Раков В.А. Повышение энергетической эффективности гибридных двигателей с параллельной схемой расположения элементов // *Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: материалы международной научно-практической конференции*. Воронеж, 2014. С. 118–123.

9. Чижевский К.В., Сидоров В.Н., Лин З.Н. Анализ международных ездовых циклов автомобиля // *Актуальные научные исследования в современном мире*. 2020. № 2 (58). С. 109–114.

10. Куликов И.А., Селифонов В.В. Математическое моделирование движения автомобиля с гибридной силовой установкой параллельного типа // *Труды НАМИ*. 2009. № 242. С. 67–84.

11. Черанёв С.В. Использование программного обеспечения для математического моделирования при проектировании автомобилей с гибридными силовыми установками // *Известия МГТУ МАМИ*. 2011. № 1. С. 116–120.

12. Чижевский К.В., Сидоров В.Н. Конструктивные особенности современных гибридных силовых установок // *Современные автомобильные материалы и технологии (САМИТ-2019): сборник статей XI Международной научно-технической конференции*. Курск, 2019. С. 379–383.

References

1. Cárcel-Carrasco J, Pascual-Guillamón M, Salas-Vicente F. Analysis on the effect of the mobility of combustion vehicles in the environment of cities and the improvement in air pollution in Europe: a vision for the awareness of citizens and policy makers. *Land*. 2021;10(2):184. <https://doi.org/10.3390/land10020184>

2. Rakov VA. Assessment methods of maintaining the technical condition of hybrid power plants vehicles. *Technology of Wheeled and Tracked Machines*. 2015;(2):25–31. (In Russ.)

3. Becerra G, Alvarez-Icaza L, Flores De La Mota I, Mendoza-Soto JL. Simulation and optimization applied to power flow in hybrid vehicles. *Applied Simulation and Optimization*. 2017;2:185–224. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55810-3_7

4. He H, Guo X. Multi-objective optimization research on the start condition for a parallel hybrid electric vehicle. *Applied Energy*. 2018;227:294–303. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.082>

5. Insu C, Jongwon B, Junha P, Jinwook L. Experimental evaluation and prediction algorithm suggestion for determining SOC of lithium polymer battery in a parallel hybrid electric vehicle. *Applied Sciences*. 2018;8(9):1641. <https://doi.org/10.3390/app8091641>

6. Hellgren J, Jonasson E. Maximisation of brake energy regeneration in a hybrid electric parallel car. *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles*. 2007;1(1):95–121. <https://doi.org/10.1504/IJEHV.2007.014449>

7. Rakov VA. Development of hybrid vehicle fleet. *Transport na Alternativnom Toplive*. 2013;(1):18–23. (In Russ.)

8. Rakov VA. Improving the energy efficiency of hybrid engines with a parallel arrangement of elements. *Alternative Energy Sources in Road Transport: Problems and Prospects of Rational Use: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Voronezh; 2014. p. 118–123. (In Russ.)

9. Chizhevskij KV, Sidorov VN, Lin ZN. Analysis of international driving cycles of motor vehicle. *Current*

Scientific Research in the Modern World. 2020;(2):109–114. (In Russ.)

10. Kulikov IA, Selifonov VV. Modeling and simulation of parallel type hybrid electric vehicle. *Trudy NAMI*. 2009;(242):67–84. (In Russ.)

11. Cheranjov SV. Hybrid electric vehicle development with mathematical simulation software application. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2011;(1):116–120. (In Russ.)

12. Chizhevskij KV, Sidorov VN. Design features of modern hybrid power plants. *Modern Automotive Materials and Technologies (SAMIT-2019): Collection of Articles of the XI International Scientific and Technical Conference*. Kursk; 2019. p. 379–383. (In Russ.)

Сведения об авторах

Лин Зар Ни, аспирант, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0000-0003-1839-3845, Scopus Author ID: 57936166500; zarnizn15@gmail.com

Попов Андрей Александрович, студент, кафедра колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0000-3423-8517; leonfn4@mail.com

Сидоров Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0004-0214-1373, Scopus Author ID: 57222472914, eLIBRARY SPIN-код: 6162-2659; sidorov-kaluga@yandex.ru

Голубина Светлана Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры колесных машин и прикладной механики, Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал, Российская Федерация, 248000, Калуга, ул. Гагарина, д. 6; ORCID: 0009-0007-0905-0329, Scopus Author ID: 57206665616, eLIBRARY SPIN-код: 5344-1957; asbina@yandex.ru

About the authors

Zar Ni Lin, postgraduate student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-1839-3845, Scopus Author ID: 57936166500; zarnizn15@gmail.com

Andrey A. Popov, student, Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-3423-8517, Scopus Author ID: 0009-0000-3423-8517; leonfn4@mail.com

Vladimir N. Sidorov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0004-0214-1373, Scopus Author ID: 57222472914, eLIBRARY SPIN-code: 6162-2659; sidorov-kaluga@yandex.ru

Svetlana A. Golubina, Ph.D of Technical Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of the Department of Wheeled Vehicles and Applied Mechanics, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, 6 Gagarina St, Kaluga, 248000, Russian Federation; ORCID: 0009-0007-0905-0329, Scopus Author ID: 57206665616, eLIBRARY SPIN-code: 5344-1957; asbina@yandex.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-57-75

EDN: DACIZE

УДК 658.5.012.14:67.03

Научная статья / Research article

Влияние горнодобывающей промышленности на экономический рост в регионе Южно-Африканских стран

П.П. Силима , Ю.А. Назарова 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 silima2507@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 7 января 2023 г.

Доработана: 14 марта 2023 г.

Принята к публикации: 22 марта 2023 г.

Ключевые слова:

страны Южной Африки, природные ресурсы, ресурсное «проклятие», Африка

Аннотация. Рассматривается взаимосвязь между горнодобывающей промышленностью и экономическим ростом в регионе Южно-Африканских стран, где горнодобывающая промышленность извлекает и экспортирует природные ресурсы невысокого уровня промышленной переработки. Применялись метод наименьших квадратов и обобщенный метод моментов. Эмпирические результаты основаны на данных из двенадцати стран Южно-Африканского региона за период 2011–2020 гг. Проанализировано прямое и косвенное влияние горнодобывающей промышленности в регионе Южно-Африканских стран на их экономический рост. В модели экономического роста использовались данные по реальному росту горнодобывающей промышленности, доле экспорта полезных ископаемых в общем объеме экспорта, реальному росту производства, развитию человеческого капитала, росту населения, запасам полезных ископаемых, развитию инфраструктуры, реальному росту объема оказываемых услуг, объемам торговли, а также открытости и росту прямых иностранных инвестиций. Результаты показали, что реальный рост производства, добычи полезных ископаемых, сферы услуг, а также развитие человеческого капитала, инфраструктуры, открытость торговли и рост прямых иностранных инвестиций являются факторами, определяющими экономический рост в регионе Южно-Африканских стран в период исследования. Гипотеза о ресурсном «проклятии» не подтвердилась. Сделан вывод, что в целях ускорения экономического роста странам Южно-Африканского региона целесообразно заниматься совершенствованием государственных институтов и нормативно-правовой базы для привлечения инвестиций в стратегический горнодобывающий сектор. Даны рекомендации по формированию государственной промышленной политики.

Для цитирования

Силима П.П., Назарова Ю.А. Влияние горнодобывающей промышленности на экономический рост в регионе Южно-Африканских стран // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 57–75. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-57-75>



The impact of the mining industry on economic growth in the countries of the Southern African region

Pedro Pinto Silima  , Yuliya A. Nazarova 

RUDN University, Moscow, Russian Federation

 silima2507@gmail.com

Article history

Received: January 7, 2023

Revised: March 14, 2023

Accepted: March 22, 2023

Keywords:

Southern African countries, natural resources, resource curse, Africa

Abstract. The authors investigate the relationship between the mining industry and economic growth in South African countries. The countries in the Southern African region are rich in natural resources, and in most of them, their mining industry extracts and exports natural resources with little industrial processing. The empirical methodology involved the use of ordinary least squares and generalized method of moments. The results are based on a dataset of twelve countries in the Southern African region from 2011 to 2020. The direct and indirect impacts of the mining industry in Southern African countries on their economic growth are analyzed. The economic growth model used data on real growth in the mining industry, the share of exports of minerals in total exports, real growth of manufacturing, human capital development, population growth, mineral resource endowments, infrastructure development, real growth in services, trade volumes, and openness and growth of foreign direct investment. Findings showed that real growth in the service sector, manufacturing, mining, human capital development, infrastructure development, trade openness, and growth in foreign direct investment are important determinants of economic growth in economies of the Southern African region during the study period. The resource curse hypothesis has not been confirmed. Therefore, to improve economic growth, it is advisable for countries in the Southern African region to improve their government institutions and regulatory frameworks to attract investment in the strategic mining sector. The recommendations are made regarding the formation of state industrial policies.

For citation

Silima PP, Nazarova YuA. The impact of the mining industry on economic growth in the countries of the Southern African region. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):57–75. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-57-75>

Введение

Все страны Южно-Африканского региона в целом богаты природными ресурсами. С момента европейской колонизации в XIX в. их экономика была сформирована в качестве добывающей, нацеленной на добычу этих ресурсов для обеспечения промышленности соответствующих мегаполисов сырьем. После обретения независимости и по настоящее время структура колониальной экономики не претерпела глубоких преобразований. Страны по-прежнему опираются на добывающие отрасли и экспорт сырья на международные рынки без создания продукции с высокой добавленной стоимостью. Следовательно, доходы стран Южно-Африканского региона от природных ресурсов – это доходы от

добычи и сбыта сырья без какой-либо промышленной переработки, что не приводит к положительным эффектам для других местных отраслей.

Горнодобывающая промышленность – отрасль стратегического значения в Южно-Африканском регионе. Здесь добывается большая часть мировых запасов хрома, ванадия, платины и алмазов, а также 36 % золота и 20 % кобальта [1]. Официальная добыча полезных ископаемых в регионе обеспечивает около 60 % валютных поступлений, 10 % ВВП и 5 % формальной занятости. Благодаря наличию в регионе месторождений угля, хромитов, золота, алмазов, платины и меди мирового класса горнодобывающий сектор сыграл важную роль в развитии инфраструктуры и стал ядром роста многих городов субрегиона [2].

В настоящем работе анализируется прямое и косвенное влияние добывающей промышленности на экономический рост в регионе Южно-Африканских стран. Цель исследования – проверить гипотезу о ресурсном «проклятии» и причинах его возникновения посредством проверки гипотезы конвергенции Солоу в регионе Южно-Африканских стран. Для этого разработана эконометрическая модель, основанная на панельных данных из двенадцати¹ стран Южно-Африканского региона за период с 2011 по 2020 г.

1. Методология исследования

В исследовании использовался набор панельных данных за период с 2011 по 2020 г. по двенадцати из шестнадцати стран Южно-Африканского региона: Ангола, Ботсвана, Демократическая Республика Конго, Эсватини, Лесото, Мадагаскар, Мозамбик, Намибия, Южная Африка, Объединенная Республика Танзания, Замбия и Зимбабве [3]. Союз Коморских островов, Малави, Маврикий и Сейшельские острова являются странами с меньшим потенциалом минеральных ресурсов и были исключены из-за недостаточности данных. Для анализа использовалась информация, полученная из онлайн-показателей мирового развития, базы данных Всемирной торговой организации (ВТО), Всемирного банка, показателей развития Африки (ADI), базы данных статистики торговли товарами Организации Объединенных Наций (UNCTS), Южно-Африканского сообщества развития (SADC/САДК) и базы данных статистики Организации Объединенных Наций (UNdata).

2. Прямое и косвенное влияние горнодобывающей промышленности на экономический рост в регионе Южно-Африканских стран

Следуя реконструктивным и неконструктивным аспектам, а также экономическому и институциональному анализу прямого и косвенного воздействия изобилия природных ресурсов на экономический рост, в [4] обнаружено, что природные ресурсы оказывают негативное влияние, если рассматривать их изолированно. Од-

нако они оказывали прямое положительное влияние, когда в модель включались другие объясняющие переменные, такие как коррупция, инвестиции, экономическая открытость, торговля и образование. Анализируя прямое влияние этих переменных на рост, обнаружено, что коррупция оказывает негативное влияние. Инвестиции, либерализация торговли и школьное образование оказали значительное положительное влияние, в то время как условия торговли – значительное негативное влияние. Изменение соотношения между ценой экспорта и ценой импорта привело к падению роста.

Экономика, характеризующаяся высокой долей инвестиций, высоким уровнем дохода на душу населения, меньшей открытостью, ухудшением условий торговли и более высоким уровнем образования, может иметь относительно высокие темпы роста. Анализ косвенного воздействия природных ресурсов показал, что природные ресурсы оказали значительное положительное влияние на коррупцию, условия торговли и инвестиции, но отрицательно повлияли на школьное образование [4].

Таким образом, в качестве причины распространения ресурсного «проклятия», коррупция оказала косвенное влияние, в то время как природные ресурсы оказали прямое положительное влияние на экономический рост. Инвестиции оказали негативное косвенное влияние. К международным факторам, влияющим на воздействие природных ресурсов, относятся степень открытости экономики и условия торговли; все они подверглись косвенному негативному влиянию природных ресурсов. Изобилие горнодобывающих ресурсов уменьшило экономические возможности и повлияло на условия торговли. Образование привело к почти вдвое большему эффекту, чем коррупция, в отличие от выводов о том, что коррупция оказала большее негативное влияние на экономический рост [5].

В [6] определены три альтернативных показателя изобилия ресурсов (запасы углеводородов на душу населения в 1993 г., оценки стоимости запасов на душу населения в 1970 г. и основные топливные и не топливные полезные ископаемые). Всемирный банк разработал индикаторы изобилия на 2000 г. На основе трех уравнений взяты такие факторы, как зависимость от ресурсов и рост на душу населения в качестве экзогенных переменных, и обнаружено, что ресурс-

¹ Ангола, Ботсвана, Демократическая Республика Конго, Эсватини, Лесото, Мадагаскар, Мозамбик, Намибия, Южная Африка, Объединенная Республика Танзания, Замбия и Зимбабве.

ное «проклятие» исчезает, когда включается зависимость от ресурсов и изобилие.

В [7] обнаружено, что запасы нефти положительно и существенно связаны с ресурсным «проклятием». Уравнение соотношения стоимости добычи нефти и ВВП также было статистически значимым. Во всех инструментальных уравнениях коэффициенты нефтяного богатства значимы. Предполагалось, что их результаты с меньшей вероятностью покажут, что нефть – это проклятие. Страны с нефтяными ресурсами, как правило, имеют относительно более высокий уровень ВВП. Оценка влияния мировых минеральных богатств на уровень ВВП на душу населения выявила, что обе переменные имеют положительные и значимые коэффициенты. Проверка гипотезы об институциональном качестве показала, что страны с более слабыми институтами больше выигрывали от природных ресурсов. На основе этих результатов сделан вывод о том, что страны с хорошими институтами, которые были богаты, как правило, меньше выигрывали от положительного воздействия природных ресурсов, в то время как страны со слабыми институтами, которые, как правило, были бедны, при отсутствии значительных природных ресурсов получали относительно большие выгоды из своих природных ресурсов. Таким образом, экономика Норвегии, например, не страдает при отсутствии нефти, а Кувейт может столкнуться с проблемами при истощении природных ресурсов [7].

Согласно [8], совокупный доход от природных ресурсов снижался, когда государственные учреждения поощряли воровство, и увеличивался, если государственная политика была дружественна по отношению к производителям.

В [9] подчеркивается, как финансовая поддержка других стран влияет на экономическое развитие. В [10] утверждается, что воздействие природных ресурсов отрицательное и значительное. При измерении косвенного воздействия природных ресурсов отмечено, что увеличение доли природных ресурсов в общем объеме экспорта привело к ухудшению институционального качества и снижению темпов роста. В целом некоторые природные ресурсы оказали сильное, надежное и негативное влияние на рост, тем самым подорвав институциональное качество. Как только влияние институтов было поставлено под

контроль, природные ресурсы оказали незначительное положительное влияние на экономический рост.

3. Ресурсное «проклятие» в глобальном контексте

Горная промышленность представляет собой широкий сегмент экономики, включающий около 6 тыс. компаний и 2,5 млн занятых по всему миру [11]. Различия в открытости увеличивают разницу в ВВП, а изобилие ресурсов оказывает положительное влияние на ВВП во многих странах, богатых минеральными ресурсами [11]. Качество институтов оказывает положительное, а в некоторых случаях и отрицательное влияние. Так, в [8] обнаружили, что человеческий капитал оказывает положительное (хотя и незначительное) влияние на рост в этих странах. Инвестиции оказали значительное влияние, в то время как тип колонизации оказал негативное и существенное влияние на рост. Два других аспекта, обсуждаемые в [8], связаны с идеей о том, что ресурсное «проклятие» – чисто африканский феномен. Обнаружено, что при исключении из выборки африканских стран коэффициенты переменных сохраняли свои знаки, хотя и с некоторым снижением их значений. Следовательно, данное явление не только африканское, и нет никаких доказательств систематических различий, которые отличают африканские и неафриканские страны.

В контексте португалоязычных африканских стран, таких как Мозамбик и Ангола, в [12] проанализировано влияние природных ресурсов на институты в Кабо-Верде, Сан-Томе и Принсипи. Исследование проведено в связи с объявлениями об открытии нефти в Сен-Томе и Принсипи в период с 1997 по 1999 г.

Когда речь идет об экономической деконструкции [5], можно также сослаться на [13]. Используя те же данные, что и [5], но вводя информацию о запасах капитала для оценки природного капитала в мире, в [13] оценили три уравнения модели. Объясняемой переменной был ВВП. Обнаружено, что в исходной модели обеспеченность ресурсами оказывала значительное и положительное влияние на ВВП, в то время как зависимость оказывала отрицательное и значительное влияние. В модели II и в уравнении роста они получили те же результаты, с той разницей, что коэффициент ресурсной обеспеченности

увеличился, а зависимость снизилась. В уравнении зависимости обеспеченность ресурсами оказала значительное и положительное влияние. Модель III показала, что рост обеспеченности ресурсами продолжал оказывать положительное и значительное влияние, а зависимость – отрицательное, но незначительное влияние.

Исследование [14], проведенное с использованием панельных данных из 56 стран в период с 1970 по 2000 г. показало, что источники и диффузные источники повлияли отрицательно, но незначительно на рост, обменный курс оказал небольшое положительное влияние, а условия торговли – значительное негативное влияние. Эти результаты свидетельствуют, что зависимость любого рода вредна для роста в развивающихся странах, и не согласуются с выводами [15], которые также различали точечные и диффузные источники.

Авторы использовали панельные данные по 28 китайским провинциям, применяя как зависимость, так и изобилие ресурсов, хотя различали изобилие ресурсов и доход от ресурсов. Доход в ресурсной модели измерялся с точки зрения добычи угля, нефти и природного газа. Мера изобилия ресурсов получена умножением добытых ресурсов на их средние рыночные цены. Зависимость от ресурсов измерялась отношением инвестиций в основные фонды горнодобывающей промышленности к инвестициям во все основные фонды. Использование разных моделей позволило обнаружить, что провинции с низким производством ресурсов показали слабую зависимость от них. Однако не все провинции с высокой степенью ресурсной зависимости были связаны с большим производством ресурсов. Эффект изобилия ресурсов и зависимости от ресурсов был противоположным. Изобилие ресурсов способствовало экономическому развитию, но чрезмерная зависимость от ресурсов тормозила рост [16].

Что касается зависимости от ресурсов в конкретных секторах, в [17] обнаружено, что бум в ресурсном секторе привел к положительным экономическим вторичным эффектам, увеличивая рост в секторах, которые не зависели от природных ресурсов. Когда из выборки были исключены Бруней, Кувейт и Саудовская Аравия, результаты остались положительными, но незначимыми. Так, согласно [17], в странах, богатых природными ресурсами, в период с 1970 по

1990 г. наблюдался быстрый рост в несырьевых секторах. Если рассматривать период с 1980 по 1990 г., падение цен на продукты в секторе имело незначительную корреляцию с ресурсной зависимостью, связь между зависимостью и ростом ресурсного сектора была отрицательной. Показатели ресурсного сектора в ресурсозависимых странах были слабыми, когда цены падали, но этот эффект отличался от ресурсного «проклятия». Ресурсное «проклятие» существует, когда сегодняшняя добыча природных ресурсов обеспечивает более низкий уровень доходов в будущем и может сдерживать рост в соответствующем секторе природных ресурсов.

Принимая во внимание [18], необходимо учитывать, что использование эмпирических данных для анализа воздействия природных ресурсов может привести к любому результату, поэтому следует обращать внимание на противоречивые результаты и работать с факторами, тесно связанными с ростом в развивающихся странах, путем совершенствования подхода к эндогенной зависимости.

4. Экономические последствия горнодобывающей промышленности в Южно-Африканских странах

Согласно [19], эмпирические исследования роли природных ресурсов в экономике были сосредоточены на проблеме ресурсного «проклятия» с использованием общих или конкретных причинно-следственных связей. Можно выделить три основные группы. В первой рассматриваются различные способы определения изобилия ресурсов или зависимости от них [20–22]. Вторая фокусируется на экономических факторах, связанных с ростом, на которые может повлиять богатство природных ресурсов. Третья группа ставит под сомнение справедливость ресурсного проклятия.

Согласно [19], ресурсная зависимость относится к степени, в которой страна зависит от природных ресурсов. Но процентный уровень этой зависимости авторы точно не определяют. Страна, обладающая богатыми ресурсами, может не зависеть от ресурсов, если она диверсифицирует структуру своего производства. Изобилие природных ресурсов измеряется оценкой природных ресурсов на душу населения, а зависимость от природных ресурсов измеряется отношением экспорта природных ресурсов к ВВП.

Для стран, которые зависят от доходов от природных ресурсов, зависимость от ресурсов варьируется от 4,9 до 86,0 %. Зависимость также можно определить, изучив состав экспорта страны, где природные ресурсы составляют 60,0–95,0 % от общего объема экспорта. МВФ берет среднюю долю доходов страны от природных ресурсов за несколько лет [19].

Принимая во внимание эти аспекты, определялось, были ли страны Южно-Африканского региона зависимы от ресурсов в период исследования (2011–2020 гг.). Установлено, что в среднем страной, которая предлагала более высокую доходность в процентах от ВВП, был Мадагаскар с 21,6, за ним следует Мозамбик – 15,01; Зимбабве – 11,56; Демократическая Республика Конго – 10,28; Танзания – 7,2; Намибия – 3,83; Малави – 2,06; Замбия – 2,19; Эсватини – 1,7 и Лесото со средним показателем 1,285. Следовательно, можно сделать вывод, что в одних странах экономика значительно зависит от горнодобывающих ресурсов, а в других – не так сильно, так как

их экономика диверсифицирована. В табл. 1–3 приведены данные о вкладе горнодобывающей промышленности в экономику государств – членов Южно-Африканского региона за период 2011–2020 гг.: ВВП в текущих ценах, годовые реальные темпы роста, %; ВВП по видам экономической деятельности в текущих ценах, млн долл. США; ВВП горнодобывающей промышленности в текущих ценах, годовые реальные темпы роста, %.

Во многих исследованиях обосновывается вывод о необходимости привлечения прямых иностранных инвестиций (ПИИ) для развития и модернизации экономики африканских государств и их интеграции в мировое хозяйство [23]. Например, в 2019 г. объем внутри африканского экспорта ЮАР составил 26 млрд долл. (27 % всего экспорта). При этом 12 % внутри африканского экспорта ЮАР (3 % мирового экспорта Южной Африки) приходится на африканские страны, не являющиеся членами Южно-Африканского региона [24].

Таблица 1

ВВП в текущих ценах, годовые реальные темпы роста в государствах – членах Южно-Африканского региона, %, за период 2011–2020 гг. [3]

| Государства | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Ангола | 3,5 | 8,5 | 5,0 | 4,8 | 0,9 | -2,6 | -0,1 | -2,0 | -0,6 | -5,2 |
| Ботсвана | 6,0 | 4,5 | 9,9 | 3,2 | -1,7 | 7,0 | 4,0 | 4,0 | 3,0 | -8,5 |
| Коморы | 4,1 | 3,2 | 4,5 | 2,1 | 1,1 | 3,3 | 3,8 | 3,6 | 1,8 | -0,1 |
| Демократическая Республика Конго | 6,9 | 7,1 | 8,5 | 9,5 | 6,9 | 2,4 | 3,7 | 5,8 | 4,4 | 1,7 |
| Эсватини | 2,2 | 5,4 | 3,9 | 0,9 | 2,2 | 1,1 | 2,0 | 2,4 | 2,6 | -1,9 |
| Лесото | 4,6 | 6,3 | 1,8 | 1,7 | 3,1 | 3,6 | -3,2 | -1,2 | -0,4 | -11,1 |
| Мадагаскар | 1,6 | 3,0 | 2,3 | 3,3 | 3,1 | 4,0 | 3,9 | 3,2 | 4,4 | -7,1 |
| Малави | 4,9 | -0,6 | 6,3 | 6,2 | 3,3 | 2,7 | 5,2 | 3,9 | 5,2 | 0,9 |
| Маврикий | 4,1 | 3,5 | 3,4 | 3,7 | 3,6 | 3,8 | 3,8 | 3,8 | 3,0 | -14,9 |
| Мозамбик | 7,4 | 7,3 | 7,0 | 7,4 | 6,7 | 3,8 | 3,7 | 3,4 | 2,3 | -1,2 |
| Намибия | 5,1 | 5,1 | 5,6 | 6,1 | 4,3 | 0,0 | -1,0 | 1,1 | -0,6 | -8,0 |
| Сейшелы | 5,4 | 3,7 | 6,0 | 4,5 | 4,9 | 4,6 | 4,7 | 1,8 | 1,2 | -10,8 |
| Южная Африка | 3,2 | 2,4 | 2,5 | 1,4 | 1,3 | 0,7 | 1,2 | 1,5 | 0,1 | -6,4 |
| Танзания | 7,9 | 5,1 | 6,8 | 6,7 | 6,2 | 6,9 | 6,8 | 7,0 | 7,0 | 4,8 |
| Замбия | 5,6 | 7,6 | 5,1 | 4,7 | 2,9 | 3,8 | 3,5 | 4,0 | 1,4 | -3,0 |
| Зимбабве | 14,2 | 16,7 | 2,0 | 2,4 | 1,8 | 0,8 | 4,7 | 4,8 | -8,4 | 5,3 |
| Всего | 4,2 | 4,3 | 3,9 | 3,2 | 2,2 | 1,4 | 2,1 | 2,2 | 1,2 | -4,5 |

Table 1

**GDP at current prices, annual real growth rates in the member states
of the Southern African region, %, for the period 2011–2020 [3]**

| States | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| Angola | 3.5 | 8.5 | 5.0 | 4.8 | 0.9 | -2.6 | -0.1 | -2.0 | -0.06 | -5.2 |
| Botswana | 6.0 | 4.5 | 9.9 | 3.2 | -1.7 | 7.0 | 4.0 | 4.0 | 3.0 | -8.5 |
| Comoros | 4.1 | 3.2 | 4.5 | 2.1 | 1.1 | 3.3 | 3.8 | 3.6 | 1.8 | -0.1 |
| Democratic Republic of the Congo | 6.9 | 7.1 | 8,5 | 9.5 | 6.9 | 2.4 | 3.7 | 5.8 | 4.4 | 1.7 |
| Eswatini | 2.2 | 5.4 | 3.9 | 0.9 | 2.2 | 1.1 | 2.0 | 2.4 | 2.6 | -1.9 |
| Lesotho | 4.6 | 6.3 | 1.8 | 1.7 | 3.1 | 3.6 | -3.2 | -1.2 | -0.4 | -11.1 |
| Madagascar | 1.6 | 3.0 | 2.3 | 3.3 | 3.1 | 4.0 | 3.9 | 3.2 | 4.4 | -7.1 |
| Malawi | 4.9 | -0.6 | 6.3 | 6.2 | 3.3 | 2.7 | 5.2 | 3.9 | 5.2 | 0.9 |
| Mauritius | 4.1 | 3.5 | 3.4 | 3.7 | 3.6 | 3.8 | 3.8 | 3.8 | 3.0 | -14.9 |
| Mozambique | 7.4 | 7.3 | 7.0 | 7.4 | 6.7 | 3.8 | 3.7 | 3.4 | 2.3 | -1.2 |
| Namibia | 5.1 | 5.1 | 5.6 | 6.1 | 4.3 | 0.0 | -1.0 | 1.1 | -0.6 | -8.0 |
| Seychelles | 5.4 | 3.7 | 6.0 | 4.5 | 4.9 | 4.6 | 4.7 | 1.8 | 1.2 | -10.8 |
| South Africa | 3.2 | 2.4 | 2.5 | 1.4 | 1.3 | 0.7 | 1.2 | 1.5 | 0.1 | -6.4 |
| Tanzania | 7.9 | 5.1 | 6.8 | 6.7 | 6.2 | 6.9 | 6.8 | 7.0 | 7.0 | 4.8 |
| Zambia | 5.6 | 7.6 | 5.1 | 4.7 | 2.9 | 3.8 | 3.5 | 4.0 | 1.4 | -3.0 |
| Zimbabwe | 14.2 | 16.7 | 2.0 | 2.4 | 1.8 | 0.8 | 4.7 | 4.8 | -8.4 | 5.3 |
| Total | 4.2 | 4.3 | 3.9 | 3.2 | 2.2 | 1.4 | 2.1 | 2.2 | 1.2 | -4.5 |

Таблица 2

**Доля ВВП по видам экономической деятельности в основных ценах,
всего государства – члены Южно-Африканского региона, %, за период 2011–2020 гг. [3]**

| Описание товара | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Сельское хозяйство, лесное хозяйство и рыболовство | 6,7 | 6,9 | 7,2 | 7,8 | 8,3 | 8,8 | 8,7 | 8,3 | 8,4 | 9,4 |
| Добыча полезных ископаемых | 13,6 | 13,7 | 13,4 | 12,1 | 10,1 | 9,9 | 9,9 | 11,1 | 10,5 | 11,4 |
| Производство | 11,9 | 11,6 | 11,3 | 11,4 | 11,8 | 12,2 | 1,2 | 12,1 | 12,5 | 11,9 |
| Электричество, газ, пар и кондиционирование воздуха, водоснабжение, канализация, управление отходами и восстановительные работы | 2,0 | 2,2 | 2,2 | 2,2 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| Строительство | 4,8 | 5,5 | 6,0 | 6,4 | 6,3 | 6,3 | 6,3 | 5,9 | 6,0 | 6,0 |
| Оптовая и розничная торговля, транспортно-складская деятельность, услуги по размещению и общественному питанию | 19,4 | 19,9 | 20,6 | 21,4 | 21,3 | 2,1 | 21,2 | 20,6 | 20,5 | 19,6 |
| Информация и коммуникация | 3,3 | 3,0 | 3,0 | 2,9 | 2,9 | 2,6 | 2,5 | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| Финансовая и страховая деятельность | 5,7 | 5,4 | 5,3 | 5,1 | 5,5 | 5,6 | 5,6 | 5,7 | 5,9 | 5,8 |
| Операции с недвижимостью, профессиональная, научная, техническая, административная и вспомогательная деятельность | 12,9 | 12,3 | 11,7 | 11,4 | 11,6 | 11,6 | 11,9 | 12,0 | 12,1 | 12,0 |
| Государственное управление и оборона, образование, здравоохранение и социальная работа | 18,6 | 18,4 | 18,2 | 18,3 | 18,9 | 18,5 | 18,5 | 18,6 | 18,3 | 18,1 |
| Другая деятельность по обслуживанию | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,1 | 1,3 | 1,3 | 1,3 |
| ВВП в базовых ценах | 100,0 |

Table 2

**Share of GDP by type of economic activity at basic prices, total member states
of the Southern African region, %, for the period 2011–2020 [3]**

| Item description | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Agriculture, forestry and fishing | 6.7 | 6.9 | 7.2 | 7.8 | 8.3 | 8.8 | 8.7 | 8.3 | 8.4 | 9.4 |
| Mining and quarrying | 13.6 | 13.7 | 13.4 | 12.1 | 10.1 | 9.9 | 9.9 | 11.1 | 10.5 | 11.4 |
| Manufacturing | 11.9 | 11.6 | 11.3 | 11.4 | 11.8 | 12.2 | 1.2 | 12.1 | 12.5 | 11.9 |
| Electricity, gas, steam and air conditioning supply, water supply, sewerage, waste management and remediation activities | 2.0 | 2.2 | 2.2 | 2.2 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 | 2.3 |
| Construction | 4.8 | 5.5 | 6.0 | 6.4 | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 5.9 | 6.0 | 6.0 |
| Wholesale and retail trade, transportation and storage, accommodation and food service activities | 19.4 | 19.9 | 20.6 | 21.4 | 21.3 | 2.1 | 21.2 | 20.6 | 20.5 | 19.6 |
| Information and communication | 3.3 | 3.0 | 3.0 | 2.9 | 2.9 | 2.6 | 2.5 | 2.3 | 2.3 | 2.3 |
| Financial and insurance activities | 5.7 | 5.4 | 5.3 | 5.1 | 5.5 | 5.6 | 5.6 | 5.7 | 5.9 | 5.8 |
| Real estate activities, professional, scientific, technical, administrative and support service activities | 12.9 | 12.3 | 11.7 | 11.4 | 11.6 | 11.6 | 11.9 | 12.0 | 12.1 | 12.0 |
| Public administration and defence, education, human health and social work activities | 18.6 | 18.4 | 18.2 | 18.3 | 18.9 | 18.5 | 18.5 | 18.6 | 18.3 | 18.1 |
| Other service activities | 1.1 | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.1 | 1.3 | 1.3 | 1.3 |
| GDP at basic prices | 100.0 |

Таблица 3

**ВВП в текущих ценах – добыча полезных ископаемых, годовые реальные темпы роста
в государствах – членах Южно-Африканского региона, %, за период 2011–2020 гг. [3]**

| Государства | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Ангола | -5,2 | 8,5 | -0,9 | -2,5 | 11,1 | -2,7 | -5,3 | -9,8 | -6,5 | -8,2 |
| Ботсвана | -6,5 | -5,8 | 24,2 | 0,5 | -15,3 | 0,3 | 6,3 | 8,4 | -3,7 | -26,5 |
| Коморы | 8,0 | -5,0 | -15,7 | 2,7 | 0,5 | 7,1 | -10,0 | -6,4 | 2,2 | -1,0 |
| Демократическая Республика Конго | 23,9 | 9,8 | 10,2 | 19,3 | 4,8 | -0,7 | 7,9 | 16,9 | 0,9 | 9,8 |
| Эсватини | 66,2 | 64,4 | 24,1 | -49,3 | -86,3 | 9,7 | 8,0 | -26,5 | -18,3 | 25,0 |
| Лесото | 43,6 | -0,7 | -30,3 | 9,1 | -14,3 | 0,0 | 14,1 | -9,4 | 0,7 | 1,3 |
| Мадагаскар | 2,3 | 57,8 | 164,9 | 14,7 | 12,4 | 2,9 | 10,2 | -1,8 | 9,8 | -57,2 |
| Малави | 1,4 | 5,3 | 6,9 | -4,6 | 1,1 | 0,4 | 1,6 | 2,3 | 3,9 | 2,3 |
| Маврикий | -18,9 | -8,3 | -4,6 | -2,5 | -3,4 | 0,4 | 1,5 | 2,1 | 3,3 | -16,6 |
| Мозамбик | 31,2 | 28,5 | 11,9 | 19,6 | 19,3 | 13,9 | 32,1 | 11,3 | -2,6 | -15,1 |
| Намибия | -5,6 | 24,6 | 3,2 | -4,5 | 4,0 | 10,7 | 14,2 | 16,1 | -9,5 | -14,9 |
| Сейшелы | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| Южная Африка | -0,7 | -2,9 | 4,0 | -1,5 | 4,8 | -3,4 | 2,4 | -0,8 | -1,1 | -11,9 |
| Танзания | 6,1 | 6,7 | 4,5 | 6,4 | 10,0 | 7,4 | 5,3 | 1,5 | 17,7 | 6,7 |
| Замбия | 0,1 | 0,8 | 3,6 | -2,3 | 0,2 | 7,3 | 3,0 | 6,3 | -5,1 | 8,0 |
| Зимбабве | 24,4 | 8,0 | 11,7 | -3,4 | 0,4 | 4,1 | 3,5 | 8,7 | 67,2 | -9,0 |
| Всего | -1,2 | 4,4 | 3,7 | 00 | 6,4 | -1,6 | 0,2 | -1,7 | -1,2 | -7,4 |

Table 3

GDP at current prices – mining, annual real growth rates in the member states of the Southern African region, %, for the period 2011–2020 [3]

| States | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 |
|----------------------------------|-------------|------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Angola | -5.2 | 8.5 | -0.9 | -2.5 | 11.1 | -2.7 | -5.3 | -9.8 | -6.5 | -8.2 |
| Botswana | -6.5 | -5.8 | 24.2 | 0.5 | -15.3 | 0.3 | 6.3 | 8.4 | -3.7 | -26.5 |
| Comoros | 8.0 | -5.0 | -15.7 | 2.7 | 0.5 | 7.1 | -10.0 | -6.4 | 2.2 | -1.0 |
| Democratic Republic of the Congo | 23.9 | 9.8 | 10.2 | 19.3 | 4.8 | -0.7 | 7.9 | 16.9 | 0.9 | 9.8 |
| Eswatini | 66.2 | 64.4 | 24.1 | -49.3 | -86.3 | 9.7 | 8.0 | -26.5 | -18.3 | 25.0 |
| Lesotho | 43.6 | -0.7 | -30.3 | 9.1 | -14.3 | 0.0 | 14.1 | -9.4 | 0.7 | 1.3 |
| Madagascar | 2.3 | 57.8 | 164.9 | 14.7 | 12.4 | 2.9 | 10.2 | -1.8 | 9.8 | -57.2 |
| Malawi | 1.4 | 5.3 | 6.9 | -4.6 | 1.1 | 0.4 | 1.6 | 2.3 | 3.9 | 2.3 |
| Mauritius | -18.9 | -8.3 | -4.6 | -2.5 | -3.4 | 0.4 | 1.5 | 2.1 | 3.3 | -16.6 |
| Mozambique | 31.2 | 28.5 | 11.9 | 19.6 | 19.3 | 13.9 | 32.1 | 11.3 | -2.6 | -15.1 |
| Namibia | -5.6 | 24.6 | 3.2 | -4.5 | 4.0 | 10.7 | 14.2 | 16.1 | -9.5 | -14.9 |
| Seychelles | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| South Africa | -0.7 | -2.9 | 4.0 | -1.5 | 4.8 | -3.4 | 2.4 | -0.8 | -1.1 | -11.9 |
| Tanzania | 6.1 | 6.7 | 4.5 | 6.4 | 10.0 | 7.4 | 5.3 | 1.5 | 17.7 | 6.7 |
| Zambia | 0.1 | 0.8 | 3.6 | -2.3 | 0.2 | 7.3 | 3.0 | 6.3 | -5.1 | 8.0 |
| Zimbabwe | 24.4 | 8.0 | 11.7 | -3.4 | 0.4 | 4.1 | 3.5 | 8.7 | 67.2 | -9.0 |
| Total | -1.2 | 4.4 | 3.7 | 00 | 6.4 | -1.6 | 0.2 | -1.7 | -1.2 | -7.4 |

4.1. Методы и эконометрическая модель

Для анализа экономического воздействия добывающей промышленности в регионе Южно-Африканских стран была разработана эконометрическая модель в трех уравнениях с учетом эндогенности. Уравнение (1) оценивает прямое воздействие горнодобывающей промышленности на ВВП. Уравнение (2) оценивает косвенное воздействие горнодобывающей промышленности на основные экономические переменные, влияющие на экономику; они также используются в качестве управляющих переменных в уравнении (1). Уравнение (3) оценивает степень, в которой те же самые переменные могут обратно воздействовать на саму горнодобывающую промышленность. Следовательно, уравнения (2) и (3) оценивают возможные каналы передачи ресурсного проклятия, которые негативно влияют на горнодобывающую промышленность. Три уравнения:

$$\ln \text{GDP}_{it} = \beta_1 \text{EXMIND}_{it} + \sum \beta_j X_{jit} \mu_i + \varepsilon_{it}, \quad (1)$$

где $\ln \text{GDP}$ – логарифм ВВП на душу населения; EXMININD – горнодобывающая промышленность; X – вектор переменных, объясняющих колебания ВВП; β – коэффициенты, подлежащие оцен-

ке; i – единица анализа; t – период времени; μ – страновые эффекты; ε – член случайной ошибки.

Вектор X состоит из переменных: обрабатывающая промышленность (MANIND), развитие человеческого капитала (HCD), колониальное прошлое (COLON), государственные расходы (GOV), экономическая открытость (ECOPEN), обменный курс (EXRATE), уровень инфляции (INFRATE).

$$X_{it} = \delta_1 \ln \text{GDP}_{it} + \sum \delta_j X_{jit} \mu_i + \varepsilon_{it}, \quad (2)$$

где X – вектор переменных, на которые может повлиять добывающая промышленность; Z – набор переменных, которые влияют на рост и могут влиять на переменные X ; α – вектор неизвестных коэффициентов, подлежащих оценке; векторы X и Z состоят из переменных X в уравнении (1) минус переменная COLON .

$$\text{EXMIND}_{it} = \delta_1 \ln \text{GDP}_{it} + \sum \delta_j X_{jit} \mu_i + \varepsilon_{it}, \quad (3)$$

где δ – вектор неизвестных коэффициентов, подлежащих оценке; термин ε и нижние индексы i и t определены, как и ранее.

Таблица 4

Мера конструкторов (зависимая и независимая переменная)

| Переменная | Мера |
|-------------------|---|
| GDP | Реальный уровень ВВП на душу населения (ВВП по ППС) [26] |
| RGM | Реальный рост добычи [20] |
| SMEE | Доля экспорта полезных ископаемых в общем объеме экспорта [27] |
| RGA | Реальный рост сельского хозяйства [20] |
| RGMAN | Реальный рост производства [20] |
| HCD | Развитие человеческого капитала, измеряемое соотношением средних и высших учебных заведений приписки к населению [26; 28] |
| PG | Рост населения [28] |
| AR | Авторегрессии |
| MRE | Обеспеченность минеральными ресурсами [26] |
| IDEV | Развитие инфраструктуры [29] |
| RGS | Реальный рост в сфере услуг [26] |
| TOP | Открытость торговли: отношение торговли товарами к ВВП, % [30; 31] |
| GFDI | Рост прямых иностранных инвестиций [26] |
| EXIND | Горнодобывающая промышленность |
| GOV | Государственные расходы |
| MANIND | Обрабатывающая промышленность |
| COLON | Колониальное прошлое |
| ECOPEN | Экономическая открытость |
| EXRATE | Обменный курс |
| INFRATE | Уровень инфляции |
| VECM | векторная ошибка исправление |
| ARDL | авто регрессионный распределенный лаг |

Table 4

The measure of constructs (dependent and explanatory variable)

| Variable | Measure |
|-----------------|---|
| GDP | Real level of GDP per capita (GDP_PPP) [26] |
| RGM | Real growth of mining [20] |
| SMEE | Share of mineral exports to total exports [27] |
| RGA | Real growth of agriculture [20] |
| RGMAN | Real growth of manufacturing [20] |
| HCD | Human capital development, measured by the ratio of secondary and tertiary institution enrolment in the population [26; 28] |
| PG | Population growth [28] |
| AR | Autoregressive |
| MRE | Mineral resources endowment [26] |
| IDEV | Infrastructure development [29] |
| RGS | Real growth in services [26] |
| TOP | Trade openness: ratio of merchandise trade to GDP, % [30; 31] |
| GFDI | Growth of foreign direct investment [26] |
| EXIND | The extractive industry |
| GOV | Government expenditure |
| MANIND | Manufacturing industry |
| COLON | Colonial past |
| ECOPEN | Economic openness |
| EXRATE | Exchange rate |
| INFRATE | The inflation rate |
| VECM | Vector error correction |
| ARDL | Autoregressive distributed lag |

Для уравнений (1, 2, 3) $i = 1 \dots N$; $t = 1 \dots T$. $N = 12$ стран, $T = 11$ лет. Таким образом, общее количество наблюдений в модели: $12 \times 11 = 132$. Коэффициенты α , β , δ оценены с использованием моделей с фиксированными и случайными эффектами, а также выполнен тест Хаусмана [25], чтобы проверить, какая из моделей лучше соответствует данным.

4.2. Данные и определение переменных

Данные получены из индикаторов мирового развития (WDI). Переменный ВВП измеряется в расчете на душу населения. Переменная горнодобывающая промышленность (EXIND) измеряется доходом от полезных ископаемых в процентах от ВВП. Индикаторы мирового развития определяет доход от добычи полезных ископаемых как разницу между стоимостью производства и общими затратами на производство. Среди минералов, включенных в расчет, олово, золото, свинец, цинк, железо, медь, никель, серебро, бокситы и фосфаты и т. д. В исследование не включены доходы от ископаемого топлива (нефть, газ и уголь). Переменный человеческий капитал (HCD) измеряется с точки зрения зачисления на третий уровень в процентах от валового зачисления. Исследование включает фиктивную переменную (COLON) для колониального прошлого, определяемого как португальская колония (0) или английская колония (1). Эта переменная отражает идею о том, что колониальное прошлое влияет на экономический рост и производительность горнодобывающей промышленности. Утверждается, что бывшие колонии стран с демократическими институтами, таких как Англия, могут иметь устойчивый рост, а горнодобывающая промышленность может работать хорошо.

Переменные государственные расходы (GOV) измеряются в терминах расходов правительства на конечное потребление. Сюда входит оборона и безопасность, но не военные расходы. Переменная экономическая открытость (ECOPEN) измеряется отношением суммы внешней торговли к ВВП. Переменная EXRATE представляет собой реальный обменный курс по отношению к доллару США, рассчитанный как среднегодовой. Инфляция (INFRATE) измеряется годовым темпом роста неявного дефлектора ВВП, показывающего скорость изменения цен в экономике в целом.

В табл. 5 представлена сводная статистика данных. Это также показывает, что панель сбалансирована и состоит из 132 наблюдений. Большинство переменных демонстрируют большие разбросы по странам и во времени. С точки зрения нормальности все переменные представляют нулевой эксцесс (0) и ненулевую асимметрию (0), что указывает на отсутствие нормального распределения. Что касается эксцесса, все переменные лептокуртические, за исключением ВВП, который является плетикуртным. Что касается асимметрии, за исключением переменной COLON, которая имеет длинный хвост слева, все остальные переменные имеют хвост справа. С точки зрения показателей центральной тенденции и дисперсии ВВП представляет собой наивысшее среднее значение, поскольку все остальные переменные выражаются в процентах от ВВП, а переменная COLON является фиктивной.

В табл. 6 представлена корреляционная матрица, которая показывает, что регрессоры не имеют идеальных отношений. Это предполагает, что нет признаков серьезной коллинеарности между объясняющими переменными и последующими рисками смешанных эффектов.

Таблица 5

Сводная статистика данных, $N = 132$

| Переменные | Среднее значение | Стандартное отклонение | Минимум | Максимум | Показатель асимметрии | Показатель эксцесса |
|------------|------------------|------------------------|---------|----------|-----------------------|---------------------|
| GDP | 2382,143 | 2153,083 | 284,21 | 6432,30 | 0,432 | 1,450 |
| EXIND | 9,543 | 9,835 | 0,42 | 49,43 | 1,292 | 9,037 |
| MANIND | 10,453 | 8,673 | 3,24 | 29,32 | 1,432 | 5,032 |
| HCD | 6,534 | 5,785 | 0,34 | 26,33 | 1,210 | 2,843 |
| COLON | 0,783 | 0,348 | 0,00 | 1,00 | -1,232 | 2,532 |
| GOV | 21,648 | 14,342 | 1,84 | 78,59 | 1,673 | 10,210 |
| ECOPEN | 0,741 | 0,231 | 0,05 | 1,87 | 0,301 | 2,942 |
| EXRATE | 266,000 | 863,362 | 1,58 | 8643,47 | 5,321 | 52,432 |
| INFRATE | 102,642 | 41,342 | 41,27 | 253,17 | 1,219 | 10,354 |

Table 5

Summary statistics of the data, $N = 132$

| Variable | Mean | Standard deviations | Minimum | Maximum | Skewness | Kurtosis |
|----------|----------|---------------------|---------|---------|----------|----------|
| GDP | 2382.143 | 2153.083 | 284.21 | 6432.30 | 0.432 | 1.450 |
| EXIND | 9.543 | 9.835 | 0.42 | 49.43 | 1.292 | 9.037 |
| MANIND | 10.453 | 8.673 | 3.24 | 29.32 | 1.432 | 5.032 |
| HCD | 6.534 | 5.785 | 0.34 | 26.33 | 1.210 | 2.843 |
| COLON | 0.783 | 0.348 | 0.00 | 1.00 | -1.232 | 2.532 |
| GOV | 21.648 | 14.342 | 1.84 | 78.59 | 1.673 | 10.210 |
| ECOPEN | 0.741 | 0.231 | 0.05 | 1.87 | 0.301 | 2,942 |
| EXRATE | 266.000 | 863.362 | 1.58 | 8643.47 | 5.321 | 52.432 |
| INFRATE | 102.642 | 41.342 | 41.27 | 253.17 | 1.219 | 10.354 |

Табл. 7 показывает, что переменные \ln GDP, EXIND и GOV являются стационарными на уровне. Переменные MANIND, HCD, EXRATE и INFRATE имеют унитарный корень, но являются стационарными по первой разности. Переменная ECOPEN – единственная стационарная во второй разности. Существование переменной с единичным корнем, стационар-

ной только во второй разности, делает непрактичной разработку динамической модели с точки зрения авторегрессии (AR), векторной коррекции ошибок (VECM) или авторегрессии с распределенным запаздыванием (ARDL). Итак, предполагается, что модель статических панельных данных является подходящим методом оценки.

Таблица 6 / Table 6

Корреляционная матрица данных, $N = 132$
Correlation matrix of the data, $N = 132$

| Переменные / Variable | EXIND | MANIND | HCD | COLON | GOV | ECOPEN | EXRATE | INFRATE |
|-----------------------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|---------|
| EXIND | 1,000 | | | | | | | |
| MANIND | -0,372 | 1,000 | | | | | | |
| HCD | -0,226 | -0,116 | 1,000 | | | | | |
| COLON | -0,399 | 0,217 | 0,117 | 1,000 | | | | |
| GOV | -0,112 | 0,002 | -0,122 | 0,067 | 1,000 | | | |
| ECOPEN | 0,012 | 0,123 | 0,042 | -0,312 | 0,402 | 1,000 | | |
| EXRATE | 0,011 | -0,101 | -0,143 | 0,013 | 0,014 | -0,072 | 1,000 | |
| INFRATE | -0,012 | -0,121 | 0,032 | -0,013 | 0,321 | 0,217 | 0,216 | 1,000 |

Таблица 7

Анализ стационарности данных

| Переменные | $P(t)$ | $P(t)$ -значение | $P(t)-1$ | $P(t)$ -значение | $P(t)-2$ | $P(t)$ -значение | Порядок интеграции, 5 % |
|------------|--------|------------------|----------|------------------|----------|------------------|-------------------------|
| \ln GDP | 32,427 | 0,023 | - | - | - | - | I(0) |
| EXIND | 46,038 | 0,001 | - | - | - | - | I(0) |
| MANIND | 21,431 | 0,324 | 52,243 | 0,001 | - | - | I(1) |
| HCD | 6,327 | 0,662 | 73,122 | 0,000 | - | - | I(1) |
| GOV | 44,125 | 0,003 | - | - | - | - | I(0) |
| ECOPEN | 19,232 | 0,144 | 27,231 | 0,132 | 72,06 | 0,00 | I(2) |
| EXRATE | 4,342 | 0,821 | 36,413 | 0,023 | - | - | I(1) |
| INFRATE | 2,634 | 1,000 | 42,132 | 0,006 | - | - | I(1) |

Table 7

Stationarity analysis of the data

| Variable | $P(t)$ | $P(t)$ -value | $P(t)$ -1 | $P(t)$ -value | $P(t)$ -2 | $P(t)$ -value | Order of integration, 5% |
|----------|--------|---------------|-----------|---------------|-----------|---------------|--------------------------|
| lnGDP | 32.427 | 0.023 | – | – | – | – | I(0) |
| EXIND | 46.038 | 0.001 | – | – | – | – | I(0) |
| MANIND | 21.431 | 0.324 | 52.243 | 0.001 | – | – | I(1) |
| HCD | 6.327 | 0.662 | 73.122 | 0.000 | – | – | I(1) |
| GOV | 44.125 | 0.003 | – | – | – | – | I(0) |
| ECOPEN | 19.232 | 0.144 | 27.231 | 0.132 | 72.06 | 0.00 | I(2) |
| EXRATE | 4.342 | 0.821 | 36.413 | 0.023 | – | – | I(1) |
| INFRATE | 2.634 | 1.000 | 42.132 | 0.006 | – | – | I(1) |

4.3. Анализ результатов оценки

В табл. 8 приведены результаты оценки модели 1 с использованием моделей фиксированных и случайных эффектов.

Табл. 8 показывает, что существует определенная закономерность результатов при использовании обоих методов. Статистика F -критерия для модели с фиксированными эффектами и критерия Вальда для модели со случайными эффектами статистически значима на пятипроцентном уровне значимости. Это демонстрирует, насколько хороши характеристики двух моделей. Чтобы определить, какая модель лучше, проведен тест Хаусмана [25]. Результаты приведены в табл. 9.

Табл. 9 показывает, что статистика критерия χ_2 статистически незначима при пятипроцент-

ном уровне значимости. Таким образом, мы не отвергаем нулевую гипотезу о том, что метод случайных эффектов подходит для оценки модели. Индивидуальные эффекты и объясняющие переменные не коррелированы. Результаты теста для выбора между объединенным методом наименьших квадратов и методом случайных эффектов приведены в табл. 10.

Согласно результатам из табл. 10, можно отклонить нулевую гипотезу о том, что объединенная модель подходит, в пользу альтернативной гипотезы о том, что модель случайных эффектов является наиболее подходящей. Следовательно, наш анализ основан на модели случайных эффектов в ущерб моделям объединенных и фиксированных эффектов.

Таблица 8

Результаты оценки фиксированных и случайных эффектов, зависимая переменная lnGDP

| Экзогенная переменная | Фиксированные эффекты | Случайные эффекты |
|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| EXIND | –0,004* [0,002] | –0,004* [0,002] |
| DMANIND | 0,003 [0,004] | 0,003 [0,004] |
| DHCD | –0,012 [0,003] | –0,002 [0,003] |
| COLON | 0,000 [опущен] | 0,280 [1,044] |
| GOV | 0,041* [0,001] | 0,041* [0,001] |
| DECOPEN | –0,060** [0,021] | –0,060** [0,021] |
| DEXRATE | 0,000 [0,000] | 0,000 [0,000] |
| DINFRATE | –0,001 [0,001] | –0,001 [0,001] |

Примечание. Цифры в квадратных скобках являются стандартными ошибками. Цифры в скобках — это p -значения. * – значимо при пятипроцентном уровне значимости; ** – значимо при десятипроцентном уровне значимости. D указывают, что переменная измеряется как изменения.

Table 8

Fixed and random effects estimation results, dependent variable lnGDP

| Exogenous variable | Fixed effects | Random effects |
|--------------------|---------------------|---------------------|
| EXIND | -0.004* [0.002] | -0.004* [0.002] |
| DMANIND | 0.003 [0.004] | 0.003 [0.004] |
| DHCD | -0.012 [0.003] | -0.002 [0.003] |
| COLON | 0.000 [lowered] | 0.280 [1.044] |
| GOV | 0.041* [0.001] | 0.041* [0.001] |
| DECOPEM | -0.060** [0.021] | -0.060** [0.021] |
| DEXRATE | 0.000 [0.000] | 0.000 [0.000] |
| DINFRATE | -0.001 [0.001] | -0.001 [0.001] |

Note. The numbers in square brackets are standard errors. The numbers in brackets are *p*-values. * – significant at 5% significance level; ** – significant at 10% significance level. *D* indicate that the variable is measured as changes.

Таблица 9

Результаты теста Хаусмана

| Экзогенные переменные | Фиксированный эффект | Случайный эффект | (b-B) разница | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
|-----------------------|----------------------|------------------|-----------------------|--------------------------|
| MANIND | -0,004 | -0,003 | 0,00 | 0,00 |
| DMANIND | 0,003 | 0,003 | 0,00 | 0,01 |
| DHCD | -0,002 | -0,002 | 0,00 | 0,01 |
| COLON | – | – | – | – |
| GOV | 0,041 | 0,041 | 0,00 | 0,00 |
| DDECOPEM | -0,060 | -0,060 | 0,00 | 0,06 |
| DEXRATE | 0,000 | 0,000 | 2,21e ⁻⁰⁷ | 1,04 ⁻⁰³ |
| DINFRATE | -0,001 | -0,001 | -6,34e ⁻⁰⁴ | 0,00 |
| χ^2 | (1,00) | | | |

Примечание. В скобках указаны *p*-значения. *D* указывают, что переменная измеряется как изменения.

Table 9

The Hausman test's results

| Exogenous variable | Fixed effect | Random effect | (b-B) difference | sqrt(diag(V_b-V_B)) S.E. |
|--------------------|--------------|---------------|-----------------------|--------------------------|
| MANIND | -0.004 | -0.003 | 0.00 | 0.00 |
| DMANIND | 0.003 | 0.003 | 0.00 | 0.01 |
| DHCD | -0.002 | -0.002 | 0.00 | 0.01 |
| COLON | – | – | – | – |
| GOV | 0.041 | 0.041 | 0.00 | 0.00 |
| DDECOPEM | -0.060 | -0.060 | 0.00 | 0.06 |
| DEXRATE | 0.000 | 0.000 | 2.21e ⁻⁰⁷ | 1.04 ⁻⁰³ |
| DINFRATE | -0.001 | -0.001 | -6.34e ⁻⁰⁴ | 0.00 |
| χ^2 | (1.00) | | | |

Note. *p*-values are in brackets. *D* indicate that the variable is measured as changes.

Таблица 10

Объединенные результаты испытаний OLS [32]

| Экзогенные переменные | Переменные | SD = sqrt(Var) |
|-----------------------|-------------------|----------------|
| lnGDP | 1,002 | 1,03212 |
| e | 0,006 | 0,04321 |
| u | 1,623 | 1,23412 |
| χ^2 | 462,21 (0,000) | |

Table 10

Consolidated OLS and random effects test results [32]

| Exogeneous variable | Variable | SD = sqrt(Var) |
|---------------------|-------------------|----------------|
| lnGDP | 1.002 | 1.03212 |
| e | 0.006 | 0.04321 |
| u | 1.623 | 1.23412 |
| χ^2 | 462.21 (0.000) | |

Подтверждено, что реальный рост добычи полезных ископаемых способен увеличить экономический рост в экономике стран Южно-Африканского региона. Это значит, что горнодобывающий сектор оказывает положительное влияние на рост экономики стран Южно-Африканского региона в течение периода исследования. Также выявлена положительную связь между развитием человеческого капитала и экономическим ростом. Но этот факт был подтвержден в предыдущих исследованиях в аналогичных областях [33; 34]. В частности, многие исследования показали, что развитие человеческого капитала более тесно связано с минеральными ресурсами и экономическим ростом, особенно при низком уровне коррупции. Кроме того, отмечена значительная взаимосвязь между обеспеченностью минеральными ресурсами и экономическим ростом в странах Южно-Африканского региона в период исследования. Это может быть результатом политических и институциональных неудач, отчасти из-за поведения рантье, а также экономических потрясений, которые верифицируются в странах – членах региона [35]. Данный вывод был ожидаемым, поскольку многие страны Южно-Африканского региона часто получают значительную часть своих прямых иностранных инвестиций в горнодобывающем секторе [27]. В период исследования также наблюдалась положительная взаимосвязь между развитием инфраструктуры и экономическим ростом в странах Южно-Африканского региона. Однако это усилило значительную положительную корреляцию

между развитием инфраструктуры и реальным ростом горнодобывающей промышленности. Другим фактором, проверенным в ходе исследования, стало положительное развитие торговли благодаря экономическому росту. Как показывают некоторые исследования, существуют возможности для улучшения притока ПИИ в сектор горнодобывающей промышленности в регионе Южно-Африканских стран, если политики смогут поддерживать различные стратегии экономической либерализации и размеры рынка [33]. Наконец, положительная взаимосвязь между ростом экономики и ростом прямых иностранных инвестиций также согласуется с предыдущими исследованиями ПИИ как двигателя роста во многих странах Африки, занимающихся добычей полезных ископаемых [36].

Связь между долей экспорта полезных ископаемых в общем объеме экспорта и экономическим ростом незначительна, равно как и нестатистически значимая корреляция между участием экспорта полезных ископаемых в общем объеме экспорта и реальным ростом добычи. Таким образом, можно предположить, что экономический рост и рост реальной добычи полезных ископаемых в экономике стран Южно-Африканского региона может не пострадать от значительного влияния даже при увеличении экспорта полезных ископаемых. Следовательно, различные государственные меры должны дополнительно стимулировать использование минеральных ресурсов на местном уровне для обеспечения роста в регионе [33]. Наконец, в течение

периода исследования обнаружено, что рост населения отрицательно коррелирует с реальным ростом добычи полезных ископаемых и экономическим ростом в регионе Южно-Африканских стран, то есть увеличение населения в регионе отрицательно сказалось на реальном росте добычи полезных ископаемых и экономическом росте.

Заключение

Большинство стран Южно-Африканского региона ограничиваются добычей и экспортом природных ресурсов практически без промышленной переработки. Следовательно, доход от полезных ископаемых возникает в результате разницы между стоимостью добытого продукта в мировых ценах и себестоимостью добычи. Принимая во внимание эмпирические данные о том, что природные ресурсы являются «проклятием», проанализировано прямое и косвенное воздействие добывающей промышленности на экономический рост в регионе Южно-Африканских стран.

Исследование проведено с использованием набора панельных данных по двенадцати странам Южно-Африканского региона с 2011 по 2020 г. Выводы, основанные на методах оценки OLS и GMM, показали, что, помимо доли экспорта полезных ископаемых в общем объеме экспорта, рост населения и обеспеченность минеральными ресурсами – все переменные, проверенные в исследовании, в значительной степени способствовали экономическому росту в регионе Южно-Африканских стран в течение обозначенного периода. В частности, реальный рост в сфере услуг, производства, добычи полезных ископаемых, развитие человеческого капитала, инфраструктуры, открытость торговли и рост прямых иностранных инвестиций статистически значимы на разных уровнях. В исследовании рассмотрены три модели. Первая измеряла прямое воздействие добывающей промышленности на экономический рост с использованием ВВП на душу населения. Вторая – косвенное воздействие добывающей промышленности на экономический рост с использованием показателей, служащих источником ресурсного проклятия. Третья оценивала воздействие переменных, влияющих на добывающую промышленность и рост. Получены следующие результаты и даны рекомендации:

1. Реальный рост горнодобывающей промышленности способен увеличить экономический рост в экономике страны Южно-Африканского региона. И это показывает, что сектор горнодобывающей промышленности оказывает прямое и положительное влияние на рост экономики в регионе Южно-Африканских стран в течение исследуемого периода. На основе полученных в ходе исследования данных гипотеза о негативном влиянии минеральных ресурсов на экономический рост была отвергнута и сделан вывод об отсутствии ресурсного «проклятия» в горнодобывающей отрасли. Следовательно, целесообразно увеличение инвестиций в устойчивую эксплуатацию стратегических минеральных ресурсов в регионе.

2. Реальный рост промышленности имеет значительную положительную связь с экономическим ростом в регионе Южно-Африканских стран. Увеличение промышленного производства, уровня доходов и уровня жизни за счет увеличения затрат горнодобывающего сектора может положительно повлиять на рост экономики в регионе Южно-Африканских стран. Соответственно, со стороны правительства необходима разработка льгот, направленных на стимулирование увеличения уровня переработки минеральных ресурсов региона местными компаниями, а также формирование промышленной политики для поддержки развития отраслей, перерабатывающих сырье горнодобывающего сектора.

3. Наблюдается положительная связь между развитием человеческого капитала и экономическим ростом, а также положительная корреляция между развитием человеческого капитала и реальным ростом горнодобывающей промышленности и долей экспорта полезных ископаемых в общем объеме экспорта в регионе Южно-Африканских стран. Таким образом, доход от добычи полезных ископаемых можно использовать для развития человеческого и физического капитала в этих стратегических секторах.

4. Вместе с тем положительная взаимосвязь между развитием инфраструктуры и экономическим ростом в регионе Южно-Африканских стран за этот период усилила значительную положительную взаимосвязь между развитием инфраструктуры и реальным ростом горнодобывающей промышленности в регионе. Поэтому государственные учреждения и частный сектор

должны вкладывать значительные средства в стратегическую инфраструктуру, такую как электроснабжение, дороги и мосты, транспорт и телекоммуникации. Данный процесс осуществляют многие страны региона, например Ангола, Танзания, Мозамбик и т. д.

5. Торговля показала положительный результат благодаря экономическому росту. Чтобы повысить привлекательность экономик стран Южно-Африканского региона для притока ПИИ в горнодобывающий сектор, директивные органы должны поддерживать различные стратегии экономической либерализации и размеры рынка.

6. В связи с положительной взаимосвязью между ростом ПИИ и экономическим ростом в регионе Южно-Африканских стран следует приложить усилия для привлечения большего количества стратегических инвестиций в горнодобывающий сектор, чтобы побудить других иностранных инвесторов вкладывать дополнительные средства. Это основано на предпосылке, что иностранные инвесторы могут рассматривать увеличение инвестиционных решений других как хороший признак благоприятных условий. Кроме того, для увеличения внутрорегиональных прямых иностранных инвестиций государства – члены Южно-Африканского региона должны согласовать свою политику и процедуры в отношении добычи полезных ископаемых, технического потенциала и обмена знаниями. Необходимо приложить усилия для повышения осведомленности об изобилии полезных ископаемых в регионе и прямого стимулирования инвестиций в регион.

7. Несмотря на то что оценка для большинства объясняющих переменных была положительной и значимой для OLS, вторые лаги оказались менее значительными в GMM, в то время как немногие имели отрицательные знаки. Это указывает на то, что за исследуемый период большинство показателей роста в регионе Южно-Африканских стран имеет тенденцию к ухудшению со временем. Предложенные рекомендации способны положительно сказаться на выявленной негативной тенденции.

Результаты исследования могут быть использованы научными, учебными и статистическими учреждениями, горнодобывающими компаниями, банковскими структурами Южно-Африканских стран.

Список литературы / References

1. Awolusi OD, Mbonigaba J, Tipoy CK. Mineral resources endowment and economic growth in Southern African countries. *International Journal of Diplomacy and Economy*. 2018;4(1):59-79. <https://doi.org/10.1504/IJDIPE.2018.091418>
2. *Mining markets in Southern Africa*. Virginia Economic Development Partnership, Zurcom International; 2014.
3. SADC Macroeconomic Statistics Bulletin. Gaborone; 2021.
4. Papyrakis E, Gerlagh R. The resource curse hypothesis and its transmission channels. *Journal of Comparative Economics*. 2004;32(1):181–193. <https://doi.org/10.1016/j.jce.2003.11.002>
5. Sachs J, Warner A. *Natural resources abundance and economic growth*. Working Paper 5398. National Bureau Research; 1995. <https://doi.org/10.3386/w5398>
6. Brunnschweiler C, Bulte E. The resource curse revisited and revised: a tale of paradoxes and red herrings. *Journal of Environmental Economics and Management*. 2008;55:248–264. <https://doi.org/10.1016/j.jjeem.2007.08.004>
7. Alexeev M, Conrad R. The elusive curse of oil. *The Review of Economics and Statistics*. 2006;91(3): 586–598. <http://doi.org/10.2139/ssrn.806224>
8. Mehlum H, Moene K, Torvik R. Institutions and the resource curse. *Economic Journal*. 2006;116:1–20. <https://doi.org/10.1111/j.1468-0297.2006.01045.x>
9. Easterly W, Levine R. Tropics, germs, and crops: how endowments influence economic development. *Journal of Monetary Economics*. 2003;50(1):3–39. [https://doi.org/10.1016/s0304-3932\(02\)00200-3](https://doi.org/10.1016/s0304-3932(02)00200-3)
10. Sala-i-Martin X, Subramanian A. Addressing a natural resource curse: an illustration from Nigeria. *Journal of African Economies*. 2012;22(4):570–615. <https://doi.org/10.1093/jae/ejs033>
11. Kondratiev VB. Mining industry, industrial policy and economic upgrade. *Russian Mining Industry*. 2022; (3):61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-61-68>
12. Кондратьев В.Б. Горная промышленность, промышленная политика и апгрейд экономики // Горная промышленность. 2022. № 3. С. 61–68. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-3-61-68>
13. Vicente P. Does oil corrupt? Evidence from a natural experiment in West Africa. *Journal of Development Economics*. 2010;92:28–38. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2009.01.005>
13. Ding N, Field B. Natural resource abundance and economic growth. *Land Economics*. 2004;81:496–502. <https://doi.org/10.3368/le.81.4.496>

14. Mavrotas G, Murshed S, Torres S. Natural resource dependence and economic performance in the 1970–2000 period. *Review of Development Economics*. 2011;15(1): 124–138. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9361.2010.00597.x>
15. Isham J, Woolcock M, Pritchett L, Busby G. The variety of resource experience: how natural resource export structures affect the political economy of economic growth. *Rothay Center for International Affairs Working Paper Series 12*. 2003. <https://doi.org/10.2139/ssrn.410364>
16. Magnus JR, Ji K, Wang W. Resource abundance and resource dependence in China. *Center Discussion Paper Series No. 2010-109*. 2010. <http://doi.org/10.2139/ssrn.1691569>
17. James A. The resource curse: a statistical mirage. *Journal of Development Economics*. 2015;114:55–63. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2014.10.006>
18. Van Der Ploeg F, Poelhekke S. The impact of natural resources: survey of recent quantitative evidence. *Journal of Development Studies*. 2017;53(2):205–216. <https://doi.org/10.1080/00220388.2016.1160069>
19. Badeeb R, Lean H, Clark J. The evolution of the natural resource curse thesis: a critical literature survey. *Resources Policy*. 2016;51:123–134. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.10.015>
20. Sachs DJ, Warner AM. Natural resources and economic development: the curse of natural resources. *European Economic Review*. 2001;45(3):324–341.
21. Sachs J, Warner A. Sources of slow growth in African economy. *Journal of African Economies*. 1997;6(3): 335–376. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jae.a020932>
22. Sachs J, Warner A. The big push, natural resource booms and growth. *Journal of Development Economics*. 1999; 59:43–76. [https://doi.org/10.1016/s0304-3878\(99\)00005-x](https://doi.org/10.1016/s0304-3878(99)00005-x)
23. Rodionova I.A., Monge E.S. Economic development of Tanzania: features and trends (1970–2013). *RUDN Journal of Economics*. 2015;(2):66–77. (In Russ.)
- Родионова И.А., Монге Э.С. Экономическое развитие Танзании: особенности и тенденции (1970—2013 гг.) // Вестник Российского университета дружб народов. Серия: Экономика. 2015. № 2. С. 66–77.*
24. Obratsova MG. South Africa’s mining companies in the Southern African Development Community (SADC). *Asia and Africa Today*. 2021;(2):30–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S032150750014001-3>
- Образцова М.Г. Интересы горнодобывающих компаний ЮАР в странах Сообщества развития Юга Африки // Азия и Африка сегодня. 2021. № 2. С. 30–35. https://doi.org/10.31857/S032150750014001-3*
25. Hausman JA. Specification tests in econometrics. *Applied Econometrics*. 2015;(2):111–134. (In Russ.)
- Хаусман Дж.А. Тесты на спецификацию в эконометрике // Прикладная эконометрика. 2015. № 2 (38). С. 111–134.*
26. Aregbesola AR. Foreign direct investment and institutional adequacy: New Granger causality evidence from African countries. *South African Journal of Economic and Management Sciences*. 2014;17(5):557–568. <https://doi.org/10.5465/AMBPP.2012.13876abstract>
27. Dupasquier C, Osakwe PN. *Performance, promotion, and prospects for foreign investment in Africa: national, regional, and international responsibilities*. Paper prepared for the “Eminent Persons’ meeting on promotion of investment in Africa. Tokyo; 2003.
28. Anyanwu JC. Why does foreign direct investment go where it goes? New evidence from African countries. *Annals of Economics and Finance*. 2012;13(2):433–470
29. Nnadozie E, Osili UO. U.S. *Foreign direct investment in Africa and its determinants*. UNECA workshop of financial systems and mobilization in Africa. 2004.
30. Wheeler D, Mody A. International investment locational decisions: the case of US firms. *Journal of International Economics*. 1992;33:57–76
31. Asiedu E. On the determinant of foreign direct investment to developing countries: is Africa different? *World Development*. 2002;30(1):107–119. [https://doi.org/10.1016/s0305-750x\(01\)00100-0](https://doi.org/10.1016/s0305-750x(01)00100-0)
32. Voloshenko KYu, Drok TE. Econometric analysis of the impact of the intensity of transboundary activities on the level of economic complexity: the case study of European countries. *Regionology. Russian Journal of Regional Studies*. 2019;27(4):602–632. (In Russ.) <https://doi.org/10.15507/2413-1407.109.027.201904.602-632>
- Волошенко К.Ю., Дрок Т.Е. Эконометрический анализ влияния интенсивности трансграничной на уровень экономической сложности на примере стран Европы // Регионология. 2019. Т. 27. № 4. С. 602–632. https://doi.org/10.15507/2413-1407.109.027.201904.602-632*
33. Mahonye N, Mandishara L. *Mechanism between mining sector and economic growth in Zimbabwe. Is it a resource curse?* Economic Research Southern Africa (ERSA) working paper 499. 2012.
34. Atkinson G, Hamilton K. Savings, growth and the resource curse hypothesis. *World Development*. 2015;31(11): 1793–1807. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2003.05.001>
35. Boschini AD, Pettersson J, Roine J. Resource curse or not: a question of appropriability. *Scandinavian Journal of Economics*. 2007;25(3):109–135. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9442.2007.00509.x>
36. Rodríguez X, Pallas J. Determinants of foreign direct investment in Spain. *Applied Economics*. 2008;40: 2443–2450. <https://doi.org/10.1080/00036840701367606>

Сведения об авторах

Силима Педру Пинту, аспирант, департамент инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-6030-6544; silima2507@gmail.com

Назарова Юлия Александровна, кандидат экономических наук, доцент департамента инновационного менеджмента в отраслях промышленности, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-0015-8233; j.a.nazarova@mail.ru

About the authors

Pedro Pinto Silima, PhD student, Department of Innovation Management, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6030-6544; silima2507@gmail.com

Yuliya A. Nazarova, Candidate of Economics, Associate Professor of the Department of Innovation Management, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-0015-8233; j.a.nazarova@mail.ru



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-76-85
EDN: DBDTZJ
UDC 551.8

Research article / Научная статья

Recognition and characterization of sources rocks in well BX in the sedimentary basin of Cote d'Ivoire

Vladimir Yu. Abramov , Nome G.S. Essoh 

RUDN University, Moscow, Russian Federation

 geophy-rudn@mail.ru

Article history

Received: December 12, 2022

Revised: March 1, 2023

Accepted: March 10, 2023

Keywords:

offshore, geochemical, stratigraphy,
Rock-Eval analyze, petroleum potential

Abstract. In order to recognize and characterize the sources rocks in the BX well, samples of this well have been selected and analysed using Rock-Eval pyrolysis method and another set samples were prepared and observed through microscope for visual kerogen characterisation. The total organic carbon of BX well sediments varies between 0.41 and 3.41 wt%, with 1.29 wt% on average. These high values indicate good organic matter content in this well. The hydrogen index (HI) of the studied samples ranges from 49 to 292 mgHC/g_{TOC}, with an average of 109 mgHC/g_{TOC}, indicating mainly a type III kerogen. This kerogen is composed of humic material (vitrinite and inertinite) and amorphous organic matter with marine microfossils (dinoflagellate cysts and micro-foraminiferal linings). Thermal maturity parameters show that, Maastrichtian, Campanian, Early Senonian and Turonian are immature with T_{max} values below 435 °C. However, according to T_{max} values, samples reach oil window in Albian at 9840 ft while spore colour index indicate that this limit can be put at 9210 ft into Cenomanian age. The section from 7260 to 7590 ft in Campanian interval displays the best qualities of source rock. This section is composed of good quantity of type III and type II/III kerogen with moderate hydrocarbon potential, but this source rock is immature to generate hydrocarbons.

For citation

Abramov VYu, Essoh NGS. Recognition and characterization of sources rocks in well BX in the sedimentary basin of Cote d'Ivoire. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):76–85. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-76-85>

Распознавание и характеристика исходных пород в скважине ВХ в осадочном бассейне Кот-д'Ивуара

В.Ю. Абрамов , Г.Н.С. Эссо 

Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

 geophy-rudn@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 декабря 2023 г.

Доработана: 1 марта 2023 г.

Принята к публикации: 10 марта 2023 г.

Аннотация. Отобраны и проанализированы методом пиролиза Rock-Eval образцы из скважины ВХ, для того чтобы определить и охарактеризовать исходные породы в ней. Другой набор образцов подготовлен и рассмотрен с помощью микроскопа для визуальной характеристики керо-

© Abramov V.Yu., Essoh N.G.S., 2023

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

Ключевые слова:

шельф, геохимия, стратиграфия, анализ Rock-Eval, нефтяной потенциал

гена. Общее содержание органического углерода в отложениях скважины ВХ варьируется от 0,41 до 3,41 весовых %, в среднем 1,29 весовых %. Такие высокие значения указывают на хорошее содержание органического вещества в этой скважине. Водородный индекс (НИ) исследованных образцов колеблется от 49 до 292 мгНС/гТОС, в среднем 109 мгНС/гТОС, что указывает на наличие в основном керогена типа III. Этот кероген состоит из гуминового материала (витринита и инертинита) и аморфного органического вещества с морскими микрофоссилиями (цисты динофлагеллят и микрофораминиферовые отложения). Параметры термической зрелости показывают, что Маастрихтский, Кампанский, ранний Сенонский и Туронский периоды являются незрелыми со значениями T_{\max} ниже 435 °С. Однако, согласно значениям T_{\max} , образцы достигают нефтяного окна в Альбе на высоте 9840 футов, в то время как индекс цвета спор указывает, что этот предел может быть установлен на высоте 9210 футов в сеноманском возрасте. Участок от 7260 до 7590 футов в кампанском интервале демонстрирует лучшие качества исходной породы. Данный разрез состоит из хорошего количества керогена типа III и типа II/III с умеренным углеводородным потенциалом, но эта исходная порода незрелая для генерации углеводородов.

Для цитирования

Abramov V.Yu., Essoh N.G.S. Recognition and characterization of sources rocks in well ВХ in the sedimentary basin of Cote d'Ivoire // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 76–85. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-76-85>

Introduction

Geologically, Côte d'Ivoire is characterized by a Precambrian basement, which occupies 97.5% of its total area, and a later sedimentary basin (Lower Cretaceous BC), the incipient part of which occupies 2.5% of the Côte d'Ivoire. The sedimentary basin of the Ivory Coast consists of two main zones: Onshore and Offshore.

This article is based on the results of analysis of rock samples from the ВХ well, located on the shelf of Côte d'Ivoire. It presents the results of qualitative and quantitative geochemical analysis of 136 samples using Rock-Eval pyrolysis and visual analysis of kerogen. The interpretation is based on published geochemical data and comparative data from previously drilled wells in the Ivoirian Basin.

The purpose of this study is to recognize and characterize source rocks by determining the quantity, quality and maturity of organic matter as defined [1].

1. Results and interpretation

The geochemical log (Figure 1) shows the evolution of each parameter with depth. Well ВХ shows that:

- the organic matter content of this well is generally good ($1 < \text{TOC} < 2 \text{ wt}\%$);
- samples contain mostly kerogen with poor hydrocarbon potential ($S_2 < 2.5 \text{ mgHC/g}_{\text{rock}}$). Only the interval from 7260 to 7590 feet, in Campana, contains kerogen with good ($2.5 < S_2 < 5 \text{ mgHC/g}_{\text{rock}}$) hydrocarbon potential;
- hydrogen index and oxygen index of the studied samples indicate the predominance of mixed type III kerogens capable of generating gas;
- thermal maturity increases with depth and samples reach the Alba oil window.

The mass content of TOC in this well is usually less than 4% and fluctuates between 0.14 and 2.15% of the mass. Samples with moderate energy source ($\text{TOC} < 1\% \text{ mass}$) make up 44.67% of the total number of samples from the well, while moderate ($1 < \text{TOC} < 1.5\% \text{ mass}$) energy source is 23.33% and good source rocks ($\text{TOC} > 1.5\% \text{ mass}$) make up only 32% of the total samples from the well (Figure 2). These percentages indicate good primary productivity and/or favorable organic matter retention. In the Côte d'Ivoire Basin, studies have shown that significant parent rocks typically have TOCs greater

than 1.5% mass, which in this well is represented in 32% of the samples (Figures 2, 3).

Samples from the studied well show a good content of organic carbon in the Turonian (average 0.68 wt%), Cenomanian (average 0.59 wt%) and Albian (average 0.88 wt%) periods. A slight increase in organic matter with a good content of TOC ($1 < \text{TOC} < 1.5$ % mass) is noted in the Early Senonian (average 1.03% mass), Campanian (average 1.30% mass) and Tertiary (average 1.48% mass) periods. The Maastrichtian interval is the richest in organic matter. TOC values range from 1.42 to 2.15

with an average value of 1.71% mass. Source rock characterization is not limited to the amount of recorded organic matter, since TOC is not the only indicator of oil potential, and many rocks with high TOC values may have low oil source potential due to the quality of the kerogen content. Thus, high TOC values are a necessary but not a sufficient criterion for good source stone material (Table 1). The type of organic matter and the potential for hydrocarbon formation must also be taken into account in order to more accurately characterize the source rocks [2].

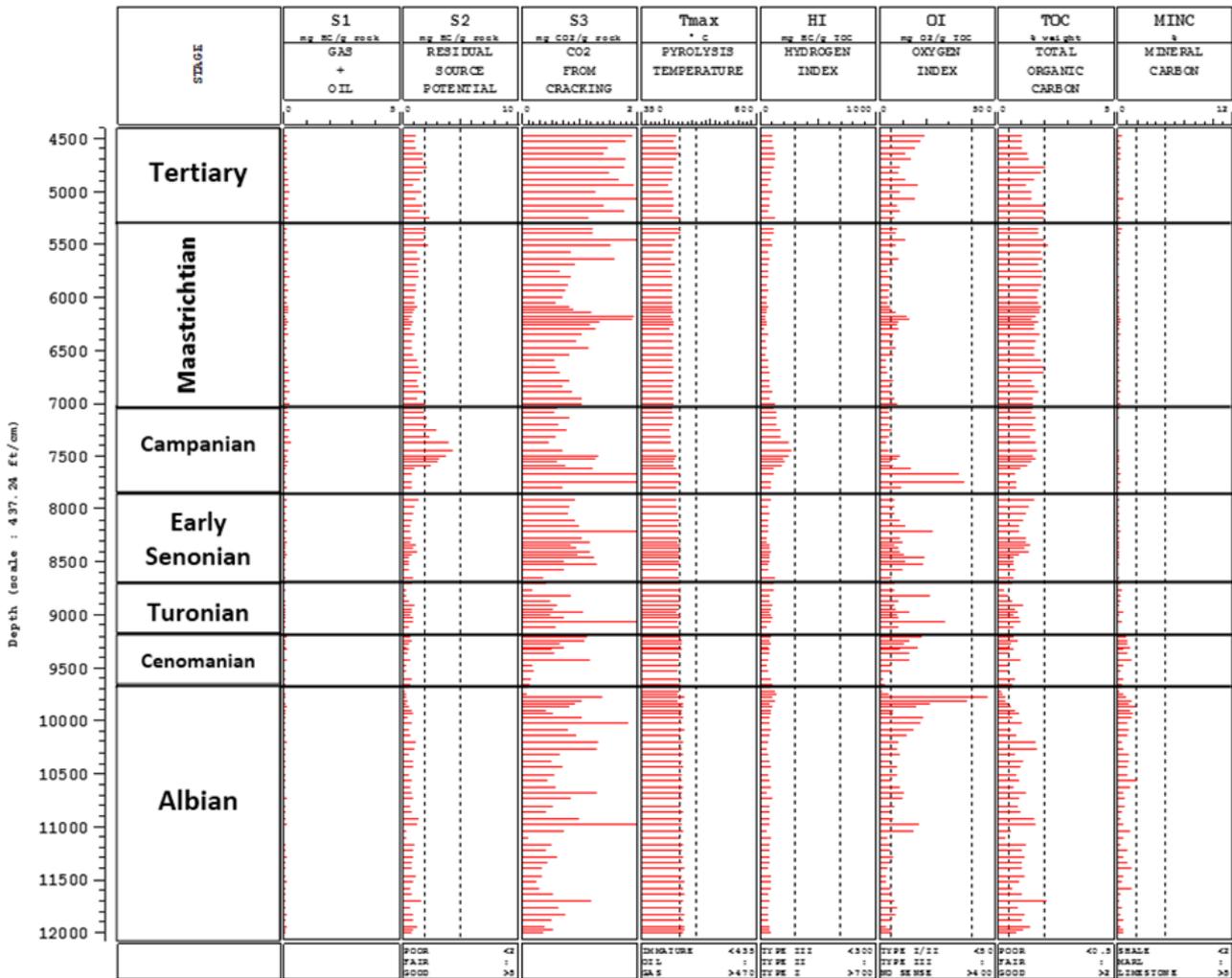


Figure 1. Geochemical log of well BX

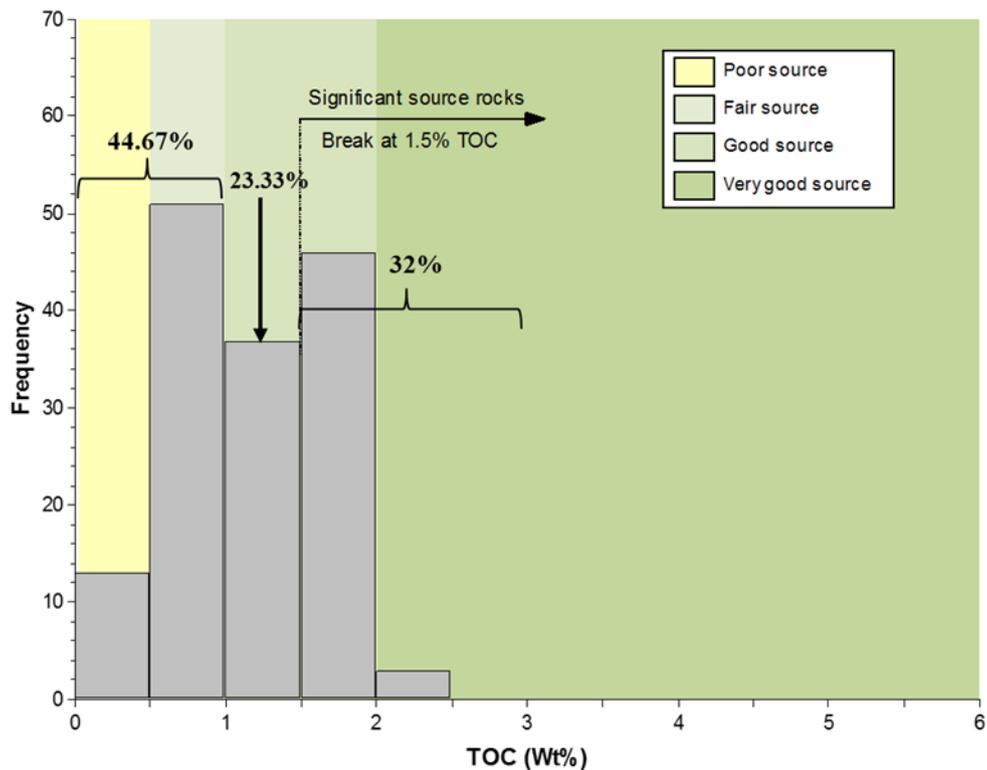


Figure 2. Total organic carbon (TOC) distribution in well BX

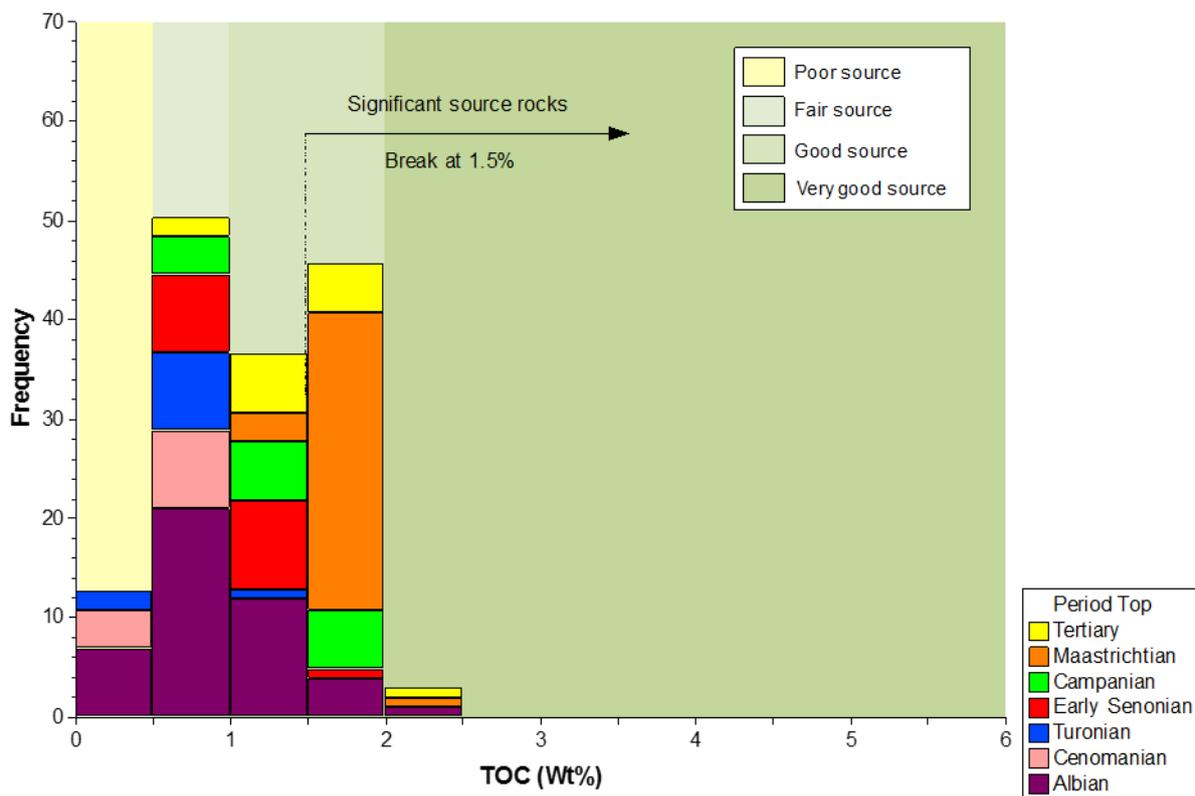


Figure 3. Total distribution of organic carbon (TOC) in well BX across stratigraphic units in color

Table 1

Values of Rock-Eval 6 parameters for the stratigraphic horizons of well BX

| Depth, m | | S ₂ , mgHC/g _{rock} | T _{max} , °C | TOC, % weight | HI, mgHC/g _{TOC} |
|---------------------------------|-----|---|-----------------------|---------------|---------------------------|
| Maastrichtian (5310'–7050') | Min | 0,46 | 413 | 1,42 | 32 |
| | Max | 2,17 | 433 | 2,15 | 126 |
| | Moy | 1,22 | 418,7 | 1,72 | 70 |
| | Nb | 34 | | | |
| Campanian (7050'–7860') | Min | 0,68 | 409 | 0,64 | 91 |
| | Max | 4,33 | 434 | 1,64 | 264 |
| | Moy | 2,26 | 420 | 1,31 | 163 |
| | Nb | 16 | | | |
| Early Senonian (7860'–8700') | Min | 0,5 | 425 | 0,66 | 49 |
| | Max | 1,38 | 435 | 1,51 | 118 |
| | Moy | 0,81 | 430 | 1 | 77,8 |
| | Nb | 18 | | | |
| Turonian (8700'–9180') | Min | 0,3 | 439 | 0,27 | 63 |
| | Max | 1,06 | 435 | 1,02 | 112 |
| | Moy | 0,62 | 432 | 0,68 | 90,6 |
| | Nb | 11 | | | |
| Senonian (9180'–9690') | Min | 0,23 | 432 | 0,37 | 61 |
| | Max | 0,68 | 440 | 0,82 | 102 |
| | Moy | 0,49 | 433 | 0,6 | 80,67 |
| | Nb | 12 | | | |
| Albian (9690'–12 000') | Min | 0,24 | 430 | 0,14 | 56 |
| | Max | 1,52 | 440 | 1,66 | 137 |
| | Moy | 0,7 | 438 | 0,88 | 83 |
| | Nb | 45 | | | |

2. Type of organic matter

The type of organic matter and oil potential are an important factor in the evaluation of potential rocks and have a significant impact on the nature of the hydrocarbons formed [1; 3; 4].

Hydrogen index (HI) values range from 32 to 264 mgHC/g_{TOC} in the BX well, which is mainly composed of type III kerogen (Figure 4). The composition of organic matter in sediments and sedimentary rocks reflects the vast number of variables that affect the terrestrial or aquatic environment in which it is formed, its transport to the site of deposition, and its change after deposition [5]. Thus, the type of kerogen is classified on the basis of organic geochemical and optical properties. Different types of kerogen produce different types of hydrocarbons. In general, type I kerogen (HI > 600 mg and type II (300 < HI < 600 mg), usually obtained from lacustrine and marine rocks, is the best kerogen and is

capable of generating liquid hydrocarbons [6]. Type III kerogens (50 < HI < 200 mg), which mainly consist of woody materials, are gas-permeable [7; 8].

From a practical point of view, the IH–IO diagram can locate different types of organic matter in their characteristic areas of origin. Organic material is usually in type III, which indicates the gas content of the source.

According to a petrographic study in transmitted and ultraviolet light, kerogen contains mainly amorphous organic matter, which is found in abundance in the Maastrichtian, Campanian, Turonian stages and in the upper part of the lower Senonian stage. Wood organic matter consists mainly of terrestrial-derived structure in the form of degraded phytoclasts (vitrinite) and was found in abundance in the lower part of the Lower Senonian, Cenomanian and Albian. Inertinitis is also present locally in small amounts (0 to 15%). Fluorescence is the abi-

lity of organic compounds to produce luminescence (visible light) when irradiated with blue light and UV excitation. Organic compounds that have good fluorescent properties are interpreted as rich in hydrogen (high lipid content), rocks with a low hydrogen content are characterized by little or no fluorescence. The Fluorescence Preservation Index (FPI) characterizes the fluorescence intensity of an amor-

phous matrix compared to a palynomorphic matrix and is important for both maturity and kerogen composition. FPI [9] defines 5 categories that correlate with hydrogen pyrolysis indices of immature samples. Under fluorescent light, the fluorescence retention index (FPI) of this kerogen shows average retention (FPI between 2 and 4) for hydrocarbon generation (Figures 5, 6).

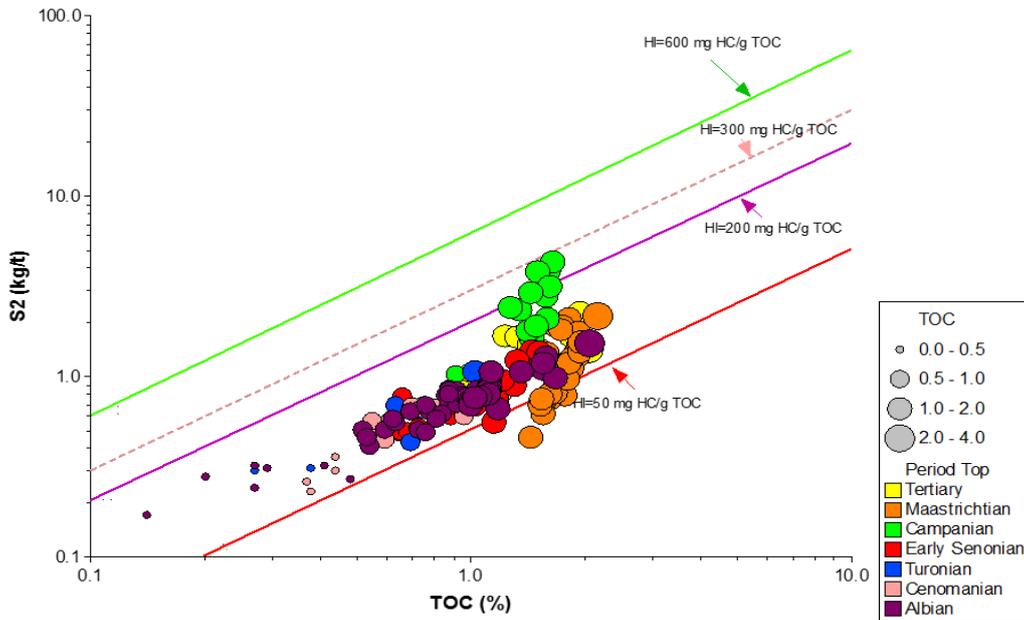


Figure 4. Change in S2 Rock-Eval as a function of total organic carbon (TOC) of well BX in logarithmic coordinates and in color

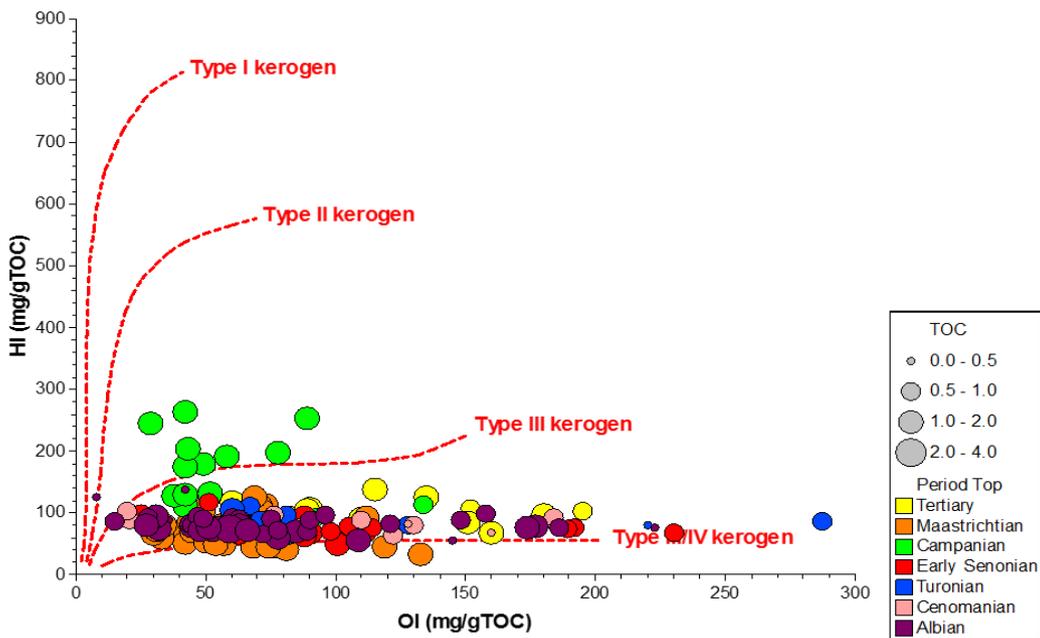


Figure 5. HI-OI plot of well BX with stratigraphic coloured references

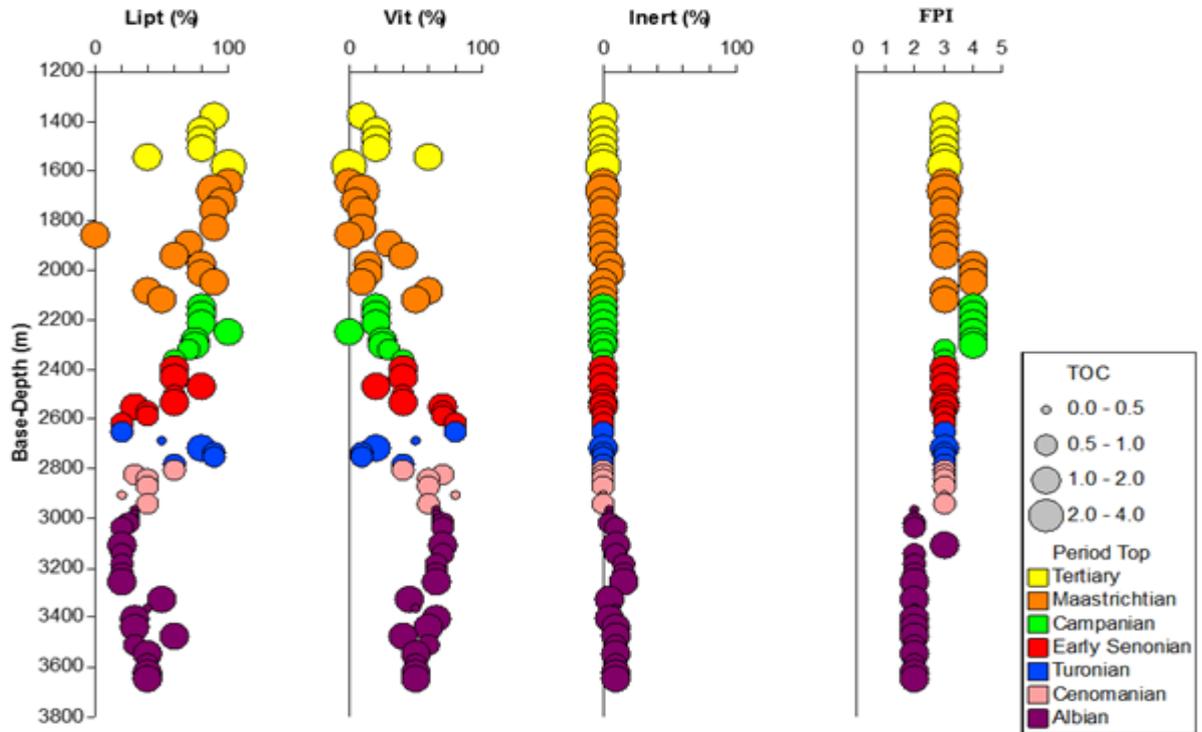


Figure 6. Screening of source rock kerogen depending on the depth of the BX with stratigraphic coloured references

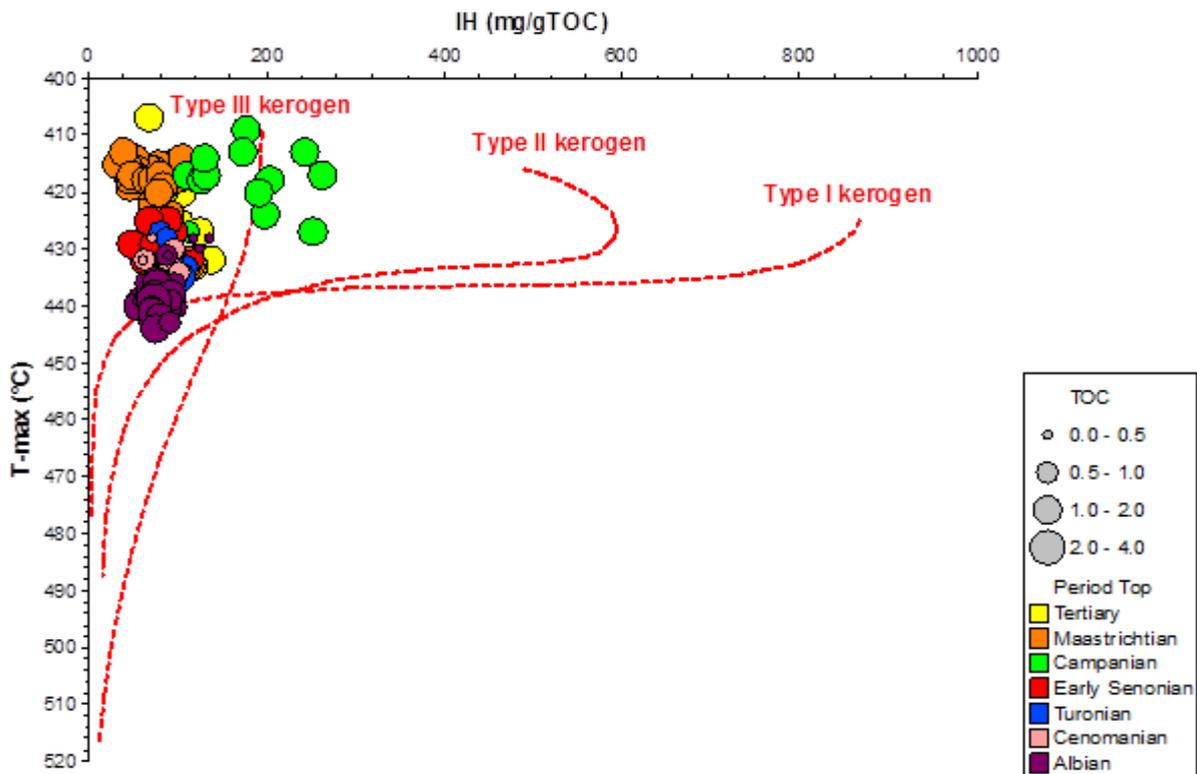


Figure 7. Change in the hydrogen index in accordance with the T_{max} of the assessment of the rocks of the well BX with stratigraphic coloured references

A clearer idea of the type of kerogen is presented in Figure 7, which takes into account the influence of kerogen maturity (y -axis = T_{\max}) depending on the hydrogen index. This graph clearly shows a cloud of points belonging to pure type kerogens and mixed type III, prone to gas formation. T_{\max} values usually indicate immature organic matter.

3. Oil potential

Oil potential measures the ability of kerogen to generate hydrocarbons at maturity. In the BX well, the oil potential (S2) ranges from 0.63 to 4.78 mgHC/g_{rock} in the studied samples. Such low

values (average S2 = 1.36 mgHC/g_{rock}) are indicative of a weak or good oil potential of kerogen. Figure 8 shows the change in S2 with depth.

Figure 6 shows that in the Tertiary, Maastrichtian, early Cenonian, Turonian, Cenomanian, and Albian intervals, S2 values are less than 2.5 mgHC/g_{rock}, indicating a low oil potential in these ages, which cannot be considered as source rocks. Only the 7260 to 7590 ft interval at Kamapan has good oil potential with S2 values between 2.5 and 5 mgHC/g_{rock}. This interval contains parent rock that can generate sufficient hydrocarbons when it reaches maturity.

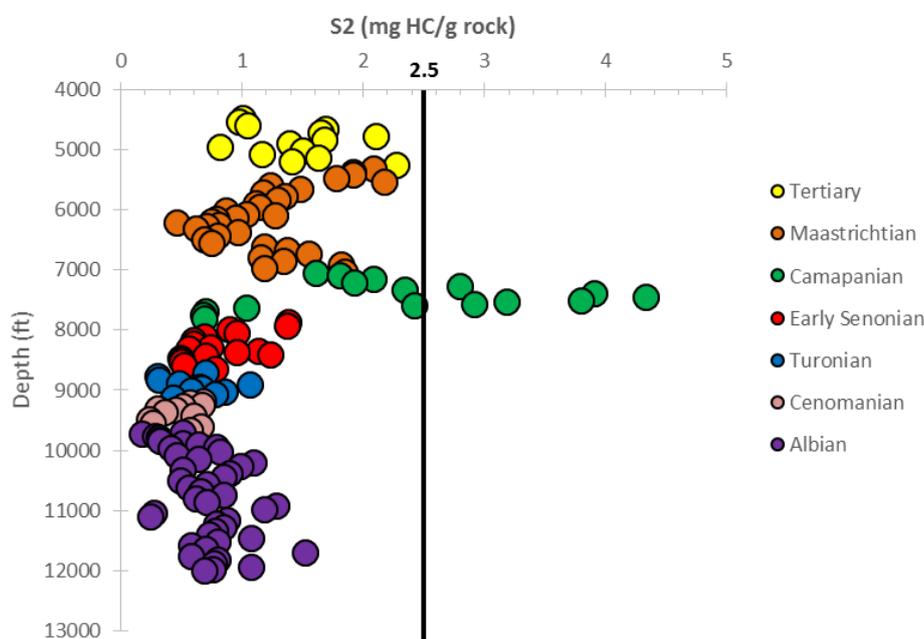


Figure 8. Diagram of dependence of S2 on the depth of the well BX

4. Thermal maturation

The thermal maturation parameters used to assess the degree of organic maturity in this study are T_{\max} and SCI data [10; 11].

The T_{\max} value, which indicates the maturity of the parent rock, increases with depth [5]. However, faults, folding, dips, geothermal gradients, migrating oil, sample quality, amount of organic matter, mineral matrix in the rock, and analysis errors can lead to differences in obtaining accurate T_{\max} values [12; 13]. Maturity assessment based on T_{\max} values generally indicates Tertiary to Cenomanian immaturity of kerogen. The samples reach the oil window in the Albian at a depth of 9840 feet (Figure 9) [14; 15].

The total organic carbon (TOC) in the BX well sediments ranges from 0.41 to 3.41% mass, averaging 1.29% mass. Such high values indicate a good organic matter content in this well. The hydrogen index (HI) of the studied samples ranged from 49 to 292 mgHC/g_{TOC}, with an average of 109 mgHC/g_{TOC}, indicating the presence of mainly type III kerogen. This kerogen consists of humic material (vitrinite and inertinite) and amorphous organic matter with marine microfossils (dinoflagellate cysts and microforaminiferal deposits). The thermal maturity parameters show that the Maastrichtian, Campanian, early Senonian and Turonian periods are immature with T_{\max} values below 435 °C. However, according

to the T_{max} values, the specimens reach the Albian oil window at 9840 feet, while the spore color index indicates that this limit can be set at 9210 feet, in Cenomanian age. The section from 7260 to 7590 feet, in the Campanian interval, shows the best qua-

lities of the source rock. This section consists of a good amount of Type III and Type II/III kerogen with moderate hydrocarbon potential, but this source rock is immature for hydrocarbon generation (Table 2).

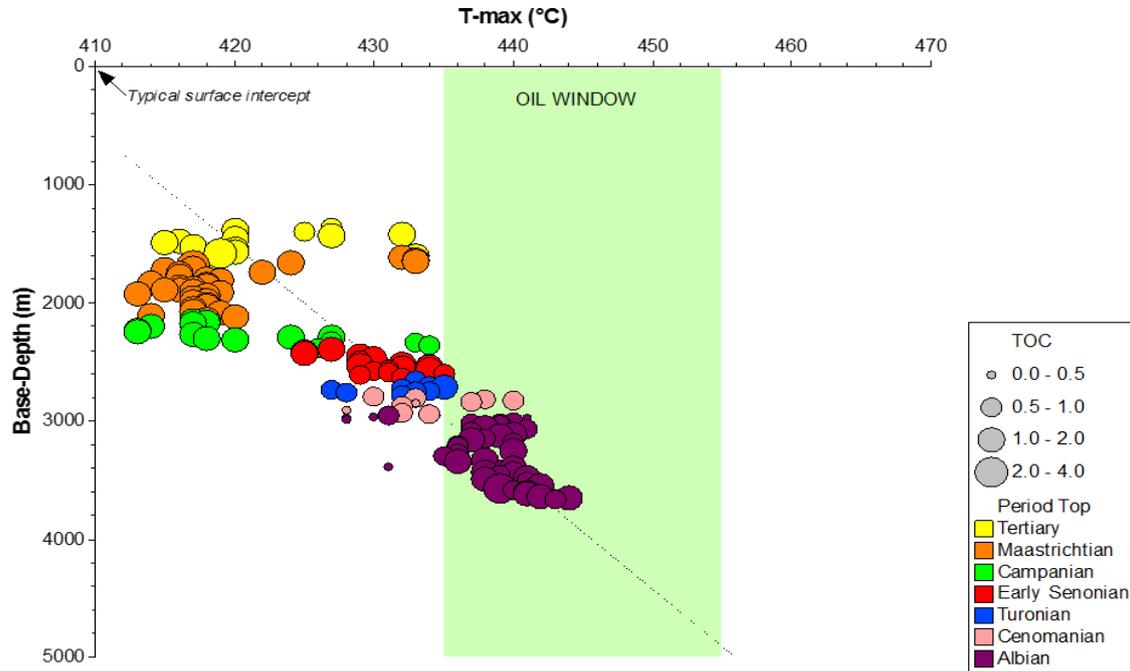


Figure 9. Diagram of T_{max} versus well depth BX with stratigraphic coloured references

Table 2

Summary of Rock-Eval 6 well BX parameters

| Age | | Hydrocarbon potential | Maturity | Type of mother rock | COT | Note |
|----------------|--------------|-----------------------|--------------|----------------------|---------|-------------------------------------|
| Maastrichtian | 5310–7050' | Low | Immature | Type III | Good | No mother rock |
| Campanian | 7050–7260' | Low | Immature | Type III | Good | No mother rock |
| | 7260–7620' | Average | Immature | Type III/Type II/III | Good | Average value. Mother rocks for gas |
| | 7620–7860' | Low | Immature | Type III | Average | No mother rock |
| Early Senonian | 7860–8430' | Low | Immature | Type III | Good | No mother rock |
| | 8430–8700' | Low | Immature | Type III | Average | No mother rock |
| Turonian | 8700–9180' | Low | Immature | Type III | Average | No mother rock |
| Senomanian | 9180–9690' | Low | Immature | Type III | Average | No mother rock |
| Albian | 9690–12 000' | Low | Early-mature | Type III | Average | No mother rock |

Conclusion

Geochemical analysis of samples from well BX allowed us to identify potential source rocks for this well. The 7290–7620' interval in the Campanian demonstrates the best qualities of the oil and gas bearing rock.

This source rock contains good amounts of Type III and Type II/III kerogen with good hydrocarbon potential, but is not yet mature for hydrocarbon generation. At a high degree of maturity, this potential source rock can generate moderate amounts of oil and gas.

References

1. Tissot BP, Welte DH. *Petroleum formation and occurrence*. 2nd ed., revised and enlarged. Berlin, Heidelberg: Springer; 1984.
2. Espitalié J, Marquis F, Barsony I. Geochemical logging. In: Voorhees KJ. (ed.) *Analytical Pyrolysis – Techniques and Applications*. Boston: Butterworth; 1984. p. 276–304. <https://doi.org/10.1016/B978-0-408-01417-5.50013-5>
3. Hun JM. *Petroleum geochemistry and geology*. San Francisco: W.H. Freeman and Co.; 1979.
4. Barker CE. A comparison of vitrinite reflectance measurements made on whole-rock and dispersed organic matter concentrate mounts. *Organic Geochemistry*. 1996;24(2):251–256.
5. Espitalie J, Laporte JL, Madec M, Marquis F, Leplat P, Paulet J, Boutefeu A. Méthode de caractérisation des roches mères, de leur potentiel pétrolier et de leur degré d'évolution. *Oil & Gas Science and Technology*. 1977;32(1):23–42. <https://doi.org/10.2516/ogst:1977002>
6. Hakimi MH, Alias FL, Abdullah WH, Azhar MH, Kugler RL. Organic geochemical characteristics and depositional environment of the Tertiary Tanjong Formation coals in the Pinangah area, onshore Sabah, Malaysia. *International Journal of Coal Geology*. 2012;104:9–21. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.09.005>
7. Ruble TE, Lewan MD, Philp RP. New insights on the green river petroleum system in the Uinta Basin from hydrous pyrolysis experiments. *AAPG Bulletin*. 2001; 85(8):1333–1371. <https://doi.org/10.1306/8626CAB9-173B-11D7-8645000102C1865D>
8. Behar F, Lewan MD, Lorant F, Vandenbroucke M. Comparison of artificial maturation of lignite in hydrous and nonhydrous conditions. *Organic Geochemistry*. 2003; 34(4):575–600. [https://doi.org/10.1016/S0146-6380\(02\)00241-3](https://doi.org/10.1016/S0146-6380(02)00241-3)
9. Tyson RV. *Sedimentary organic matter. Organic facies and palynofacies*. Springer; 1995.
10. Killops SD, Killops VJ. *An introduction to organic geochemistry*. Oxford: Blackwell; 1993.
11. Peters KE, Walters CC, Moldowan JM. *The biomarker guide*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press; 2005.
12. Peters KE. Guidelines for evaluating petroleum source rocks using programmed pyrolysis. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. 1986;70:318–329. <https://doi.org/10.1306/94885688-1704-11D7-8645000102C1865D>
13. Arfaoui A, Montacer M, Kamoun F, Rigane A. Comparative study between Rock-Eval pyrolysis and biomarkers parameters: a case study of Persian source rocks in central-northern Tunisia. *Marine and Petroleum Geology*. 2007;24(10):566–578. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2007.05.002>
14. Fofana B, Loko O, Atsé L, Ahientio H. Geochemical report of Marsouin-1X, Marlin-2 for FOXTROT INTER; PETROCI-DCAR. Abidjan; 2010.
15. Petroci, Biostratigraphy study Baobab-2x well, Block CI-40, Offshore Cote d'Ivoire. 2003.

About the authors

Vladimir Yu. Abramov, PhD of Geology, Association Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-7220-5978, eLIBRARY SPIN-code: 9447-5901; geophy-rudn@mail.ru

Nome G.S. Essoh, postgraduate student, Subsoil and Oil and Gas Management Department, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-3898-467X; egraceso-lange@yahoo.fr

Сведения об авторах

Абрамов Владимир Юрьевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-7220-5978, eLIBRARY SPIN-код: 9447-5901; geophy-rudn@mail.ru

Эссо Ном Грас Соланж, аспирант, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-3898-467X; egraceso-lange@yahoo.fr



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-86-94

EDN: EEDRTQ

UDC 550.8+550.4+550.3

Research article / Научная статья

Geochemical features of granitic rocks using x-ray spectral fluorescence in the Miass region, Southern Ural

Mohammed Abdalla Elsharif Ibrahim^a , Vladimir N. Kuleshov^b , Alexander E. Kotelnikov^a ,
Alexey F. Georgievskiy^a , Samia Abdelrahman Ibrahim^c

^a RUDN University, Moscow, Russian Federation

^b Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

^c University of Khartoum, Khartoum, Republic of Sudan

 mohammedelsharif7@gmail.com

Article history

Received: December 14, 2022

Revised: February 25, 2023

Accepted: February 28, 2023

Keywords:

geochemistry, magma process, high-K calc-alkaline, metaluminous

Abstract. The goals of the research are the geochemistry and identification of granite rocks. The granitic rocks are part of the Syrostan massive, which is located in Southern Ural. Understanding the magma process and probable mineralization deposition can be gained by classifying granite and determining geochemical characteristics. X-ray spectral fluorescence analysis was used to collect samples from outcrops for geochemical analysis. The results indicate that the rocks belong to the high-K calc-alkaline to calc-alkaline series. The granites are metaluminous to slightly peraluminous and are classified as I-type granites, with A/CNK values ranging from 0.73 to 1.01. The majority of the rock samples are trondhjemite to slightly tonalite in composition. The most observable samples in the normative Na₂O-k₂O-CaO scheme have defined a continuous range, varying from tonalite/trondhjemite to granodiorite. The findings provide valuable information about the petrogenesis of the rocks and their composition.

Acknowledgements

This paper has been supported by the RUDN University Strategic Academic Leadership Program.

Conflicts of interest

The authors declare that they have no know competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the study presented in the paper.

For citation

Ibrahim MAE, Kuleshov VN, Kotelnikov AE, Georgievskiy AF, Ibrahim SA. Geochemical features of granitic rocks using x-ray spectral fluorescence in the Miass region, Southern Ural. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):86–94. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-86-94>



Геохимическая характеристика и классификация гранитов с использованием рентгеновской спектральной флуоресценции Миасского района Южного Урала

М.А.А. Ибрахим^a, В.Н. Кулешов^b, А.Е. Котельников^a,
А.Ф. Георгиевский^a, С.А. Ибрахим^c

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bГеологический институт Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

^cУниверситет Хартума, Хартум, Республика Судан

✉ mohammedelsharif7@gmail.com

История статьи

Поступила в редакцию: 14 декабря 2022 г.

Доработана: 25 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 28 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

геохимия, рентгеноспектральная флуоресценция, магматический процесс, высококалийный, известково-щелочной, металлургический

Аннотация. Основные задачи исследования – геохимия и идентификация гранитных пород. Гранитные породы входят в состав Сыростанского массива, расположенного на Южном Урале. Понимание магматического процесса и вероятного отложения минерализации можно получить путем классификации гранита и определения геохимических характеристик. Рентгеноспектральный флуоресцентный анализ использован для отбора проб из обнажений для геохимического анализа. Результаты показали, что породы относятся к известково-щелочной серии. Граниты – от металлуминозных до слабоглиноземистых – относятся к I типу со значениями A/CNK от 0,73 до 1,01. Большинство образцов пород имеют состав от трондьемита до слабого тоналита. Наиболее наблюдаемые образцы в нормативной схеме Na₂O-K₂O-CaO определяют непрерывный диапазон от тоналита/трондьемита до гранодиорита. Находки дают ценную информацию о петрогенезе горных пород и их составе.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы стратегического академического лидерства РУДН.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют, что им неизвестны конкурирующие финансовые интересы или личные отношения, которые могли бы повлиять на представленное в статье исследование.

Для цитирования

Ibrahim M.A.E., Kuleshov V.N., Kotelnikov A.E., Georgievskiy A.F., Ibrahim S.A. Geochemical features of granitic rocks using x-ray spectral fluorescence in the Miass region, Southern Ural // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 86–94. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-86-94>

Introduction

Different deposits and mineralization were discovered associated with granite intrusions, such as gold deposits, tin, tungsten and several deposits of rare earth elements [1; 2]. Type, origin, and petrogenesis of granite is significant key in formation of specific deposits. Some studies revealed that, various of rare earth elements deposits related to highly fractionated granite intrusions. Also, the Syrostan massive in the southern Ural linked with many deposits such as gold, rare earth elements, and skarn deposits. Therefore, determine the type of granite, identification the magma evolution process, and the geochemistry of granite could lead to a potential ore deposit.

Although, several research were conducted in the Syrostan massive and intrusions in southern Ural looking for potential mineralization [2–6]; however, the massive area was not covered with the investigation of the petrogenesis and the geochemistry and conducted them to the mineralization. The aim of this study is to identify geochemical characteristic and type of the granite in order to connect them with type of mineralization and use the result for future researches.

Geology of the study area. The Syrostan massive locates in the southwest of the Miass city, southern Ural in the zone of the main Ural deep fault. The massive is among metabasites, shales of several composition and fragment of metamor-

phosed oceanic crust and the crust of passive margin of the Ural paleocean. The massive is formed in the lower carbonian and has three phases: the first is granodiorite and quartz diorite, the second is double feldspar and plagiogranite, and the third is vein complex [6–8].

The location of the study area almost 15 km northwest of the Miass city (Figure 1). The area of

the massive consists of metamorphic complex and marble body lies in the form of lenses crossed by several granite veins and the marble mainly in contact with diorite. The magmatic complex includes quartz diorite, granodiorite, biotite granite, and leucogranite [6; 9; 10]. After intensive of petrographic investigation, nine samples have been selected for major oxides analysis.

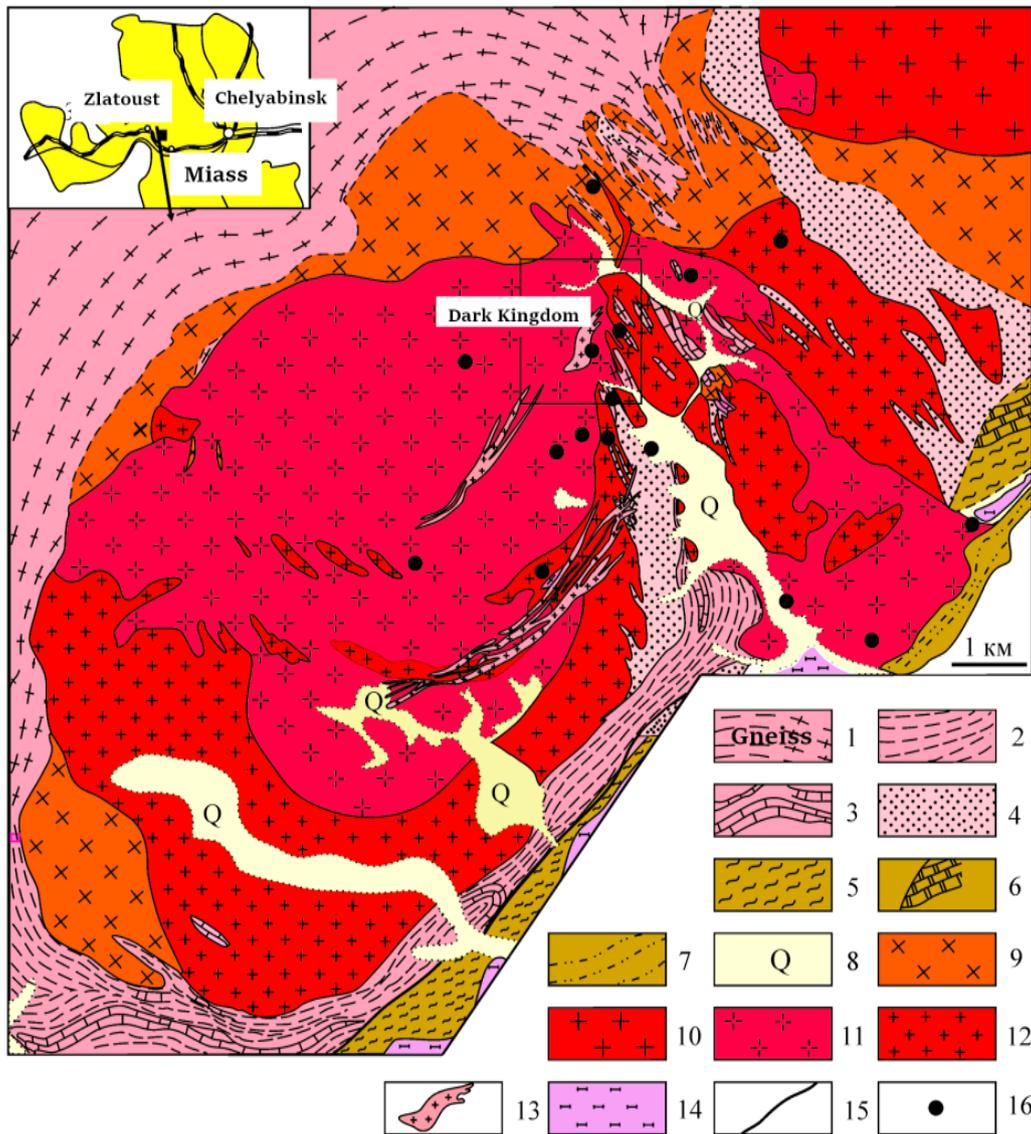


Figure 1. The Syrostan granite massive’s modified geological map, which includes the Dark Kingdom of Marble Deposit:
 1 – gneiss; 2 – mica quartz schist; 3 – marble limestone; 4 – quartzite; 5 – shale; 6 – marble; 7 – carbonaceous shale;
 8 – quartzite; 9 – granodiorite, quartz diorite, diorite; 10 – porphyric biotite granites; 11 – pink porphyric biotite granites;
 12 – veined granite and plagiogranite; 13 – pegmatites; 14 – serpentinites; 15 – tectonic faults; 16 – occurrence of niobium

1. Analytical methods

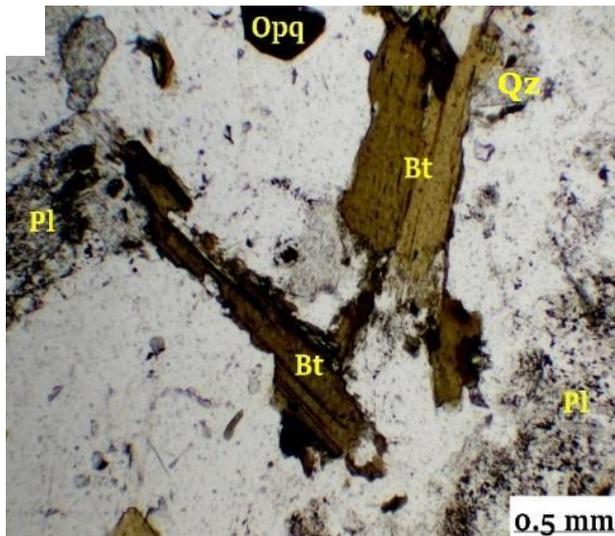
Determination of the concentration of major oxides in the samples was executed by x-ray spectral fluorescence analysis (XRF) on a sequential vacuum

spectrometer (with wavelength dispersion), model Axios mAX manufactured by PAN alytical (Netherlands). The analysis was performed at the Center for Collective Use of the IGEM RAS (Moscow, Russia).

2. Results and discussion

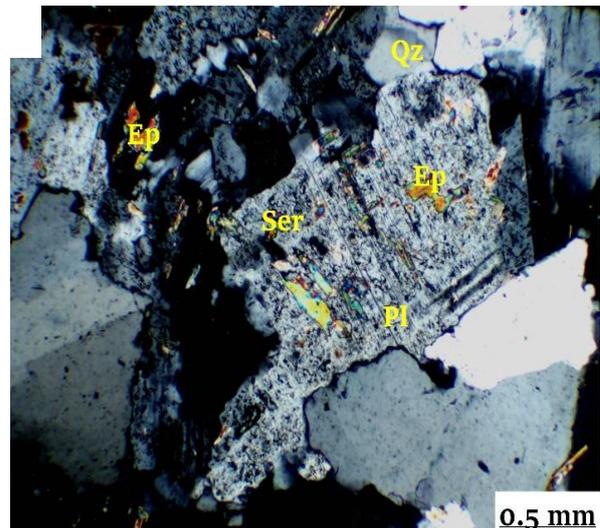
2.1. Petrography and mineral compositions

Microgranite is composed primarily of quartz (15–25%), microcline (20–50%), plagioclase (20–40%), and biotite (5–10%) and has a medium to coarse grained texture (Figure 2, *a*). Recrystallized quartz has two generations. This indicates that there



a

has been deformation. Sericite and muscovite are discovered after plagioclase. Plagioclase exhibits sericitization and epidotization as a result of hydrothermal activity [11; 12]. Plagioclase zoning shows epidote and sericite from core to rim (Figure 2, *b*). Furthermore, chlorite, epidote, and calcite are secondary minerals. Accessory minerals include opaque minerals such as zircon and apatite.



b

Figure 2. A microscopic examination of granitic and diorite rocks:
a – granitic rocks with quartz, plagioclase, and biotite (analyzer out);
b – plagioclase grain partially mixed with a sericite aggregate (analyzer in)

2.2. Geochemical properties and granitic rocks types

Table 1 shows the major oxides and geochemical compositions of granitoid rocks. Classification of granitoid rocks using TAS diagram [13] shows that most rocks are granite and one sample is syenodiorite (Figure 3, *a*), similarly the classification based on Middlemost diagram [14], total alkali vs. silica demonstrate the rocks as granite, monzodiorite, and monzonite (Figure 3, *b*). The investigated granite samples have a high SiO₂ contents ranging from 76.15 to 59.55 wt.%.

Diorite shows and silica content about (52.9 wt.%). Granite samples have high total alkalis K₂O + Na₂O ranging between (7–10 wt.%), moderate K₂O/Na₂O ratios ranging from 0.35 to 0.85, and low to intermediate CaO (0.5 to 6 wt.%), that followed by low content of P₂O₅ (0.01 to 0.5%). The LOI (loss on ignition) values ranging from 0.6 to 2 wt.% which is reflect low value. On the K₂O with SiO₂ diagram [15], the investigated samples fall into the

high-K calc-alkaline series to slightly calc alkaline series (Figure 3, *c*).

Similarly, the AFM diagram (A = K₂O + Na₂O, F = FeOt, and M = MgO) [16], demonstrates the evolution of magma from tholeiite into calc alkaline series (Figure 3, *d*).

Al saturation index A/CNK molar (Al₂O₃/CaO + Na₂O + K₂O) vs. A/NK molar (Al₂O₃/Na₂O + K₂O) diagram is plotted and shows the samples plot within the metaluminous field to slightly peraluminous (Figure 3, *e*) based on the SiO₂ vs. FeOt/(FeOt + MgO) diagram (Figure 3, *f*), determine the samples are magnesian. Both diagrams indicate the type of granite as I-type granite which is related to igneous origin and absence of involving of sedimentary materials.

The result of CIPW norm present in Table 2, norm of granite shows quartz ranging from 5 to 30 wt.%, that indicates the granite standard. The investigated samples have a high albite with values ranging from 37.5 to 50.5 wt.%, and mode-

rate orthoclase content, with values ranging between, 14.5 to 21.5 wt.%. The norm of corundum in most sample shows 0 value and the rest of samples shows values less than 1 in the average of 0.5 wt.%. These result implying, I-type granite [17; 18]. Using

the normative result with more than 10% of Quartz, Ab-An-Or diagram has been plotted (Figure 4, a). the diagram shows the trondhjemite as dominant plutonic rock type, granite and tonalite represent the rest of the samples.

Table 1

Compositions of whole rock major oxides in granitoid rocks

| Major oxides, wt. % | Samples | | | | | | | | |
|------------------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | MG1 | MG2 | MG3 | LG1 | LG2 | LG3 | BG1 | BG3 | D1 |
| SiO ₂ | 70.64 | 70.45 | 69.85 | 73.43 | 76.17 | 74.62 | 69.52 | 59.54 | 52.89 |
| Al ₂ O ₃ | 14.62 | 15.17 | 14.82 | 12.71 | 12.89 | 13.84 | 15.38 | 17.3 | 17.95 |
| Na ₂ O | 5.29 | 4.89 | 4.94 | 5.98 | 5.84 | 5.63 | 4.42 | 5.33 | 5.34 |
| MgO | 0.53 | 0.46 | 0.75 | 0.19 | 0.1 | 0.08 | 0.82 | 1.65 | 3.95 |
| K ₂ O | 3.47 | 3.43 | 3.45 | 2.44 | 2.47 | 3.61 | 3.67 | 3.5 | 2 |
| CaO | 2.06 | 1.81 | 1.99 | 2.77 | 0.95 | 0.53 | 2.23 | 4.81 | 6.37 |
| TiO ₂ | 0.23 | 0.22 | 0.21 | 0.02 | 0.03 | 0.02 | 0.39 | 0.66 | 1.18 |
| MnO | 0.043 | 0.037 | 0.038 | 0.015 | 0.022 | 0.007 | 0.033 | 0.093 | 0.096 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.93 | 1.82 | 1.98 | 0.28 | 0.52 | 0.36 | 2.51 | 5.02 | 7.61 |
| P ₂ O ₅ | 0.09 | 0.07 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.14 | 0.28 | 0.53 |
| LOI | 0.81 | 1.19 | 1.58 | 2.13 | 0.83 | 1.13 | 0.64 | 1.34 | 1.08 |
| SUM | 99.71 | 99.55 | 99.68 | 99.98 | 99.84 | 99.85 | 99.75 | 99.52 | 98.99 |
| A/NK | 1.17 | 1.29 | 1.25 | 1.02 | 1.05 | 1.05 | 1.37 | 1.38 | 1.64 |
| A/CNK | 0.902 | 1.01 | 0.957 | 0.725 | 0.92 | 0.979 | 1.005 | 0.812 | 0.796 |
| K ₂ O/Na ₂ O | 0.655 | 0.701 | 0.698 | 0.408 | 0.422 | 0.641 | 0.83 | 0.656 | 0.374 |
| Na ₂ O/K ₂ O | 1.52 | 1.43 | 1.42 | 2.45 | 2.36 | 1.56 | 1.2 | 1.52 | 2.67 |

Table 2

CIWP norm for investigated samples

| Mineral, wt. % | Samples | | | | | | | | |
|----------------|---------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | MG1 | MG2 | MG3 | LG1 | LG2 | LG3 | BG1 | BG3 | D1 |
| Quartz | 22.45 | 24.5 | 23.05 | 25.95 | 31.25 | 27.01 | 24.15 | 5.15 | 0 |
| Corundum | 0 | 0.23 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0 | 0 |
| Orthoclase | 20.5 | 20.3 | 20.5 | 14.5 | 14.5 | 21.5 | 21.5 | 20.6 | 11.8 |
| Albite | 44.7 | 41.5 | 41.8 | 50.5 | 49.5 | 47.6 | 37.4 | 45.1 | 45.2 |
| Anorthite | 5.8 | 8.5 | 8 | 0.63 | 1.66 | 1.83 | 10.15 | 12.94 | 19.10 |
| Diopside | 2.4 | 0 | 0.59 | 1.02 | 0.53 | 0.43 | 0 | 5.57 | 3.85 |
| Wollastonite | 0 | 0 | 0 | 4.89 | 0.92 | 0.03 | 0 | 0 | 0 |
| Hypersthene | 0.2 | 1.14 | 1.594 | 0 | 0 | 0 | 2.04 | 1.53 | 1.67 |
| Olivine | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.47 |
| Ilmenite | 0.09 | 0.07 | 0.08 | 0.03 | 0.04 | 0.02 | 0.071 | 0.3 | 0 |
| Hematite | 1.9 | 1.82 | 1.98 | 0.28 | 0.52 | 0.36 | 2.51 | 5.02 | 7.6 |
| Sphene | 0.5 | 0 | 0.41 | 0.008 | 0.02 | 0.03 | 0 | 1.4 | 2.89 |
| Rutile | 0 | 0.17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.35 | 0 | 0 |
| Apatite | 0.2 | 0.16 | 0.16 | 0.02 | 0.05 | 0.05 | 0.33 | 0.66 | 1.25 |
| Pyrite | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.16 |
| Sum | 98.9 | 98.4 | 98.11 | 97.85 | 99.02 | 98.73 | 99.13 | 98.20 | 98.02 |

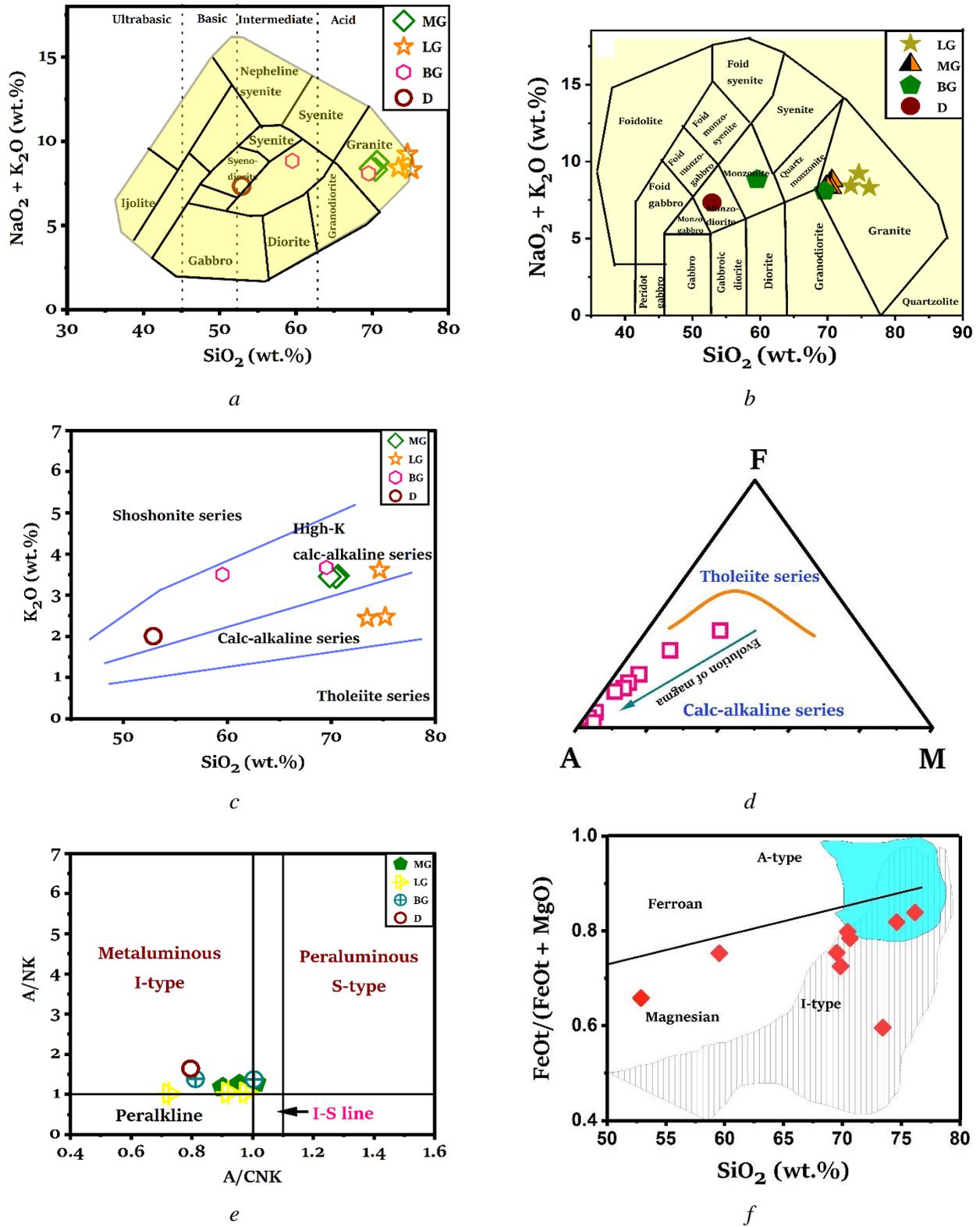


Figure 3. Plots and classification of the Miass granitoid's major oxides:
 a – total alkali silica of plutonic rocks [13]; b – TAS diagram for granitoid classification [14];
 c – SiO₂ versus K₂O diagram [15], showing the presence of granitoid rocks among the high-K calc-alkaline series;
 d – AFM diagram with A = (K₂O + Na₂O), F = FeO, and M = MgO [16], showing rock samples from the calc-alkaline series with high K₂O + Na₂O;
 e – Al saturation index A/CNK molar [Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)] versus A/NK molar [Al₂O₃/(Na₂O+K₂O)] diagram, indicating metaluminous to peraluminous samples;
 f – as a result of the SiO₂ vs FeO_t/(FeO_t + MgO) diagram, all of the samples are magnesian

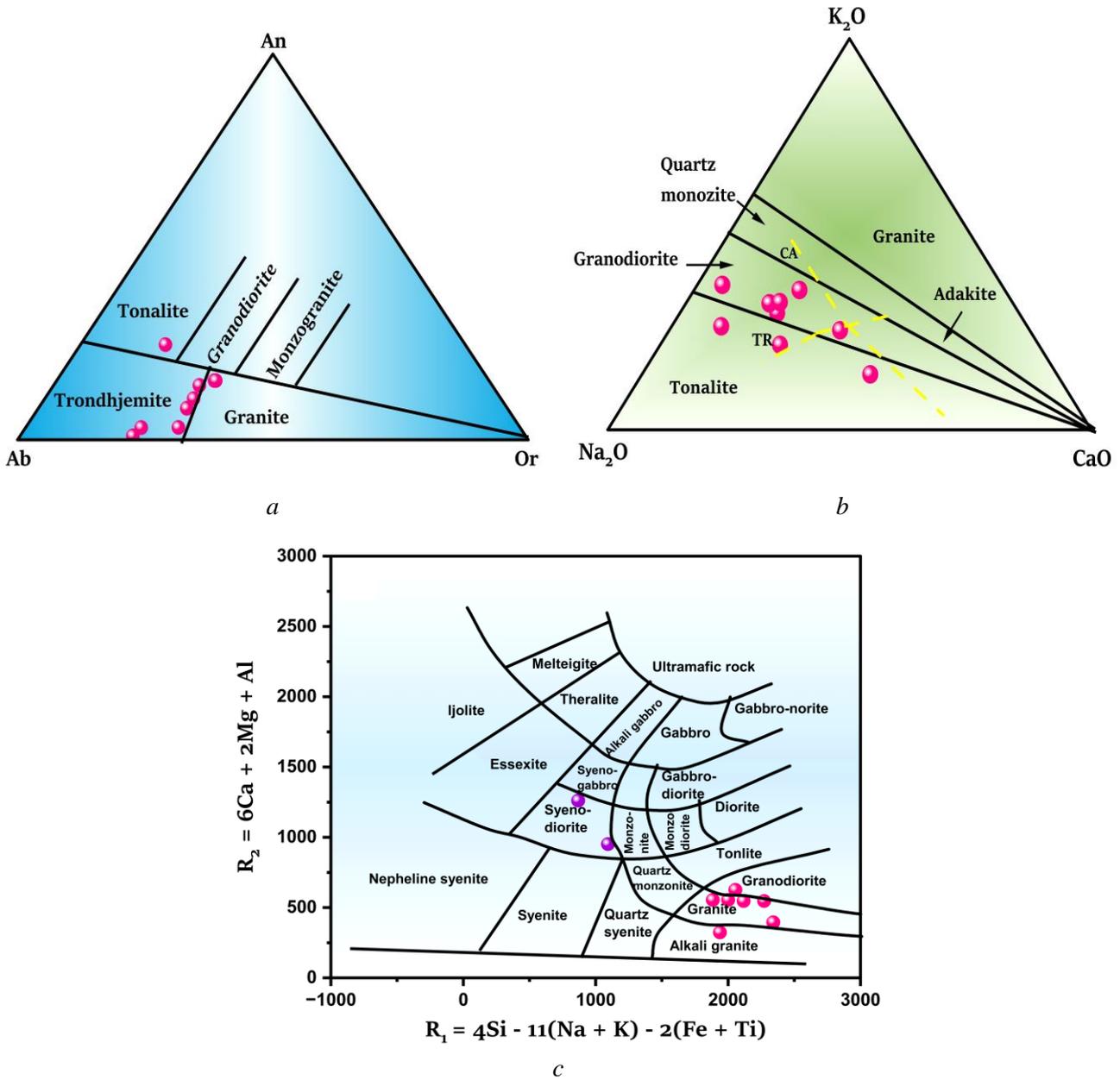


Figure 4. Classifying the igneous rocks using the norm and cations:
 a – normative Ab-An-Or ternary plot and classification of rocks in the study area using Barker's scheme (1979) [20];
 b – Na₂O-K₂O-CaO ternary plot for Southern Ural studied rocks, Barker's (1979) [20], calc-alkaline (CA) and trondhjemitic (TR) differentiation trends are represented by dashed curves;
 c – the classification of plutonic rocks using the parameter R₁ & R₂ after [19] calculated from millication proportions, R₁ = 4Si – 11(Na + K) – 2(Fe + Ti), R₂ = (Al + 2Mg + 6Ca)

On Na₂O-k₂O-CaO diagram (Figure 4, b) define a continuous range from tonalite/trondhjemite to granodiorite as the most observable samples.

Using the categorization diagram (Figure 4, c) from [19], for plutonic igneous rocks based on their millications or cation proportions, that widely use and more accurate in classification of plutonic rocks. The plotting parameters R₁ and R₂ are used

to plot the data on an x-y bivariate graph. R₁ is defined as [4Si – 11(Na + K) – 2(Fe + Ti)] and is displayed on the *r*-axis. Fe stands for total iron. R₂ is shown as a plot along the *y*-axis and has the formula R₂ = (Al + 2Mg + 6Ca). The samples define a continuous range from granite to alkali granite, granodiorite, and syenodiorite, with granite being the most common.

Conclusion

Granite is silica-enriched with SiO₂ ranging between (~76.14–59.54 wt.%) however, diorite shows intermediate chemical composition of SiO₂ (~52.89 wt.%). The studied samples show high total alkalis K₂O + Na₂O = (7.34–9.24 wt.%), K₂O/Na₂O display moderate ratios ranging from (~0.83–0.37). Low CaO (0.53–6.37 wt.%), and P₂O₅ (0.01–0.53 wt.%) contents. The rocks belong to the high-K calc-alkaline series to slightly calc alkaline series, and they are metaluminous.

The results show that the majority of the rock samples are classified as trondhjemite to slightly tonalite. The samples in the normative Na₂O-k₂O-CaO have defined a continuous range as the most observable samples, ranging from tonalite/trondhjemite to granodiorite.

The petrography investigation of this study revealed ore minerals and indications of hydrothermal solution suggesting mineralization process. The massive associated with many deposits and mineralization such as gold, skarn, and rare earth deposits.

References

- Xie L, Liu Y, Wang R, Hu H, Che X, Xiang L. Li–Nb–Ta mineralization in the Jurassic Yifeng granite-aplite intrusion within the Neoproterozoic Jiuling batholith, South China: a fluid-rich and quenching ore-forming process. *Journal of Asian Earth Sciences*. 2019;185:104047. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104047>
- Makagonov EP, Muftahov VA. Rare-earth and rare-metal mineralization in late granite of Syrostan massif (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*. 2015;(2):121–132. (In Russ.) Макагонов Е.П., Муфтахов В.А. Редкоземельно-редкометаллическая минерализация в поздних гранитах Сыростанского массива (Южный Урал) // Литосфера. 2015. № 2. С. 121–132.
- Fershtater GB, Krasnobaev AA, Bea F, Montero P, Borodina NS. Geodynamic settings and history of the Paleozoic intrusive magmatism of the central and southern Urals: results of zircon dating. *Geotectonics*. 2007;41(6):465–486. <https://doi.org/10.1134/S0016852107060039>
- Kholodnov VV, Shardakova GYu, Puchkov VN, Petrov GA, Shagalov E, Salikhov DN, Korovko AV, Pribavkin SV, Rakhimov I, Borodina NS. Paleozoic granitoid magmatism of the Urals: the reflection of the stages of the geodynamic and geochemical evolution of a collisional orogen. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2021;12(2):225–245. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-2-0522>
- Fershtater GB, Borodina NS, Bea F, Montero P. Model of mantle-crust interaction and magma generation in the suprasubduction orogen (Paleozoic of the Urals). *Lithosphere (Russia)*. 2018;18(2):177–207. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-2-177-207> Ферштатер Г.Б., Бородина Н.С., Беа Ф., Монтеро П. Модель мантийно-корового взаимодействия и сопряженного магматизма в надсубдукционном орогене (палеозой Урала) // Литосфера. 2018. Т. 18. № 2. С. 121–132. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2018-18-2-177-207>
- Georgievskiy AF, Bugina VM, Kotelnikov AE, Georgievskiy AA, Mahinja E, Gamilton ZA, Vein-rock in the Dark Kingdom Marble Deposit (South Ural) and their possible connection with gold ore mineralization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;666(2):022024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/666/2/022024>
- Bea F, Fershtater GB, Montero P, Smirnov VN, Molina JF. Deformation-driven differentiation of granitic magma: the Stepninsk pluton of the Uralides, Russia. *Lithos*. 2005;81(1–4):209–233. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.10.004>
- Salikhov DN, Kholodnov VV, Puchkov VN, Rakhimov IR. Volcanism and intrusive magmatism of the Magnitogorsk paleoarc in the epoch of its ‘soft’ collision with a margin of the east European continent. *Lithosphere (Russia)*. 2020;20(5):630–651. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-630-651> Салыхов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р. Вулканизм и интрузивный магматизм Магнитогорской палеодуги в эпоху «мягкой» коллизии с окраиной Восточно-Европейского континента // Литосфера. 2020. Т. 20. № 5. С. 630–651. [tps://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-630-651](https://doi.org/10.24930/1681-9004-2020-20-5-630-651)
- Scarrow JH, Ayala C, Kimbell GS. Insights into orogenesis: getting to the root of a continent-ocean-continent collision, Southern Urals, Russia. *Journal of the Geological Society*. 2002;159(6):659–671. <https://doi.org/10.1144/0016-764901-147>
- Stadlander R, Mechie J, Schulze A. Deep structure of the Southern Ural mountains as derived from wide-angle seismic data. *Geophysical Journal International*. 1999;137(2):501–515. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.1999.00794.x>
- Pittarello L, Levi N, Wegner W, Stehlik H. The pseudotachylytes at the base of the Silvretta Nappe: a newly discovered recent generation and the tectonometamorphic evolution of the Nappe. *Tectonophysics*. 2022;822:229185. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.229185>
- Chen Y, Niu Y, Shen F, Gao Y, Wang X. New U–Pb zircon age and petrogenesis of the plagiogranite, Troodos ophiolite, Cyprus. *Lithos*. 2020;362–363:10547. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105472>
- Cox KG, Bell JD, Pankhurst RJ. Quaternary systems. *The Interpretation of Igneous Rocks*. Dordrecht: Springer; 1979. p. 197–221. https://doi.org/10.1007/978-94-017-3373-1_8

14. Middlemost EAK. Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Science Reviews*. 1994;37(3–4): 215–224. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(94\)90029-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(94)90029-9)
15. Peccerillo A, Taylor SR. Geochemistry of eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1976;58(1):63–81. <https://doi.org/10.1007/BF00384745>
16. Irvine TN, Baragar WRA. A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal Earth Sciences*. 1971;8(5):523–548. <https://doi.org/10.1139/e71-055>
17. Ahnaf JS, Patonah A, Permana H. Petrogenesis of volcanic arc granites from Bayah complex, Banten, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*. 2019;4(2):3171. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2019.4.2.3171>
18. Chappell BW, Bryant CJ, Wyborn D. Lithoperaluminous I-type granites. *Lithos*. 2012;153:142–153. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2012.07.008>
19. De la Roche H, Leterrier J, Grandclaude P, Marchal M. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2-diagram and major-element analyses – its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*. 1980;29(1–4): 183–210. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(80\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(80)90020-0)
20. Barker F. Chapter 1 – Trondhjemite: definition, environment and hypotheses of origin. *Developments in Petrology*. 1979;6:1–12. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-41765-7.50006-X>

About the authors

Mohammed Abdalla Elsharif Ibrahim, PhD student, Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5634-5695, Scopus Author ID: 57200327978, eLIBRARY SPIN-code: 8757-5907; mohammedel-sharif7@gmail.com

Vladimir N. Kuleshov, Doctor of Sciences (Geochemistry), chief researcher, Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7 Pyzhevskii Pereulok, Moscow, 119017, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4925-5154, Scopus Author ID: 8073984000, eLIBRARY SPIN-code: 5867-2758; vnkuleshov@mail.ru

Alexander E. Kotelnikov, PhD in Geology, Associate Professor, Head of the Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-0622-8391, Scopus Author ID: 57205586833, Researcher ID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-code: 6280-5070; kotelnikov-ae@rudn.ru

Alexey F. Georgievskiy, Doctor of Sciences (Geological and Mineralogical), Associate Professor of the Department of Mineral Development and Oil & Gas Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4835-760X, Scopus Author ID: 57212305311, eLIBRARY SPIN-code: 1308-9195; georgievskiy-af@rudn.ru

Samia Abdelrahman Ibrahim, PhD in Geology, Head of the Department of Geology, Faculty of Science, University of Khartoum, Al-Gama'a Avenue, Khartoum, 11111, Republic of Sudan; samiaibrahim125@gmail.com

Сведения об авторах

Ибрахим Мохаммед Абдалла Альшариф, аспирант, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-5634-5695, Scopus Author ID: 57200327978, eLIBRARY SPIN-код: 8757-5907; mohammedelsharif7@gmail.com

Кулешов Владимир Николаевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Геологический институт, Российская академия наук, Российская Федерация, 119017, Пыжевский пер., д. 7; ORCID: 0000-0003-4925-5154, eLIBRARY SPIN-код: 5867-2758; vnkuleshov@mail.ru

Котельников Александр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, директор департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-0622-8391, Scopus Author ID: 57205586833, Researcher ID: O-3821-2019, eLIBRARY SPIN-код: 6280-5070; kotelnikov-ae@rudn.ru

Георгиевский Алексей Федорович, доктор геолого-минералогических наук, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0003-4835-760X, Scopus Author ID: 57212305311, eLIBRARY SPIN-код: 1308-9195; georgievskiy-af@rudn.ru

Ибрахим Самия Абдельрахман, кандидат геологических наук, директор департамента геологии, факультет естественных наук, Хартумский университет, Республика Судан, 11111, Хартум, пр-кт Аль-Гамаа; samiaibrahim125@gmail.com



DOI: 10.22363/2312-8143-2023-24-1-95-104

EDN: CTEBGK

UDC 553.432

Research article / Научная статья

Image processing for ASTER remote sensing data to map hydrothermal alteration zones in East Kazakhstan

Hamza A. Mahmoud^a, Elena V. Karelina^a✉, Vladimir E. Markov^a,
Viktor V. Diakonov^b, Ilya V. Vikentyev^c

^aRUDN University, Moscow, Russian Federation

^bSergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russian Federation

^cInstitute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

✉ karelina-ev@rudn.ru

Article history

Received: December 12, 2022

Revised: February 14, 2023

Accepted: February 18, 2023

Keywords:

ASTER satellite images, hydrothermal alteration rocks, principal component analysis, satellite images interpretation

Abstract. Porphyry copper deposits are accompanied by extensive aureoles of hydrothermally altered rocks which make it possible to detect them on satellite images in the absence of vegetation. The study is devoted to using the Earth's remote sensing data, particularly, satellite images from the Japanese sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), which are used to identify areas that are promising for the discovery of porphyry copper deposits and ore occurrences within the copper belt of Kazakhstan. The analysis of numerous publications that offer various methods for processing ASTER images for the interpretation of hydrothermally altered rocks accompanying porphyry copper occurrences showed that the most effective method for this region is the Crosta technique. The Crosta technique, unlike other methods, does not use primary bands, but their combinations are obtained by the principal components analysis method. Thus, the combination of the results of the principal components analysis with the use of index images and analysis of the geological map made it possible to identify areas of hydrothermally altered rocks in the study area. The described technique helps to predict promising areas for porphyry copper mineralization of varying degrees of reliability, associated with their hydrothermal processing.

For citation

Mahmoud HA, Karelina EV, Markov VE, Diakonov VV, Vikentyev IV. Image processing for ASTER remote sensing data to map hydrothermal alteration zones in East Kazakhstan. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2023;24(1):95–104. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-95-104>



Обработка данных дистанционного зондирования ASTER для картирования зон гидротермальных изменений в Восточном Казахстане

Х.А. Махмуд^a , Е.В. Карелина^a  , В.Е. Марков^a , В.В. Дьяконов^b , И.В. Викентьев^c 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bРоссийский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Москва, Российская Федерация

^cИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Российская Федерация

 karelina-ev@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 12 декабря 2022 г.

Доработана: 14 февраля 2023 г.

Принята к публикации: 18 февраля 2023 г.

Ключевые слова:

космоснимки ASTER, метод главных компонент, гидротермально измененные породы, дешифрирование космоснимков

Аннотация. Медно-порфиновые месторождения сопровождаются обширными ореолами гидротермально измененных пород, значительно превосходящих их по площади, которые позволяют обнаруживать их на космических снимках в условиях отсутствия растительности. Исследуются использование данных дистанционного зондирования Земли, в частности космических снимков японского сенсора ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), для выделения участков, перспективных на обнаружение медно-порфиновых месторождений и рудопроявлений в пределах медного пояса Казахстана. Анализ многочисленных публикаций, в которых предлагаются различные методы обработки снимков ASTER для дешифрирования гидротермально измененных пород, сопровождающих медно-порфиновые рудопроявления, показал, что наиболее эффективным из них для данного района является метод Crosta. В отличие от других методов он использует не первичные полосы (band), а их комбинации, полученные методом главных компонент. Таким образом, сочетание результатов метода главных компонент с применением индексных изображений и анализа геологической карты позволило выделить области гидротермально измененных пород в районе исследований. На основании описанной методики определены прогнозные участки, перспективные на медно-порфировое оруденение различной степени достоверности, связанные с их гидротермальной переработкой.

Для цитирования

Mahmoud H.A., Karelina E.V., Markov V.E., Diakonov V.V., Vikentyev I.V. Image processing for ASTER remote sensing data to map hydrothermal alteration zones in East Kazakhstan // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2023. Т. 24. № 1. С. 95–104. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2023-24-1-95-104>

Introduction

Remote sensing is a widely used tool in mineral exploration, as it has replaced the physical approach to discovering deposits. The physical approach required spending much time, effort, and money looking for geological studies.

Since 1920, the use of aerial photographic interpretation in the field of Earth sciences has become a fast and effective tool for the exploration of natural resources [1]. Therefore, the launch of Landsat-1 in 1972 and the continued development of new sensors have increased the spatial-temporal-spectral resolution of Earth observation data [2]. This made the digital imagery of the electromagne-

tic spectrum available for interpretation and use in mineral explorations in a short time.

Remote sensing is a comprehensive method that enables scientists to identify an object, by collecting all needed information about it. The interpretation of satellite images requires applying two basic paradigms, namely, data-driven, and knowledge-driven models. Both models are the dominant paradigms for spatio-temporal modeling and spatio-temporal decision-making [2].

The main idea behind this is that everything on Earth has its unique spectral signature, which provides the ability to identify features or abstract information about what is displayed on Earth's surface. Spectral sig-

nature is the energy reflected from features on earth and stored as bands. Mostly, bands will capture the visible, NIR, and SWIR regions which tend to contain more useful information about the earth's surface.

Minerals have distinctive spectral reflectance patterns at visible wavelengths and especially at reflected IR wavelengths [3]. Multispectral image data has been used for mapping hydrothermal alteration zones. Since 2000, and after the launch of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) in 1999, it has become more applicable for mineralogical and lithological studies to be run using the multispectral images provided by ASTER on a wide range of samples. ASTER covers a wide spectral region of the electromagnetic spectrum, from visible near-infrared (VNIR) to thermal infrared (TIR) [4].

The spectral range in ASTER consists of three main subsystems with different spatial resolutions and wavelengths. the subsystems are Visible near-infrared (VNIR), shortwave infrared (SWIR), and thermal infrared (TIR) [4].

SWIR spectral bands were designed to identify reflected radiation to distinguish Al-OH, Fe, Mg-OH, Si-O-H, and CO₃ absorption features [5]. Therefore, scientists could identify specific hydrothermal alteration minerals like alunite, kaolinite, calcite, dolomite, chlorite, talc, and muscovite, as well as

mineral groups. Hence, the SWIR properties make it suitable for mapping alteration zones in mineral exploration [6].

Applying statistical methods to the produced maps from remote sensing has been helping scientists with different approaches to analyzing point data but also filtering the data (removing missing pixels or filling the voids). Also, combining statistical methods with GIS layers obtained from remote sensing helps improve the generation of DEMs, simulate them, and optimize spatial sampling, the selection of spatial resolution for image data, and the selection of support size for ground data. Geostatistics is a subset of statistical methods used to analyze and interpret geographical data. Geostatistics enables mapping environmental variables using different techniques [7].

Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer give us the potential to map mineralogical alteration zones at low cost with high accuracy. Mapping these zones is important to distinguish high-potential areas of economical mineralization such as epithermal gold and hydrothermal porphyry copper deposits. Hydrothermal porphyry deposits consist of alteration mineral zones (Figure 1) [8]. These zones (phyllitic, argillic, and propylitic) contain minerals that can be distinguished from each other using SWIR from ASTER data [9–11].

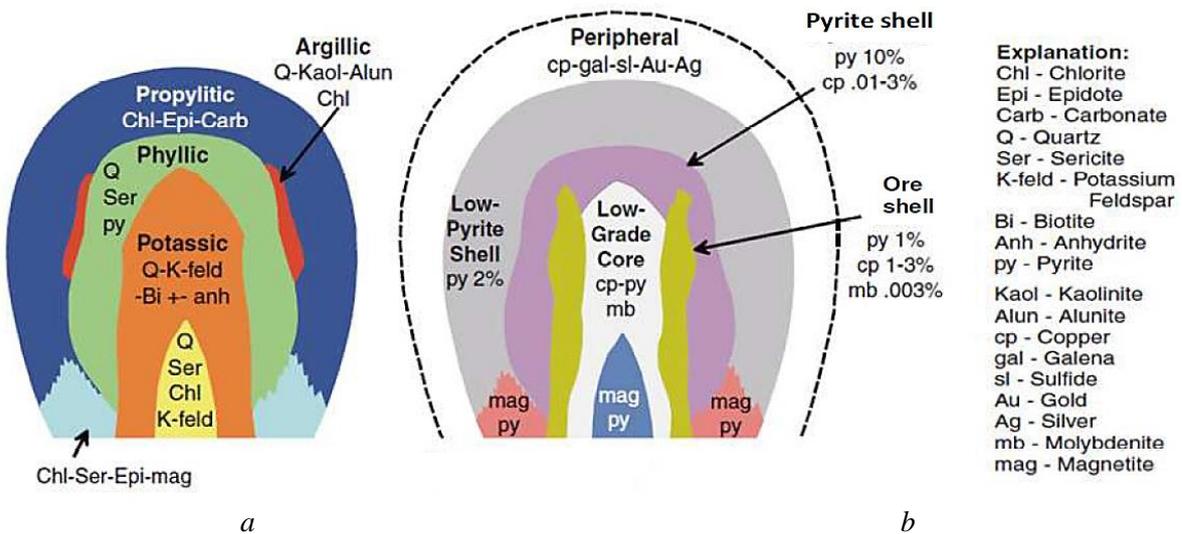


Figure 1. Hydrothermal alteration zones are associated with porphyry copper deposits:
a – a schematic cross-section of hydrothermal alteration mineral zones, which consist of propylitic, phyllic, argillic, and potassic alteration zone;
b – a schematic cross-section of ores associated with each alteration zone

1. Geological settings

Hydrothermal deposits of porphyry copper are usually formed in areas of magmatic rock development. The deposits are usually associated with calc-alkaline plutons. Each hydrothermal copper-porphyry deposit is characterized by hydrothermal alteration mineral zones.

The area under consideration is characterized by low vegetation, which could mask part of the data, causing problems in image processing. It is located within the Zhilanda-Aygyz subzone of the Predchingiz zone. The study is in the Eastern Pribalkhash region and represents a fragment of the Kazakhstan Copper Belt.

To locate areas with copper, molybdenum, lead, and zinc anomalies, as well as to locate pink rhyolite porphyry in the central zone, where contact changes are apparent and suggest the presence of a copper-molybdenum porphyry mineralization process, Viktor V. Diakonov and Alexander E. Kotelnikov, 2016 conducted geological and geochemical analysis in the study area in 2016. They also linked these data to geophysical anomalies to further their understanding of the research area [12; 13].

2. Multispectral properties of hydrothermal alteration zone by ASTER data

The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer is a multispectral remote sensing instrument that is a highly spatial, spectral, and radiometric instrument. ASTER is a cooperative effort between the Japanese Ministry of Economic Trade and Industry (METI) and the National Aeronautics and Space Administration (NASA). It was launched in December 1999.

ASTER consists of three main subsystems with a total of 14 bands that provide observation in these three different spectral regions of the electromagnetic spectrum: visible near-infrared (VNIR), shortwave infrared (SWIR), and thermal infrared (TIR), which contain 3, 6, and 5 bands, respectively, with different ranges of wavelength. In the VNIR subsystem, bands' ranges differ (from 0.52 to 0.86 μm) with a spatial resolution of 15 m. While the SWIR subsystem's bands' ranges differ (from 1.6 to 2.43 μm) with a spatial resolution of 30 m, TIR, the last subsystem, has bands' ranges (from 0.1.6 to 2.43 μm) with a spatial resolution of 90 m [6].

ASTER provides data that can be useful in a wide range of scientific investigations and applications,

including (a) geology studies, (b) climatology studies, (c) volcano monitoring, (d) hydrothermal and water resource applications, and in other different fields of science [14]. It has significant properties widely applied in geology: (1) it allows the discrimination and identification of hydrothermal alteration minerals in the SWIR electromagnetic region; (2) it gives the ability to identify the vegetation and iron oxide minerals on the surface and map carbonates and silicates [15; 16]. ASTER generates two data products: Level-1A, which is raw image data, and Level-1B, which is a data product generated from Level-1A by applying radiometric and geometric correction coefficients [17].

3. Image analysis

Different image-processing techniques can be used on ASTER data, such as principal component analysis (PCA), band ratio, and minimum noise fraction (MNF) [18; 19]. The alteration zone as described previously is separated into three main parts; each of these zones is distinguished by specific minerals that work as indicators as they all have different spectra (Figure 2).

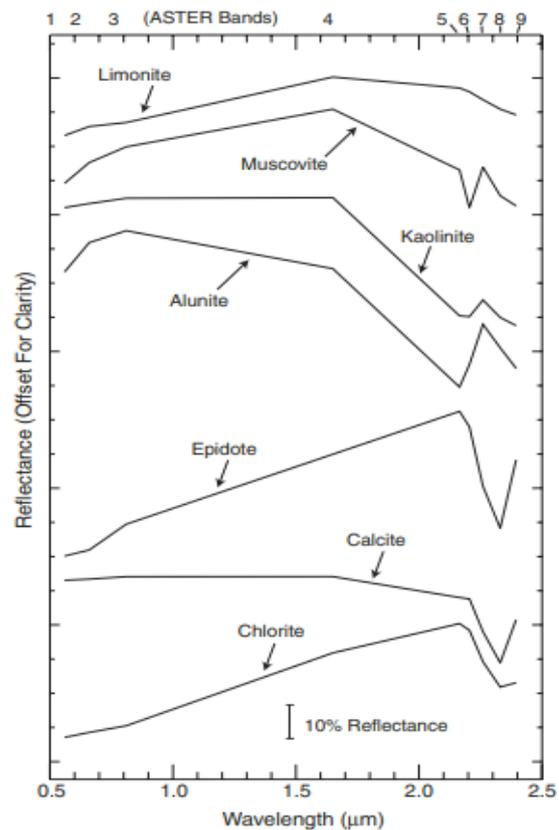


Figure 2. Laboratory spectra of common hydrothermal alteration minerals [18]

ASTER minerals' spectra are important indicators for different hydrothermal alteration zones, as summarized in Figure 2, and can indicate the zone as follows: (1) muscovite as an indicator for phyllic alteration zones with a 2.20 μm absorption feature shown in the 6th ASTER band; (2) kaolinite and alunite as indicators for argillic alteration zones with a 2.20 and 2.17 μm , respectively, absorption feature shown in the 5th ASTER band; (3) epidote, chlorite, and calcite are associated with propylitic alteration zones with 2.31–2.33 μm absorption features shown in the 8th ASTER band. Therefore, these unique absorption features for minerals led to many useful approaches for mapping and discriminating hydrothermal alteration zones [3].

4. Principal component analysis

PCA used the principal component transformation technique to reduce the dimensionality of the correlated multispectral data. The PCA method is widely used to map alteration zones [18]. The PCA technique aims to extract specific spectral responses, as in the case of hydrothermal alteration minerals.

The likelihood of having a specific spectral contrast increases as the number of input channels decreases. In this study, the bands that have been used are those that have the potential to show more common spectral features of the alteration mineral.

To confirm the occurrence of minerals, a PCA technique was applied to find the relationship between the spectral responses of target minerals or rocks. The relationship is used to determine which of the PCs contain the spectral information due to the minerals and whether the pixels have high or low values related to the presence of the target mineral in that pixel or the absence of it [20].

Applying PCA to map hydrothermal alteration zones has been widely used as an advanced tool for statistical data reduction and satellite image processing. As it was recommended in the articles [21; 22] to map alteration minerals to indicate different alteration zones, for example, using a subset of ASTER bands (1, 4, 6, and 7) to map Kaolinite Also, band subsets (1, 3, 5, and 7) and (1, 3, 5, and 6) for mapping Alunite and Illite, respectively.

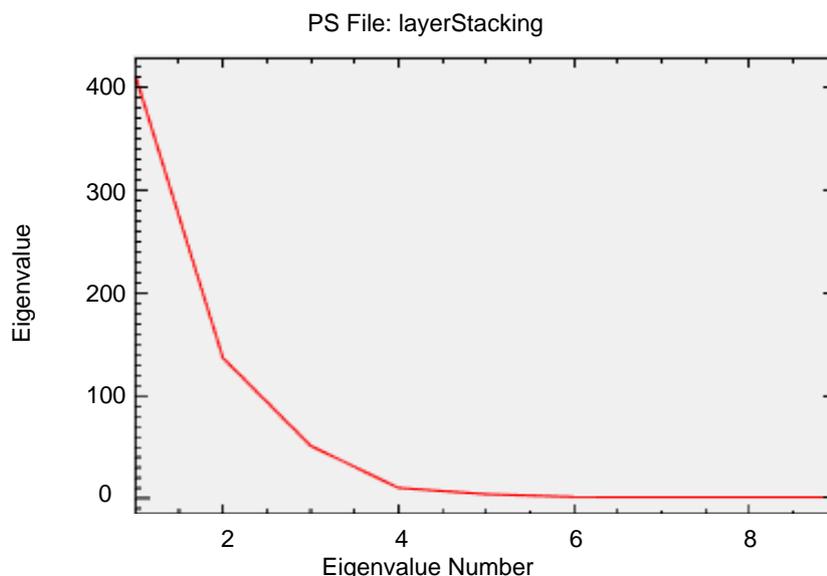


Figure 3. A curve showing that the first few bands contain most of the data, and the signal decreases with increasing noise towards the the curve tail (the graph is made using ENVI 5.3)

The eigenvalues of the 14 ASTER bands show that PC1, PC2, and PC3 have over 97% of the spectral information displayed in Figure 3; the rest of the low-order PCs have less than 3%; they usually contain low signal-to-noise ratios. PCs that contain more than 97% are widely used for lithological mapping [20].

5. Results and discussion

By applying the principal component analysis (PCA) to ASTER bands, we can highlight different areas of the hydrothermal alteration zones, as each zone has its rocks with specific minerals. Different minerals can be identified, like kaolinite and alu-

nite, which show an absorption behavior in band 6 due to Al-OH; these two also show a reflection behavior that corresponds with the argillic zone [23].

Illite, smectite, and sericite minerals give an absorption behavior in band 6 and a reflection behavior in band 5, which correspond with the phyllic zone. The propylite zone is shown as a response to the reflecting of chlorite, epidote, and calcite, which shows absorption behavior in the 8th band and reflecting behavior in the 5th band [23].

PCA is a statistical tool used to extract specific spectral features. In 1989, Crosta and Moore developed a PCA technique using Landsat TM to map oxide/hydroxide iron minerals related to sulfide ore bodies in the granite-greenstone belt. PCA is calculated by forming a relationship between the spectral responses of minerals under consideration and values extracted from the eigenvector matrix.

Using a few selected bands to avoid mapping certain materials like vegetation and applying PCA to them helps extract information about targeted materials (hydrothermal alteration). This procedure is called the “Crosta technique” and has been widely used for mineral exploration due to its ease [24].

Choosing subsets of ASTER bands proposed by Loughlin (1991) according to spectral features related to hydrothermal alteration minerals in VNIR and SWIR and applying PCA to each chosen subset gives information about the target mineral. To identify which PC has the target information, we choose the PC that has the highest eigenvector value difference among bands. In the application of PCA to ASTER bands, subsets 1, 4, 6, and 7 were used to successfully map the argillic alteration zone as bright pixels into the PC-3 image shown in Figure 4, *a*. This is evident by the low negative contribution of band 7 and the high positive contribution of band 4 (Table 1).

To map the phyllic alteration zone, we used subsets 1, 3, 5, and 6. The phyllic zone shows a dark color pixel value in the PC-4 image (Figure 4, *b*), due to the high positive contribution of band 5 and the low negative contribution of band 6 (Table 2).

Implementation of PCA in ASTER bands 1, 3, 5, and 7 suggests information on the propylitic alteration zone. The spatial map shows the alteration zone as bright pixels in PC-3 (Figure 4, *c*), due to the high positive contribution of band 3 and the low negative contribution of band 5 (Table 3).

Table 1

Eigenvectors values for PC bands 1, 4, 6, and 7

| Input layer | Eigenvectors | | | |
|-------------|--------------|---------|----------|----------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 |
| Band 1 | 0.69778 | -0.7139 | 0.05644 | 0.01627 |
| Band 4 | 0.35619 | 0.41171 | 0.83287 | -0.09976 |
| Band 6 | 0.44468 | 0.42624 | -0.31436 | 0.72233 |
| Band 7 | 0.43416 | 0.37303 | -0.45202 | -0.68413 |

Table 2

Eigenvectors values for PC bands 1, 3, 5, and 6

| Input layer | Eigenvectors | | | |
|-------------|--------------|----------|----------|----------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 |
| Band 1 | 0.7678 | -0.27059 | -0.58071 | -0.00636 |
| Band 3 | 0.42198 | -0.4684 | 0.77623 | -0.00297 |
| Band 5 | 0.3278 | 0.56166 | 0.16356 | 0.74184 |
| Band 6 | 0.3535 | 0.62603 | 0.18303 | -0.67054 |

Table 3

Eigenvectors values for PC bands 1, 3, 5 and 7

| Input Layer | Eigenvectors | | | |
|-------------|--------------|----------|----------|----------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 |
| band 1 | 0.77196 | -0.23351 | -0.59107 | 0.01353 |
| band 3 | 0.42365 | -0.50435 | 0.7524 | -0.00656 |
| band 5 | 0.32243 | 0.57527 | 0.21036 | 0.7217 |
| band 7 | 0.34732 | 0.60014 | 0.20068 | -0.69204 |

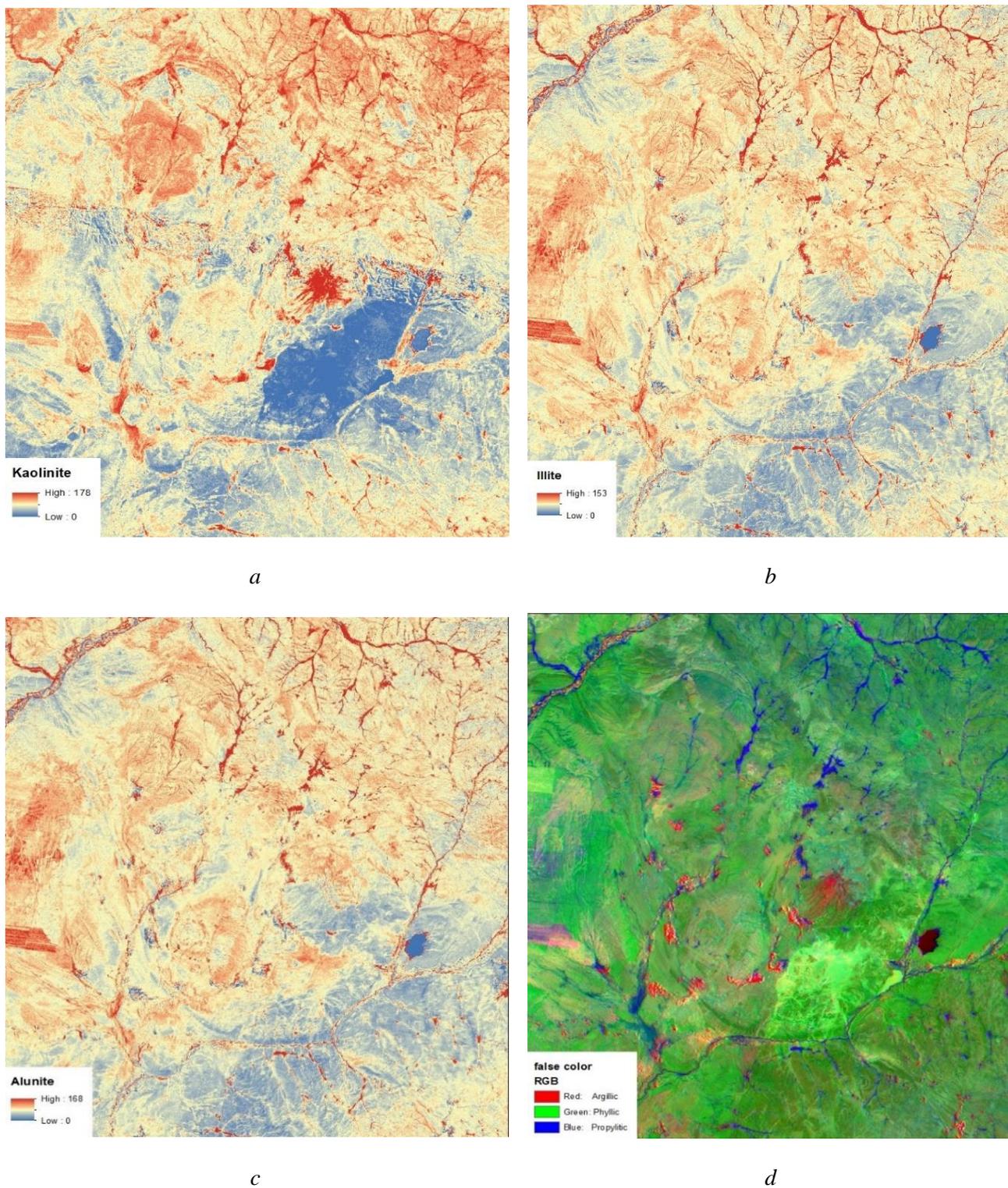


Figure 4. Applying the Crosta technique indicates places that show the presence or absence (the map is made using QGIS 3.18.3):

a – Kaolinite as an indicator of Argillic zone; b – Illite indicates Phyllic's zone;
c – Alunite indicates Propylitic's zone; d – false-color composite image of PC 3, PC 4, PC 3 image

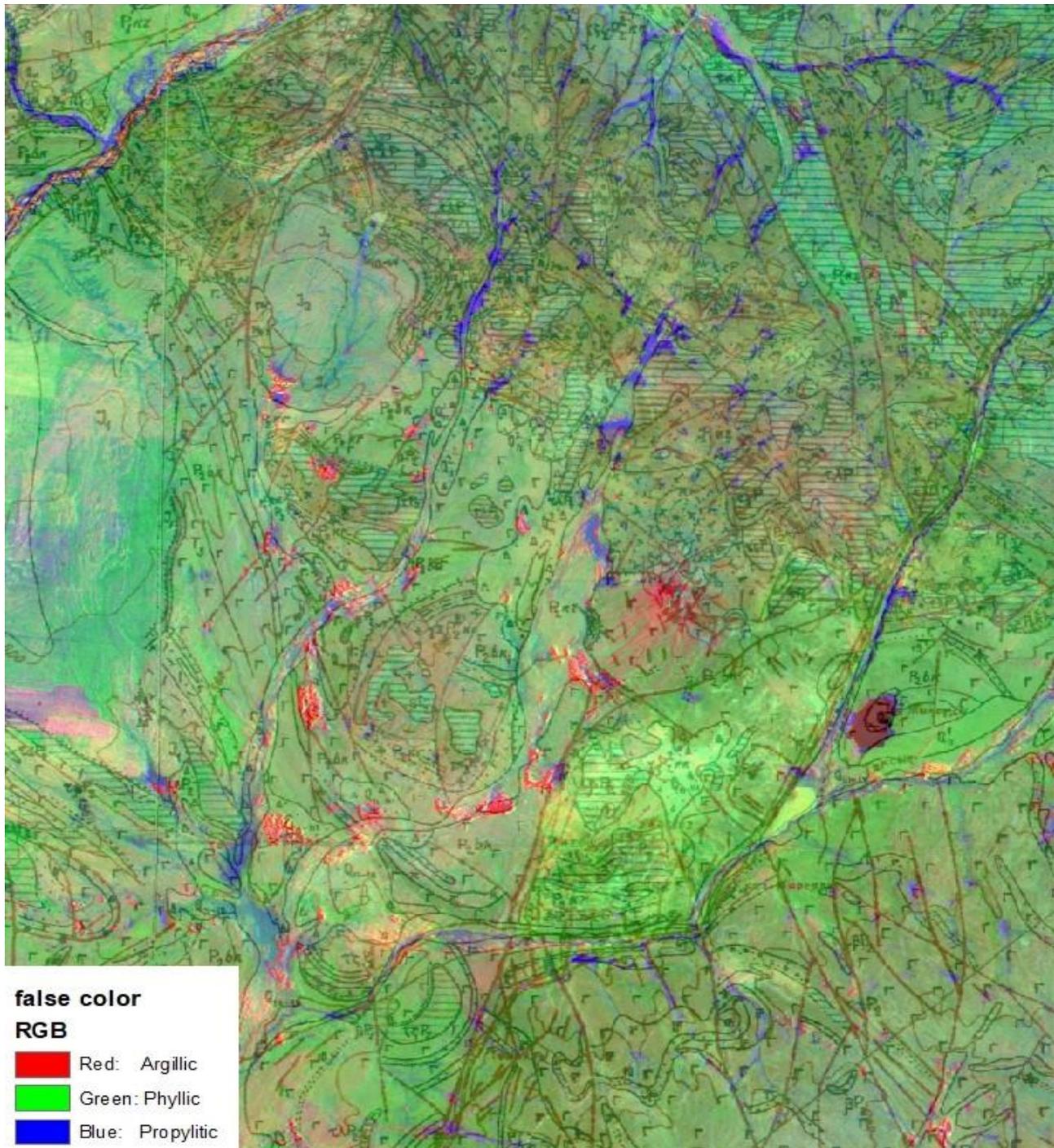


Figure 5. Predictions of hydrothermal alteration zones assigned as Argillic, Phyllic, and Propylitic on a geological base map [1; 2]

Conclusion

Analysis of ASTER satellite images using PCA and applying the Crosta technique gives promising findings and an understanding of the area under consideration. The satellite image interpretation and integration with

the geological map of the area show that PCA is an applicable technique to be used in our study area to map hydrothermal alteration zones. Also, the result shows that our study area is suitable for this kind of image processing as it is characterized by a low vegetation mask.

References

1. Haldar SK. *Mineral exploration principles and applications*. 2nd ed. Elsevier; 2018.
2. Yong G, Xining Z, Peter MA, Alfred S, Lianfa L. Geoscience-aware deep learning: a new paradigm for remote sensing. *Science of Remote Sensing*. 2022;5:100047. <http://doi.org/10.1016/j.srs.2022.100047>
3. Sabins FF. Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*. 1999;14:157–183. [http://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](http://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
4. Di Tommaso I, Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo Porphyry Deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*. 2007;32:275–290. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004>
5. Abrams M, Hook SJ. Simulated ASTER data for geologic studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1995;33:692–699. <https://doi.org/10.1109/36.387584>
6. Pour AB, Hashim M, Marghany M. Using spectral mapping techniques on short wave infrared bands of ASTER remote sensing data for alteration mineral mapping in SE Iran. *International Journal of the Physical Sciences*. 2011;6(4):917–929.
7. Tomislav H. A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables. *Geoderma*. 2007;140:417–427.
8. Lowell JD, Guilbert JM. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*. 1970;65:373–408.
9. Hunt GR, Ashley P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology*. 1979;74:1613–1629.
10. Mars JC, Rowan LC. Regional mapping of phyllic- and argillic-altered rocks in the Zagros Magmatic arc, Iran, using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data and logical operator algorithms. *Geosphere*. 2006;2:161–186.
11. Sillitoe RH. Porphyry copper systems. *Economic Geology*. 2010;105:3–41.
12. Kotelnikov AE, Fedosova KI. Paleovolcanic reconstruction of the Mednogorsk Ore District. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2016;(1):94–100. (In Russ.)
Котельников А.Е., Федосова К.И. Палеовулканическая реконструкция Медногорского рудного района // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2016. № 1. С. 94–100.
13. Diakonov VV. *Copper-porphyry deposits – conditions of localization and search*. Moscow: RUDN University; 2010.
Дьяконов В.В. Медно-порфировые месторождения – условия локализации и поиска: монография. М.: РУДН, 2010.
14. Pour AB, Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*. 2012;44:1–9. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.009>
15. Yoshiki N. Rock type mapping with indices defined for multispectral thermal infrared ASTER data: case studies. *Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology: Proceedings SPIE*. 2003;4886:123–132. <https://doi.org/10.1117/12.462358>
16. Rockwell BW, Hofstra AH. Identification of quartz and carbonate minerals across Northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data – implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier area. *Geosphere*. 2008;4:218–246.
17. Abrams M, Hook S, Ramachandran B. *ASTER user handbook* (vol. 2). Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology; 2004. Available from: http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_guide_v2.pdf (accessed: 20.09.2022).
18. Shahriari H, Ranjbar H, Honarmand M. Image segmentation for hydrothermal alteration mapping using PCA and concentration – area fractal model. *Natural Resources Research*. 2013;22(3):191–206. <https://doi.org/10.1007/s11053-013-9211-y>
19. Clark RN, Swayze GA, Gallagher AJ, King TVV, Calvin WM. *The U.S. geological survey digital spectral library. Version 1: 0.2 to 3.0 μm*. 1993. <https://doi.org/10.3133/ofr93592>
20. Rajendran S, Al-Khribash S, Pracejus B, Nasir S, Al-Abri AH, Kusky TM, Ghulam A. ASTER detection of chromite bearing mineralized zones in Semail Ophiolite Massifs of the northern Oman mountain: exploration strategy. *Ore Geology Reviews*. 2012;44:121–135. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.010>
21. Crosta A, Roberto C, Brodie C. Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*. 2003;21:4233–4240. <https://doi.org/10.1080/0143116031000152291>
22. El-Desoky HM, Tende AW, Abdel-Rahman AM, Ene A, Awad HA, Fahmy W, El-Awny H, Zakaly HM. Hydrothermal alteration mapping using Landsat 8 and ASTER data and geochemical characteristics of precambrian rocks in the Egyptian shield: a case study from Abu Ghalaga, Southeastern Desert, Egypt. *Remote Sensing*. 2022;14:3456. <https://doi.org/10.3390/rs14143456>
23. Rowan LC, Schmidt RG, Mars JC. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sensing Environment*. 2006;104:74–87. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2006.05.014>
24. Carranza EJM, Hale M. Spatial association of mineral occurrences and curvilinear geological features. *Mathematical Geology*. 2002;34:203–221. <https://doi.org/10.1023/A:1014416319335>

About the authors

Hamza A. Mahmoud, master's student, Department of Subsoil and Petroleum Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-2946-7144, eLIBRARY SPIN-code: 1929-6130; 1032205919@rudn.ru

Elena V. Karelina, PhD of Geology, Associate Professor of the Department of Mineral Developing and Oil & Gas Business, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0003-4691-4855, Scopus Author ID: 57215413670, eLIBRARY SPIN-code: 4919-8300; karelina-ev@rudn.ru

Vladimir E. Markov, senior lecturer, Department of Mineral Developing and Oil & Gas Business, Academy of Engineering, RUDN University, 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-6594-0763, eLIBRARY SPIN-code: 5882-5663; markov-ve@rudn.ru

Viktor V. Diakonov, Doctor of Science in Geology, Professor, Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting; 23 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117997, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-9153-6489, Scopus Author ID: 57200068947, eLIBRARY SPIN-code: 8780-8588; mdf.rudn@mail.ru

Ilya V. Vikentyev, Doctor of Geology, leading researcher, Laboratory of Ore Deposits, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, 35 Staromonetnyi Pereulok, Moscow, 119017, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9133-7562, Scopus Author ID: 6506542626, eLIBRARY SPIN-code: 2456-3030; viken@igem.ru

Сведения об авторах

Махмуд Хамза Адель, магистрант, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-2946-7144, eLIBRARY SPIN-код: 1929-6130; 1032205919@rudn.ru

Карелина Елена Викторовна, кандидат геолого-минералогических наук, доцент департамента недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0002-0929-4290, Scopus Author ID: 57215413670, eLIBRARY SPIN-код: 4919-8300; karelina-ev@rudn.ru

Марков Владимир Евгеньевич, старший преподаватель, департамент недропользования и нефтегазового дела, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6; ORCID: 0000-0001-6594-0763, Scopus Author ID: 57216825569, eLIBRARY SPIN-код: 5882-5663; markov-ve@rudn.ru

Дьяконов Виктор Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Российский государственный геолого-разведочный университет имени Серго Орджоникидзе, Российская Федерация, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23; ORCID: 0000-0002-9153-6489, Scopus Author ID: 57200068947, eLIBRARY SPIN-код: 8780-8588; mdf.rudn@mail.ru

Викентьев Илья Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, лаборатория рудных месторождений, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии, Российская академия наук, Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., д. 35; ORCID: 0000-0001-9133-7562, Scopus Author ID: 6506542626, eLIBRARY SPIN-код: 2456-3030; viken@igem.ru